

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2016

Mgr. Petr Bulušek



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

DIAGNOSTIKA ASYNCHRONNÍHO MOTORU S OHLEDEM NA JEHO ÚDRŽBU A SPOLEHLIVOST

INDUCTION MOTOR DIAGNOSTICS WITH REGARD TO MAINTENANCE AND RELIABILITY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Mgr. Petr Bulušek

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: Mgr. Petr Bulušek

ID: 174913

Ročník: 2

Akademický rok: 2015/16

NÁZEV TÉMATU:

Diagnostika asynchronního motoru s ohledem na jeho údržbu a spolehlivost

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Systematizujte diagnostiku ASM jako nástroj údržby.
2. Jaké jsou nejčastější poruchy ASM a jak se diagnostikují? Systematizujte diagnostické metody.
3. Rozpracujte MCSA (podpisovou analýzu proudového spektra) jako diagnostickou metodu nesymetrického zatížení ASM a implementujte ji do údržby a oprav výrobních strojů.
4. Změřte a analyzujte vzorky, abyste prozkoumal platnost a meze této metody.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] V. Mentlík, J. Pihera, R. Polanský, P. Prost a P.Trnka, Diagnostika elektrických zařízení., Praha: BEN technická literatura, 2008.
- [2] F. Veselka a V. Valouch, Laboratoře elektrických strojů a přístrojů, Brno: VUT v Brně, Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2006.
- [3] I. Jaksch, „Metody diagnostiky indukčních motorů,“
- [4] L. Cigánek, Stavba elektrických strojů, Praha: SNTL, 1958

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

Abstrakt

Diplomová práce *Diagnostika asynchronního motoru s ohledem na jeho údržbu a spolehlivost* si klade za cíl být teoretickou přípravou a aplikací on-line diagnostiky. Snaží se zmapovat korelace mezi poruchami elektromechanické soustavy poháněné asynchronním motorem a výstupními informacemi diagnostické metody. Zaměřuje se především na analýzu spektra statorového proudu, který v sobě nese informace o stavu asynchronního motoru v podobě charakteristických *podpisů* ve spektru (*Motor Current Signature Analysis*). V teoretické části se věnuje pojetí diagnostiky a především provozní diagnostice, klasifikuje a charakterizuje druhy poruch asynchronního motoru a podle toho zpracovává diagnostické metody. To vše provádí s ohledem na uplatnění v údržbě a kontrole strojů ve výrobním podniku. V praktické části vypracovává metodiku a postup měření. Na několika měřeních demonstruje, ověřuje a uplatňuje metodu MCSA. Simuluje abnormality a hledá jejich korelace ve spektru proudu. Nejdříve měří motor napájený z rozvodné elektrické sítě a posléze se snaží metodu MCSA aplikovat na motory napájené z frekvenčních měničů.

Abstract

The thesis *Diagnostic of induction motor with regard to its maintenance and reliability* aims to be a theoretical preparation and application of on-line diagnostics. It is trying to map correlations between electromechanical system failures driven by induction motor and output information of the diagnostic method. It mainly focuses on spectrum analysis of stator current which carries information on the induction motor status in the form of characteristic signatures in the spectrum (*Motor Current Signature Analysis*). The theoretical part deals with the concept of diagnostics and mainly with the operational diagnostics, it classifies and characterises types of induction motor failure and it accordingly processes diagnostic methods. This all is done with regard to the application of the maintenance and inspection of machines in a manufacturing company. The practical part develops methodology and measurement procedure. Several measurements demonstrate, validate and apply the MCSA method. It simulates abnormalities and searches for their correlations in the spectrum stream. First, a motor powered from electric distribution network is measured and then the MCSA method is applied to motors powered from frequency converters.

Klíčová slova

Asynchronní motor, on-line diagnostika asynchronního motoru, údržba, poruchy asynchronního motoru, diagnostické metody, MCSA, měření spektra proudu.

Keywords

Induction motor, on-line induction motor diagnostic, maintenance, induction motor failures, diagnostic methods, MCSA, current spectrum measurement.

Bibliografická citace

BULUŠEK, P. *Diagnostika asynchronního motoru s ohledem na jeho údržbu a spolehlivost*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 72 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. František Veselka, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma *Diagnostika asynchronního motoru s ohledem na jeho údržbu a spolehlivost* 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

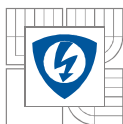
Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Františku Veselkovi, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a především za cenné rady. Dále děkuji firmě Fermat a jejím zaměstnancům za pomoc při realizaci praktické části práce. V neposlední řadě děkuji přítelkyni a rodině za podporu.

V Brně dne

Podpis autora

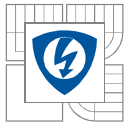


OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ	9
SEZNAM TABULEK	10
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	11
1 ÚVOD	12
2 TEORETICKÁ ČÁST	13
2.1 DIAGNOSTIKA.....	13
2.1.1 Diagnostika a její význam ve výrobním procesu	13
2.1.2 Struktura diagnostiky	14
2.1.3 Diagnostické přístupy	14
2.1.4 Diagnostická analýza, její metody, modely a postupy	15
2.1.5 Diagnostika off-line a on-line	16
2.1.6 Možnosti předpovědi.....	17
2.2 PORUCHY ASM	18
2.2.1 Třídění a stratifikace poruch a jím odpovídajících diagnostických metod	18
2.2.1.1 Příčiny a příznaky poruch ASM.....	19
2.2.1.1.1 Poruchy ložisek	19
2.2.1.1.2 Porucha excentricity	20
2.2.1.1.3 Porucha statorového vinutí	20
2.2.1.1.4 Porucha rotorových tyčí	21
2.2.2 Vlivy okolního systému na zhoršenou funkci ASM.....	22
2.2.2.1 Preventivní údržba jako prevence proti poruchám	22
2.3 DIAGNOSTIKA ASM:	24
2.3.1 Specifika diagnostiky ASM.....	24
2.3.1.1 Rozdělení diagnostických metod.....	24
2.3.1.1.1 Tři přístupy k diagnostice ASM	25
2.3.1.2 Diagnostické veličiny	26
2.3.2 Analýza spektra proudu	27
2.3.2.1 Diagnostika statorového proudu.....	27
2.3.2.2 On-line diagnostika elektrických strojů točivých.....	27
2.3.2.3 Signатурní analýza	28
2.3.2.3.1 Motor Current Signature Analysis (MCSA).....	29
2.3.2.4 On-line sledování rozběhu stroje.....	30
2.3.3 Analýza rozptylového magnetického pole	30
2.3.4 Metody identifikace mezizávitového zkratu.....	31
3 MĚŘENÍ	32
3.1 TEORETICKÝ ROZBOR MĚŘENÍ SPEKTRA A POUŽITÉ MĚŘICÍ PŘÍSTROJE	32
3.1.1 Požadavky na použitý osciloskop.....	32
3.1.1.1 Funkce osciloskopu k výpočtu spektra - Math FFT	32
3.1.2 Specifikace použité sondy	34
3.1.3 Použití přístroje pro měření:	34
3.1.3.1 Další měřicí přístroje	35
3.2 ROZBOR MĚŘENÍ A DIAGNOSTIKY	35
3.2.1 Metodika měření	36
3.2.2 Postup měření v případě provozní diagnostiky:.....	37
3.3 ZJIŠTĚNÍ STAVU NAPÁJECÍ SÍTĚ.....	38
3.3.1 Zjišťování kvality napájecí sítě ve výrobních halách, ve kterých byly zkoumány vybrané vzorky	39
3.4 MĚŘENÍ ASM S KOTVOU NA KRÁTKO PŘI NAPÁJENÍ „HARMONICKÝM“ NAPĚTÍM Z ROZVODNÉ SÍTĚ	41
3.4.1 Měření 1. vzorku – studium vlivu excentricity.....	41
3.4.1.1 Typ a upevnění motoru měřeného přípravku	41
3.4.1.2 Dupočítané kritické frekvence pro MCSA	42

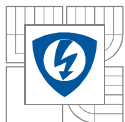


3.4.1.3	Výsledky naměřených spekter napětí a proudu	42
3.4.1.4	Závěr 1. etapy měření:	44
3.4.2	Měření 2. vzorku – studium vlivu řemenového převodu	45
3.4.2.1	Analyzovaný stroj - typ motoru	45
3.4.2.2	Dopočítané kritické frekvence pro MCSA	45
3.4.2.3	Naměřená spektra napětí a proudu	46
3.4.2.4	Závěr 2. etapy měření	48
3.4.3	Měření 3. vzorku – stojanová bruska	49
3.4.3.1	Specifikace motoru a naměřené parametry	49
3.4.3.2	Dopočítané kritické frekvence pro MCSA	49
3.4.3.3	Naměřená spektra proudu	50
3.4.3.4	Závěr 3. etapy měření	51
3.4.4	Měření 4. vzorku – ověření působení soustavy na motor u vertikální frézky	52
3.4.4.1	Typ motoru	52
3.4.4.2	Dopočítané kritické frekvence pro MCSA	52
3.4.4.3	Naměřená spektra proudu	53
3.4.4.4	Závěr 4. etapy měření	53
3.5	MĚŘENÍ ASM S KOTVOU NAKRÁTKO – NAPÁJENÉHO Z FREKVENČNÍHO MĚNIČE	54
3.5.1	Měření 5. vzorku – prověření aplikace MCSA na motor napájený z kmitočtového měniče	55
3.5.1.1	Typ motoru a měniče	55
3.5.1.2	Dopočítané kritické frekvence pro MCSA	55
3.5.1.3	Naměřená spektra napětí a proudu	56
3.5.1.4	Závěr 5. etapy měření	59
3.5.2	Měření 6. vzorku – motor napájený frekvenčním měničem a zatížený převodovkou	60
3.5.2.1	Typ převodovky	60
3.5.2.2	Naměřená proudová spektra	60
3.5.2.3	Závěr 6. etapy měření	62
3.5.3	Měření 7. vzorku – motor jako součást vřeteníku horizontální navrtávačky	63
3.5.3.1	Vřeteník WRF 110	63
3.5.3.2	Naměřená proudová spektra	63
3.5.3.3	Závěr 7. etapy měření	65
3.5.4	Měření 8. vzorku - aplikace na zabíhací a měřicí stolici	66
3.5.4.1	Zabíhací a měřicí stolice oddělení obráběcích hlav	66
3.5.4.2	Dopočítané kritické frekvence pro MCSA	66
3.5.4.3	Naměřená proudová spektra	67
3.5.4.4	Závěr 8. měření	68
4	ZÁVĚR PRÁCE	69
	BIBLIOGRAFIE	71



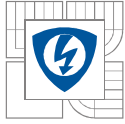
SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. – Příklad magnitud.	24
Obr. 2. – Principiální schéma on-line vyhodnocování spektra statorového proudu.	28
Obr. 3. – Aliasing – použito z manuálu k DSO Tektronic 2024.	33
Obr. 4. – Napájecí spektrum na jednotlivých fázích v hlavní rozvodně měřené GO osciloskopem.	39
Obr. 5. – Napájecí spektrum na jednotlivých fázích v hlavní rozvodně.	40
Obr. 6. – Přípojnice záběhové stolice napájené starším kmitočtovým měničem.	40
Obr. 7. – a) Ilustrativní fotografie 1. měřeného vzorku; b) ilustrace uspořádání:	41
Obr. 8. – a) Spektrum napájecího napětí; b) zaznamenaný průběh proudu.	42
Obr. 9. – Naměřená proudová spektra při ose otáčení orientované kolmo k zemi.	42
Obr. 10. – Naměřená proudová spektra při ose otáčení orientované vodorovně k zemi.	43
Obr. 11. – Naměřená proudová spektra zatíženého motoru při ose otáčení orientované kolmo k zemi.	43
Obr. 12. – Naměřená proudová spektra zatíženého motoru - vodorovně.	43
Obr. 13. – Naměřená proudová spektra nesymetricky zatíženého motoru - kolmo.	44
Obr. 14. – Naměřené průběhy proudu nesymetricky zatíženého motoru - vodorovně.	44
Obr. 15. – a) Fotografie 2. měřeného vzorku – „vyvažovačky“.	45
Obr. 16. – Naměřené spektrum napájecího napětí motoru.	46
Obr. 17. – Naměřené spektrum proudu při nezatíženém motoru (ve stavu naprázdno).	46
Obr. 18. – Naměřené spektrum proudu při zatíženém motoru ($J \approx 0,15 \text{ kg m}^2$).	46
Obr. 19. – Naměřené spektrum proudu při nesymetricky zatíženém motoru.	47
Obr. 20. – Naměřené spektrum proudu nového (spolehlivého) nezatíženého motoru.	47
Obr. 21. – Ilustrativní fotografie 3. měřeného vzorku: stojanové brusky.	49
Obr. 22. – Naměřená spektra proudu s významnými postranními pásmy okolo první harmonické.	50
Obr. 23. – Naměřená spektra proudu.	50
Obr. 24. – Rotor z demontovaného motoru.	51
Obr. 25. – Ilustrativní fotografie vřetenového motoru vertikální frézky FGW50.	52
Obr. 26. – Naměřené proudové spektrum.	53
Obr. 27. – Naměřená spektra proudu.	53
Obr. 28. – Levný měnič (Hitachi X200 -015SFEF).	54
Obr. 29. – Ilustrativní fotografie motoru 1PH8137 s připojeným napájením z měniče kmitočtu.	55
Obr. 30. – Naměřené průběhy a spektra napájení na výstupu měniče při náhodně zvolených otáčkách.	56
Obr. 31. – Naměřené spektrum napětí i za frekvenčním měničem.	56
Obr. 32. – Naměřená spektra napětí na výstupu frekvenčního měniče.	57
Obr. 33. – Naměřená proudová spektra při modulační frekvenci 50 Hz.	57
Obr. 34. – Naměřené spektrum proudu nezatíženého motoru s nastavenou modulační frekvencí.	57
Obr. 35. – Naměřená první harmonická proudu při modulaci: a) 50 Hz, b) 100 Hz a c) 150 Hz.	58
Obr. 36. – Naměřené spektrum proudu při simulované značně nesymetrické zátěži.	58
Obr. 37. – Ilustrativní uspořádání motoru.	60
Obr. 38. – Naměřená spektra proudu, při zařazeném I. převodovém stupni.	60
Obr. 39. – Naměřená spektra proudu, při zařazeném II. převodovém stupni.	61
Obr. 40. – Naměřené spektrum proudu (I. převodový stupeň, 50 Hz), se simulovanou nesymetrií zátěže.	61
Obr. 41. – Naměřená spektra proudu, II. převodový stupeň (50Hz) se simulovanou nesymetrií.	62
Obr. 42. – Ilustrativní uspořádání vřeteníku.	63
Obr. 43. – Naměřená proudová spektra na nezatíženém vřeteníku s otáčkami 255 min^{-1}	63
Obr. 44. – Naměřená proudová spektra na nezatíženém vřeteníku s otáčkami 1255 min^{-1}	64
Obr. 45. – Naměřená proudová spektra na nesymetricky zatíženém vřeteníku s otáčkami 255 min^{-1}	64
Obr. 46. – Nesymetricky zatížený vřeteník s otáčkami 1255 min^{-1}	64
Obr. 47. – Ilustrativní fotografie vřeteníku měřicí a záběhové stolice.	66
Obr. 48. – Naměřená postranní pásma okolo první harmonické proudu motorem.	67
Obr. 49. – Naměřená postranní pásma okolo první harmonické proudu motorem.	67
Obr. 50. – Naměřená postranní pásma okolo první harmonické proudu motorem.	67



SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1. – Vlivy na namáhání základních částí motoru.</i>	<i>22</i>
<i>Tabulka 2. – Tabulka určení metod pro konkrétní problémy.</i>	<i>28</i>
<i>Tabulka 3. – Amplitudový odstup v logaritmických souřadnicích.</i>	<i>34</i>
<i>Tabulka 4. – Odstupy složek harmonických podle ČSN 61000-2-4 [21].</i>	<i>38</i>



SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

β	kontaktní úhel ložiska [°]
D_b	průměr ložiskové kuličky [m]
D_c	průměr klece ložiska [m]
f_1	frekvence první harmonické (napájecího napětí motoru) [Hz]
f_{be}	frekvencemi složek vibrací při poruše ložiska [Hz]
f_{dr}	drážková frekvence rotoru [Hz]
f_{dyn_ex}	frekvence vibrací při poruše dynamické excentricity [Hz]
f_i	otáčková frekvence [Hz]
f_2	frekvence skluzu [Hz]
f_{ex}	frekvence na které vzniká <i>podpis</i> dynamické a kombinované excentricity u MCSA [Hz]
f_{ex2}	frekvence na které vzniká <i>podpis</i> dynamické a kombinované excentricity u MCSA [Hz]
f_n	jmenovitý kmitočet frekvenčně řízeného motoru [Hz]
f_r	frekvence rotoru [Hz]
f_{rt}	frekvence na které vzniká <i>podpis</i> poruchy rotorové tyče u MCSA [Hz]
f_{rt2}	frekvence na které vzniká <i>podpis</i> poruchy rotorové tyče u MCSA [Hz]
f_{rot_ex}	frekvence vibrací poruchy rotorové excentricity [Hz]
$f_{rot_tyč}$	frekvence vibrací poruchy rotorové tyče [Hz]
f_{stat_ex}	frekvence vibrací poruchy statorové excentricity [Hz]
I	převod [-]
\mathbf{I}	prostorový vektor statorového proudu [-]
I_n	jmenovitý proud [A]
MCSA	<i>Motor Current Signature Analysis</i> – podpisová analýza statorového proudu motorem
n_n	jmenovité otáčky (rotoru) [min^{-1}]
n_s	synchronní otáčky [min^{-1}]
n_{skluz}	skluzové otáčky [min^{-1}]
N_b	počet kuliček v ložisku [-]
N_r	počet tyčí rotoru [-]
P_n	jmenovitý výkon [W]
p_p	počet pólpárů [-]
s	skluz [-]
U_n	jmenovité napětí [V]



1 ÚVOD

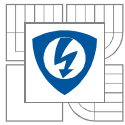
Pro současnou západní společnost má určující význam industriální rozvoj probíhající okolo přelomu 19. a 20. století. Zásadní pro jeho dynamiku mělo rozšíření transformace energie, přičemž hlavním pohonem celého průmyslu se postupně stával asynchronní motor (ASM) [1], [2], který je nejběžnějším točivým strojem využívajícím převážnou část elektrické energie, která je celosvětově vyprodukována. Jeho diagnostika a z ní vycházející optimalizace se tedy stávají nástrojem k ekonomizaci průmyslu. Jednalo se o geniální technické řešení Nikoli Tesly z roku 1887, tedy zhruba 40 let po objevu indukčního zákona Michaelem Faradayem. Nikdy v historii lidstva nedošlo k takové přeměně společnosti, kultury a obecně životního prostředí jako od doby, kdy začal být odhalován potenciál elektrické energie. Zvláště po realizaci kmitočtového řízení otáček po roce 1980 převládl asynchronní motor nad „klasickým“ stejnosměrným motorem, jehož hlavní nevýhodou je potřeba mechanické komutace a složitější a nákladnější konstrukce.

Problém diagnostiky poruch a abnormalit asynchronního motoru je určen systémovou provázaností jeho jednotlivých entit, které se elektromechanicky ovlivňují. Diagnostika konkrétního problému pak znamená vyloučení ostatních možných příčin a stává se tím *diferenciální diagnostikou*. Opravujeme-li následky poruchy, musíme se zabývat i příčinami, tedy proč k poruše došlo a často právě tato příčina odkazuje k něčemu dalšímu ať už vnějšímu, či principiálnímu. Odlišit jednotlivé poruchy pak v neposlední řadě znamená správně je diferencovat podle příčiny, původu (statorové, rotorové, v ložiscích) a projevu (elektrické a mechanické). Z toho rovněž plyne i rozdělení metod jakými se diagnostika provádí, protože každá porucha vyžaduje konkrétní sadu metod s konkrétním způsobem získávání potřebných veličin díky určitým přístrojům. Vždy je nutné mít na zřeteli meze a předpoklady jednotlivých přístupů, abychom se nedopustili elementárních metodologických chyb. Znamená to tedy osvojit si větší sadu metod a postupů, abychom poruchu diferencovali s co největší přesností, protože většina metod je kvůli idealizacím a aproximacím, jichž se záměrně dopouští, do jisté míry jen přibližná.

Analýza asynchronního motoru se často stává klíčovým problémem v provozu výrobních firem, a proto i samotná diagnostika je vyvrcholením teoretických znalostí o povaze těchto strojů. Vyrůstá z interdisciplinární spolupráce a technického myšlení, jehož největší předností je schopnost posoudit s jakou přesností a komplexností je třeba problém řešit, umí zanedbávat. Největším nástrojem diagnostika se stává schopnost systematizovat a kategorizovat problematiku: třídit jednotlivé pojmy poruch, jejich příčiny, podmínky a předpoklady a z toho podle sumy fenoménů dedukovat příčiny a řešení. Právě proto se i tato práce snaží nahlédnout na systém možných poruch a hledání jejich příčin, metod měření a možných řešení, mezi kterými je nutno podle podobnosti a pravděpodobnosti hledat tak, jak si to údržbářská praxe žádá.

Tato diplomová práce si klade za cíl být teoretickou přípravou a aplikací **on-line** diagnostiky a snaží se zmapovat korelace mezi poruchami uspořádání elektromechanické soustavy poháněné motorem a výstupní informací diagnostické metody. Jelikož v údržbářské praxi má největší potenciál on-line diagnostika, zaměřuje se práce především na ní a speciálně na analýzu statorového proudu, která je v současnosti hojně diskutována. Výstupem práce se pak stává demonstrace využití metody **MCSA** v údržbářské praxi. Metoda *Motor Current Signature Analysis* (MCSA) vychází ze souvislosti elektromechanického uspořádání motoru, která se vlivem modulace magnetického toku ve vzduchové mezeře projevuje v podobě spektra statorového proudu. Jednoduše řečeno se spektrum proudu mění vlivem povahy otáčení rotoru, resp. oscilací magnetického pole. Metoda se snaží identifikovat konkrétní podoby spektra související s vlivy na otáčení rotoru (porucha rotorové tyče, nesymetrie či jiná abnormalita zátěže, excentricita). Tyto projevy ve spektru proudu se nazývají *podpisy* (signatures)¹ a jsou primárně určeny svou frekvencí a magnitudou (amplitudou ve spektru), resp. odstupem od základní harmonické. Hlavními úkoly praktické části jsou: 1) zachytit korelace mezi *podpisem* a vlivem abnormality; 2) demonstrovat MCSA jako nástroj provozní diagnostiky v údržbářské praxi a 3) aplikovat MCSA i na kmitočtově řízené asynchronní motory s kotvou nakrátko.

¹ Termín *podpis* je významovým překladem anglického *signature*, které je v celé práci používáno jako technický termín běžný v literatuře zabývající se diagnostikou ASM a především analýzou spektra. Hlavním jeho významem je „amplitudou a frekvencí signifikantní projev korelace mezi elektromechanickou příčinou a tvarem proudového spektra v jeho zobrazení“, tedy jednoduše projev poruchy ve spektru statorového proudu.



2 TEORETICKÁ ČÁST

2.1 Diagnostika

2.1.1 Diagnostika a její význam ve výrobním procesu

Technická diagnostika [3], [4], [5] se zabývá studiem dějů probíhajících při interakcích zařízení s provozními a výrobními podmínkami, tedy získáváním informací o stavu diagnostikovaného objektu. Toto určování stavu, týká-li se elektrických (točivých) strojů, se realizuje ve dvou klíčových procesech stroje a tedy výrobě a provozu, hovoříme pak o **elektrotechnologické diagnostice** a **provozní diagnostice**. Vysvětlení funkcí těchto disciplín se stává argumentem pro důraz na diagnostiku a vyzdvižení jejího klíčového významu ve výrobním procesu.

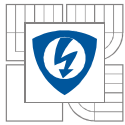
Diagnostiku obvykle dělíme [6] na: a) **přímou** a **nepřímou**; b) **částecnou** a **celkovou**; c) **mezioperační**, **výstupní** a **provozní** (provozní na: servisní, periodickou a průběžnou); d) **komplexní** a **hloubkovou**; e) **subjektivní** a **objektivní**; f) diagnostiku **poruch** a **funkční diagnostiku**; g) diagnostiku prováděnou off-line a on-line; Pro diagnostiku jsou určující pojmy *diagnóza* vyhodnocující stav objektu, jež vede k detekci a lokalizaci poruchy nebo stavu zařízení jako takového; *prognóza* – stanovení pravděpodobného dalšího vývoje zařízení; a *geneze* – analyzující příčiny změny (tedy většinou zhoršení) stavu zařízení. Specifické pojetí diagnostiky s sebou nese i jedinečné vymezení a realizaci těchto pojmů.

V **elektrotechnologických** disciplínách je nejdůležitější materiálové inženýrství, které volí vhodné materiály a jejich struktury podle požadovaných vlastností a které zároveň diagnostikuje, zda jsou tyto vlastnosti v tolerancích nezbytných pro výrobu. Stejně tak důležitá je diagnostika i v samotném technologickém procesu výroby a montáže výrobku. Vytváří se pak informace pro mezioperační kontrolu (která má vyloučit špatné díly kvůli ekonomickému efektu) a výstupní kontrolu (tedy odzkoušení hotového výrobku).

Vedle toho se **provozní diagnostika** v první řadě podílí na detekci, rozboru, odstranění a předcházení příčinám poruch v samotném provozu zařízení. Vytváří se evidence o druhu, četnosti a rozsáhlosti změn stavu zařízení (poruch) z čehož plynou důsledky pro údržbu a optimalizaci provozu. Z takto získaných dat se vytvářejí databáze a grafy o vývoji stavu a dynamice zařízení, jež jsou velmi cenné pro analýzu i k predikci problému provozu zařízení. Na základě toho pak dochází ke změnám seřízení, vytížení, údržby, úpravě prostředí a úpravě samotného užívání zařízení jako takového.

Provozní diagnostika [4] nejen odhaluje poruchy, ale navrhuje i postupy jak poruchy odstranit, co nejefektivněji a nejrychleji. Musí tedy předně získat informace, analyzovat je a tedy určit příčiny a pak vydat instrukce pro údržbu (identifikace poškozeného dílu, demontáž, získání náhradního dílu a výměna a předcházení dalšímu zhoršení stavu). Diagnostika optimalizuje výrobu podle dvou pravidel: co nejrychleji (aby byl co nejkratší prostoj a tedy i ekonomická ztráta) a zároveň, co nejspolehlivěji, minimalizovat pravděpodobnost další poruchy (a tedy další prostoj a ztráty). Často jsou tato dvě pravidla ve sporu a management, jež někdy upřednostňuje aktuální před dlouhodobým řešením, uplatňuje nejčastěji první pravidlo. Stejně tak důležité jsou i důsledky pro samotnou výrobu, jedná-li se o opakující se poruchy, což následně má vést ke změnám konstrukce zařízení. Tedy i technologická diagnostika, sleduje-li život technických zařízení, využívá výsledky provozní diagnostiky.

Diagnostika **optimalizuje výrobu** hned dvakrát a to jednou jako součást výrobního procesu výrobků, tak jako provozního procesu výrobních zařízení. Protože se však tento diagnostický cyklus konstrukce-výroby-provozu a údržby a jejich komunikační kanály často podceňují je spíše znakem vyspělých firem orientujících se na kvalitu, tedy zařízení vyšší cenové hladiny. Je zde opět napětí mezi pořizovací cenou (tedy nejrychlejší finanční návratnost) a pohotovostí (spolehlivostí a životností). Analýza



pohotovosti vycházející ze spolehlivosti (pravděpodobnosti bezporuchového provozu) a udržovatelnosti zařízení (pravděpodobnosti uvedení do provozu po poruše) je pak klíčovou informací pro nákup nového zařízení.

Vlivem požadavků na přesnost a efektivitu provozu a funkce elektrických strojů klade důraz i na získávání informací o spolehlivosti, přesnosti a kvalitní funkci stroje. V této souvislosti se **diagnostický systém** odlišuje podle technické fáze života, ve kterém je objekt diagnostikován, pak rozlišujeme diagnostiku **po poruše, dle plánu, dle skutečného stavu**. První způsob je nevhodný protože při něm dojde k prostoji a silným ekonomickým ztrátám. Druhý se jeví jako ekonomicky nevýhodný, protože může znamenat plýtvání (často se k němu uchyluje z preventivně bezpečnostních důvodů). Třetí je nejekonomičtější, přičemž jak je patrné, technickým stavem se rozumí schopnost vykonávat funkce za stanovených podmínek.

2.1.2 Struktura diagnostiky

Předmětem zkoumání diagnostiky [4] je tzv. **diagnostikovaný objekt**, který je ovlivněn při výrobě **technologií a podmínkami výroby** a během svého života **provozními podmínkami a činiteli prostředí**. Všechny tyto vlivy se podílejí na jeho stavu a je třeba je při diagnostice zohledňovat. Takovýto objekt však nemusí být konečná entita, ale jde ještě dělit na funkční části. Jeho stav, který diagnostika zkoumá je pak určen nejen vnějšími vlivy tedy podmínkami výroby a provozními podmínkami, ale i strukturou jeho částí, která konstituuje jeho funkce a na které se podílí technologie a konstrukce. Objekty pak mohou být **přístupné** samotnému zkoumání anebo **nepřístupné** a jsou zkoumány jen jako změny ve vstupech a výstupech celého systému případně jako vlivy na jiný objekt. Diagnostika tedy **kontroluje vstupy a výstupy** diagnostického objektu a chování jeho struktury. Vnímáme-li jej jako dění, lze říci, že přechází z **bezporuchového stavu do poruchového** a následně do **provozuschopného** stavu.

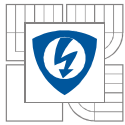
Provozní podmínky jsou důležitým faktorem a vypovídají o provozním stavu objektu, přičemž je nutné odlišovat podmínky **normální** – tedy provoz respektující návod k obsluze, zásady údržby - a **nenormální**, kde není respektován provoz, na který byl objekt konstruován. Jsou-li dodržovány normální podmínky, lze tvrdit, že porucha vznikla z vnitřních příčin.

Informace, kterou diagnostika získává o objektu, pochází z *diagnostické veličiny*, kterou však nelze vnímat jako striktně deterministickou a jednoznačně podmíněnou a tím i analyzovatelnou, ale jako vždy určitým způsobem stochastickou. Tedy i informace, kterou diagnostika získává, má vždy pravděpodobnostní charakter. Důvodem pravděpodobnosti je souvislost různých vlastností, které podmiňují stav objektu, nemožnost diagnostikovat některé vlastnosti a nepřesnost vzniklá měřením. Diagnostika pak získává určité signály a zpracovává je, aby z takto získaných veličin vytvořila informaci o objektu a jeho stavech. *Diagnostický systém* tedy potřebuje podle charakteru zkoumaného objektu a povaze informace, které požaduje, vhodně volit své **diagnostické vybavení, model diagnostického objektu** (většinou matematické s přenosovými funkcemi a funkčním blokovým schématem), **záznamy o stavech, vhodnou metodu a přístup**.

2.1.3 Diagnostické přístupy

Většinou se mluví o dvou přístupech k diagnostice: a sice fenomenologický, ve kterém se zkoumá pouze reakce na vstupní diagnostické signály, anebo strukturální, který se zajímá o změny v samotném diagnostickém objektu. I když **strukturální** přístup nabízí přesnější a větší množství informací o objektu, je nákladnější a často těžko realizovatelný. Obvykle se v provozních podmínkách spíše volí **fenomenologický** přístup, který má pravděpodobněji charakter, ale zato je rychlejší, má větší tradici a je méně ekonomicky nákladný, i když je vždy nutné kalkulovat, zda i dražší informace o objektu nejsou levnější, pokud je zásadně snížena pravděpodobnost další poruchy.

V problematice diagnostického přístupu je dále důležité dělení na **destruktivní** a **nedestruktivní** zkoumání, které vychází ze způsobu provádění zkoušek. Destruktivní zkoušky mají velkou výpovědní hodnotu, jsou však nákladné, a jelikož je leckdy objekt zničen, hodí se v drtivé většině pouze do výrobního procesu. Nedestruktivní zkoušky se dají opakovat a objekt nepoškozuje, často však přehlédnou poškozený



stav objektu, který může v kritických provozních podmínkách vést k poruše. Proto se někdy i v provozní diagnostice přistupuje ke zkoušce, jež prověřuje krajní podmínky, na které je stroj konstruován. Opět je nutná kalkulace, protože často stroj se zhoršeným stavem funguje velmi dlouho v bezporuchovém provozu.

S dělením diagnostických přístupů na destruktivní a nedestruktivní přímo souvisí rozdělení na zkoumání **on-line** a **off-line**. První případ zkoumá objekt v provozu a druhý v určitých simulačních podmínkách, velmi často vzorových vstupech. On-line přístup dokáže odhalit dynamické vlastnosti objektu, off-line se odhalují pouze statické vlastnosti, resp. reakce zkoumaného objektu na dané vstupní veličiny.

Posledním a velice významným faktorem diagnostiky jsou **zkušenosti** a znalosti osoby provádějící diagnostiku. Většinou se ukazuje, že nejefektivnější je individuální a osobní přístup konkrétní osoby k objektu, se kterým má dlouholeté zkušenosti a má znalost o jeho historii. Každá diagnostika musí respektovat, že některé chování nepůjde jednoznačně analyzovat a žádný z postupů nás nedovede blíže k řešení, pak zbývá jen vsadit buď na intuici anebo na metodu brokovnice.

2.1.4 Diagnostická analýza, její metody, modely a postupy

Z hlediska analýzy rozlišujeme tři fáze diagnostiky a sice: **diagnózu** – jež určí stav zařízení, **prognózu** – která předpoví, jak se s určitou pravděpodobností bude zařízení nadále chovat a jak se bude měnit jeho stav a nakonec **genezi** – která ze získaných znalostí určí příčiny poruch a zhoršených stavů zařízení a nabídne opatření.

I když lze zvolit různé postupy diagnostické analýzy, je vždy nutné provést několik důležitých kroků. Nejdříve je nutné se **seznámit** se zkoumaným objektem. Je nutné mít znalost o jeho struktuře, prostředí, provozních podmínkách nejen normálních, ale i skutečných a samozřejmě i znát alespoň v hrubých rysech jeho matematický model, který slouží ke kvantitativní analýze. Model pak vytváří strukturu, jež převádí podle určitého vzorce vstupy na výstupy. Takovýto model, jedná-li se o složitější stroje, je dále složen ze submodelů. Často se využívá srovnání ideálního modelu, tedy předpokládaných stavů a reakcí na vstupní veličiny a skutečné změřené veličiny. V podstatě lze říci, že suma vstupních a výstupních naměřených hodnot nám již dává ponětí o modelu daného objektu.

Model zařízení nám slouží pro zjednodušené zobrazení diagnostikovaného objektu a sledování jeho chování. Modely lze rozdělit na

- a) **fyzikální** (zmenšené makety, mezioborové analogie);
- b) **matematické**:
 - 1) analytické - statické - soustava algebraických rovnic;
- dynamické - soustava diferenciálních rovnic;
 - 2) modely procesního chování - funkční model - určen pouze vstupními, stavovými a výstupními veličinami; pokud se jedná pouze o vstupy a výstupy mluvíme o černé skřínce);
 - 3) fyzikálně matematický model,
 - 4) empirický model,
 - 5) parametrický model - s konstantami odhadovaných rovnic, buď statisticky, nebo z dynamické odezvy);
 - 6) logický model - fyzikální proměnné jsou nahrazeny stavovými, využívá se Booleovy algebry);
- c) **topologické**: - u složitějších systémů se používají orientované grafy).

Všeobecně lze nalézt dva přístupy k modelům elektrického stroje: 1) **analytický** – chování stroje se popisuje bez ohledu na jeho strukturu, a funkce stroje je popsána matematicky; a 2) **strukturní** – kde prvotní je hledisko struktury stroje a to se pak převádí na elementární subsystémy pomocí blokových schémat a logických modelů.

V diagnostice se často využívají modely určené podmínkami provozu. Postupuje se pak tak, že pracuje nejdříve 1) s modely v modelových podmínkách (zjištění jak by se měl objekt chovat), dále 2) s reálným objektem v modelových podmínkách (zjištění jak by se skutečný objekt v daném stavu měl chovat), dále 3) s modelem v reálných podmínkách (jak by se dalo předpokládat, že by se měl chovat) až nakonec 4) s reálným objektem v reálných podmínkách (jak se chová). Z těchto distinkcí se vytvářejí



hypotézy a dedukují se možné příčiny poruchy, místo aby se pouze zkoušelo odstraňovat jednotlivé příčiny poruch a zkusmo se zařízení spouštělo, což by často vedlo k poškození dalších a dalších dílů.

Model tedy volíme podle naměřených veličin a znalostí o zkoumaném objektu. To předpokládá konkrétně zvolený *diagnostický systém* – tedy metodu, vybavení a znalosti. Postupuje se tak, že se (1) zpracovává záznam dřívějších stavů a jejich tendencí, z toho se (2) vytváří hodnocení stavu objektu, (3) analýza poruchového stavu, (4) odhalení příčin, až se nakonec (5) hledají řešení odstranění poruchy a (6) předcházení poruše a v neposlední řadě (7) prognostika dalšího chování systému pro optimální odstranění poruchy. V této souvislosti je nutné mít na paměti, že i po odstranění poruchy a dokonce i jejich příčin, může být systém, jehož je zkoumaný objekt součástí, natolik pozměněn (rozházen), že může být pravděpodobnost další poruchy větší než s poškozeným dílem. Vždy je nutné respektovat všechny změny, které se ve zkoumaném systému děly, dějí a které se stanou odstraněním poruchy. Rovnováha systému často není totéž, co dobrý stav všech dílů.

Před každým zkoumáním objektu se pracuje s obecným modelem, který se postupně poznáváním mění a specifikuje. Nutno tedy vždy dávat přednost tomu, jak se diagnostikovaný systém chová než jak by se chovat měl podle modelu. První úkol je vůbec detekovat objekt, který by měl být diagnostikován, k čemuž slouží normovaný model celého systému. Předpokládané odchylky skutečnosti od tohoto modelu upozorňují na možná místa problému, které znamenají buď příčinu anebo následky nestability, tedy příčinu poruchy nebo následek (pojistka je následek, proto její výměna většinou problém neřeší).

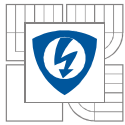
2.1.5 Diagnostika off-line a on-line

Jak bylo uvedeno v kapitole 2.1.3, z hlediska diagnostických šetření se rozlišují dva způsoby šetření **off-line** - testovací diagnostika, a **on-line** - funkční diagnostika. **Off-line** se diagnostikuje nezávislými (kombinačními) a závislými (sekvenčními) algoritmy, přičemž u kombinačního postupuje sled kroků testu nezávislý na předchozím. Off-line má přednost především při detekci poruch, které se při provozu projevují jen málo často, protože dokáže nasimulovat předpokládaný stav vedoucí k poruše.

Testovací (off-line) diagnostika vysílá do diagnostikovaného objektu řídicí signály, které jsou vytvářeny a regulovány podle fyzikálního modelu. Následně jsou zkoumány odezvy prostřednictvím měřících zařízení, až jsou nakonec tyto reakce vyhodnoceny a vzniká výsledek diagnózy. V podstatě je porovnávána reakce skutečného diagnostického objektu a modelu. Model může být postupně upravován podle pravděpodobnostních poruch. Můžeme tedy nejdříve vytvořit model asynchronního motoru a poté podle odchylek od předpokládaných reakcí použít model motoru se zabrzděným rotorem a porovnat jej s naměřenými daty. Tento proces se může dít automaticky řídicím systémem nebo může být prováděn diagnostikem, který často modely volí intuitivně a podle zkušeností. Stane-li se však tato volba uvědomělou a podrobí se kvantitativní analýze, je možné diagnostický proces optimalizovat a opravu zefektivnit.

Funkční diagnostika probíhající za plného provozu zkoumá reakce na provozní, pracovní signály. Poté je třeba měřit nejen řídicí signály, ale i reakce na ně. Většinou se vyplatí nespoléhat na řídicí systém nebo algoritmus, který řídí provoz celého automatizovaného systému, ale spíše jeho pokyny prověřovat.

Způsob provádění diagnostiky může být buď získání on-line či off-line diagnostických signálů a jejich následné zpracování, nebo to může provádět **automatická diagnostika**, realizovaná samotným řídicím systémem složitějších strojů, až nakonec může sám stroj provádět autodiagnostiku při spuštění nebo stále za provozu. Nutno mít na paměti, že automatická diagnostika pracuje se statistickými předpoklady, jak se stroj chová, a tedy analyzuje systém podle nejvyšší pravděpodobnosti, a stejně tak i autodiagnostika vychází z naprogramovaných poruch a podle toho generuje chybová hlášení. Konkrétní chybové hlášení pak může odkazovat na jinou příčinu, protože a) byla splněna jiná ze série podmínek pro hlášení, b) jde o následek jiné poruchy, kterou však systém nekontroluje, c) jde o souhrn více poruch, anebo d) jde o chybný proces diagnostikování poruchy. Po překontrolování možných příčin, na něž upozorňuje chybové hlášení, nezbyvá než zpochybnit samotnou autodiagnostiku, která sice může být ve většině případů přínosná, avšak nyní se stává překážkou či dokonce příčinou poruchy.



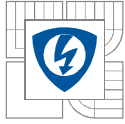
U **off-line** zkoušek je klíčové jejich periodické opakování, je však těžké najít jednoznačně efektivní intervaly jejich provádění. Proto se i u nákladnějších strojů dostává do popředí **on-line** diagnostika. Její hlavní výhodou je přímá možnost ukládání získaných dat a okamžitý výstup při poškození stroje. Řídicí systém přímo generuje testovací signály a vyhodnocuje stav stroje. Pokud jde o tok informací, jak u on-line tak u off-line diagnostiky, je nutné klást důraz na volbu míst, která budou na diagnostickém objektu snímána. Musí vždy jít o podsystémy, jež jsou nejcitlivější na vznik a projev případné poruchy, přičemž zohledněna má být i diagnostika ochranných prvků stroje. Nejcitlivější pak jsou izolační systém, ložiska a spojovací místa. Pro vypověditelnost vybraných metod je klíčový strukturální přístup. U zkoumání izolačních systémů je nejvhodnější zvolit metody popisující stav a vývoj entalpie materiálů, čímž je zkoumán stav materiálu a lze pak vytvářet prognostické hypotézy.

U **mezioperační zkoušky** nesmí být zkoušený předmět přiloženým napětím narušen, ale zkouška musí být maximálně účinně výpovědi-schopná. Přitom se analyzuje i vliv použitých technologií laboratorními zkouškami, z nichž vycházíme i v přípravné fázi provozní etapy diagnostiky. Zkoumán je vliv provozních faktorů a prostředí. Zde nacházejí uplatnění zkrácené zkoušky, jež urychleně simulují reálné podmínky. Diagnostika pak získaná data systematizuje, aby byla použitelná pro prognostiku.

2.1.6 Možnosti předpovědi

Prognostika [6], [3] zkoumající předpověď dalšího vývoje vychází ze znalosti aktuálního stavu, předchozího vývoje a jeho tendence a nakonec z modelu diagnostického objektu. U postupné poruchy vznikající postupným zhoršováním technického stavu objektu lze předpovědět dobu, kdy dojde k poruše. Podle takovéto prognózy se navrhuje a realizují opatření, aby se tendence změnily. Pro přehlednost se vyplatí zanechat kvantifikovaný stav do grafu jako funkce času. Většinou zjistíme, že proces změn není lineární a často jsme nuceni počítat s logaritmickým zhoršováním, protože často zhoršený stav zhoršuje i provozní podmínky (například zahřívání zvětšuje okolní teplotu, zadírající se ložiska mechanické namáhání, excentricita může být přenášena na zbytek soukolí a to opět zpětně může zhoršovat excentricitu), lze se ale setkat i se situací, kdy se systém zhoršenému stavu přizpůsobí a proces degenerace se zpomaluje (zvýšená teplota dokáže stabilizovat izolační pevnost laku na vinutí – znovu jej „speče“, nebo mechanické styčné plochy se přizpůsobí nerovnostem, čímž se sníží namáhání). Většinou se ale vyplatí počítat s horší variantou. Z hlediska tendencí ve vývoji je nutné podle zkušeností volit vhodný prognostický model, který nám ukáže, kam zachycené tendence směřují. Velkým problémem pro prognostiku se stává situace, při které se mění kontinuita namáhání, čímž se proces skokově změní (jako když poslední kapka způsobí přetečení poháru). Takto nestabilní je potenciálně každý systém a každý prognostický model má pak nutné statistické meze své předpověditelnosti.

Etapami prognostiky jsou: (1) sběr dat (dostatečný počet vzorků o chování diagnostikovaného objektu), (2) tvorba představy o tendencích změn, (3) určení zákonitosti, (4) výpočet, případně odhad možných trendů chování podle modelu.



2.2 Poruchy ASM

Diagnostika zkoumající tzv. příznaky **poruch** [6] pomocí diagnostických signálů zjišťuje stav diagnostikovaného objektu a charakterizuje tak zařízení z hlediska poruchy a spolehlivosti jako: bezvadné, bezporuchové anebo provozuschopné. **Bezvadný stav** vyjadřuje shodu všech funkcí s požadavky kladenými na zařízení; vedle toho **provozu schopný** (neboli funkční) stav se týká shody pouze hlavních funkcí; a nakonec **poruchový** stav je u zařízení, u něhož není shoda s hlavní funkcí. Zařízení tedy buď funguje, nebo funguje dostatečně, anebo nefunguje a tím je v poruše. Přechody mezi těmito stavy zkoumá **teorie spolehlivosti**, která především klasifikuje poruchy z hlediska příčin a vytváří zobrazení spolehlivosti. Tento přístup je důležitý nejen při samotné diagnostice, ale i při organizaci údržby a snaze zachovat plynulý chod provozu. Z dat získaných diagnostikou se vytváří databáze poruch a četnost příčin, aby se nakonec výsledek zobrazil v grafu rozdělení.

Diferenciální diagnostika točivých strojů se snaží vyloučit poruchu přívodu elektřiny, měniče, spínacích a přepínacích prvků, kabeláže, regulační soustavy (odměřování a přívodní kabel, snímače), řídicího systému a v neposlední řadě mechanické soustavy. Chceme-li odhalit konkrétní poruchu, je třeba pochopit, jak se jednotlivé poruchy projevují, dobře ji diagnostikovat pak předpokládá znalost, jakou mají jednotlivé poruchy povahu a průběh. Takovouto diferenciální analýzou jde ze sumy poruchových znaků identifikovat právě jeden konkrétní problém. Z toho tedy plyne, že diagnostika asynchronního motoru přímo souvisí nejen s elektro-magneticko-mechanickým stavem samotného motoru, ale i systému, kterého je součástí, protože ne vždy je možné jednoznačně nedostatek motoru odhalit.

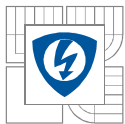
Jelikož ASM je točící, vysoce symetrický stroj, všechny elektrické a mechanické poruchy se *zapisují* do spektra vibrací i momentotvorných elektrických veličin a narušují jejich symetričnost. Je tedy proto více než vhodné, ještě než přejdeme k jednotlivým diagnostickým metodám, chápat každou poruchu jako modifikující spektrum diagnostických veličin, respektive vnášející do jinak bezporuchového *obrazu* specifické oscilace (*podpisy*). Charakteristická frekvence poruchy je závislá na konkrétním typu poruchy.

2.2.1 Třídění a stratifikace poruch a jím odpovídajících diagnostických metod

Jelikož indukční motor je elektro-mechanické zařízení, mohou se jeho poruchy projevovat nejen elektricky ale i mechanicky a proto se podle původu dělí na:

- 1) **Elektrické:** a) zkratky ve statorovém vinutí;
b) přerušené vinutí;
c) poruchy rotorových tyčí,
d) přerušené tyče nebo zvýšený odpor tyčí;
e) poruchy rotorového věnce, přerušený rotorový věnec;
- 2) **mechanické:** a) vady ložisek;
b) nevyváženost rotoru;
c) nesouosost uložení;
e) ztráta tuhosti hřídele, ohnutý rotor;
f) statická excentricita;
g) dynamická excentricita;
h) kombinovaná excentricita.

Při tomto rozdělení je třeba mít na zřeteli, že přenos elektrických poruch do vibrací je zašumělý, těžko se vyhodnocuje a málo se využívá, ale i tak je třeba s ním počítat. Přenos mechanických projevů do magnetického obvodu již není tak zašumělý a výhodněji se diagnostikuje. Projevuje se jako modulace proudu změnou pole ve vzduchové mezeře a zjišťuje se analýzou statorového proudu. Například vibrace a změny krouticího momentu lze diagnostikovat spektrální analýzou proudu motoru.



Podle IEEE [7], [8], [9] jsou statisticky nejčastější poruchy ložisek (41 %), dále poruchy statoru (37 %) a až pak rotoru (10 %). U statorových poruch je nejčastější zkrat na zem (62 %) a dále porušená izolace vedoucí k mezizávitovému zkratu (11%). V 53 % jde o elektrické a 47 % o mechanické poruchy. Mezi rotorovými poruchami se nejčastěji setkáme s poruchou rotorových tyčí (35%), hřídele (20%) a rotorového věnce (15 %) a překvapivě nevyvážení tvoří jen 5 % rotorových poruch. Většinou se jedná o porušení rotorové tyče nebo její zvýšený odpor, přerušení rotorového věnce, dynamickou, statickou nebo kombinovanou excentricitu. Rotor tedy může být buď oválný, nebo mimo osu, což je statická excentricita. Nebo může být ohnutá osa, či uvolněný kruhový rotor, což jsou dynamické excentricity.

Podle pravděpodobnosti, že k nim dojde lze tedy poruchy dělit na poruchy:

- 1) **ložisek:**
 - a) porucha vnějšího kroužku;
 - b) porucha kuliček;
 - c) porucha vnitřního kroužku;
- 2) **statoru:**
 - a) přerušené statorové vinutí nebo zkrat na kostru - které lze nejnázve detekovat;
 - b) zkraty ve statorovém vinutí - začínají nedetekovatelným snížením izolačního odporu mezi dvěma závitovými vinutí a dále pokračují mezizávitovým zkratem a mohou se dále rozšiřovat;
 - c) zvýšený odpor statorového vinutí;
- 3) **rotoru:**
 - a) přerušené rotorové tyče nebo zvýšený odpor tyčí;
 - b) ohnutá hřídel a dynamická, statická nebo kombinovaná excentricita;
 - c) přerušený rotorový věnec;
- 4) **ostatní:** a) čela motoru, b) svorkovnice, c) plechů.

Zabýváme-li se statistickou četností poruch, je dobré mít na zřeteli i poruchovost u jednotlivých užití středních a velkých motorů podle ESA: pumpy (31 %), kompresory (18 %), ventilátory (16 %), obráběcí stroje (9 %).

2.2.1.1 Příčiny a příznaky poruch ASM [7], [8]

2.2.1.1.1 Poruchy ložisek

Poruchy ložisek [10], [7] se projevují vibracemi, vnitřním pnutím, vlastní excentricitou a ložiskovými proudy. **Ložiskové proudy** vznikají výbojem prorážejícím elektrickou pevnost lubrikantu, který vzniká od tzv. „hřídelového napětí“ naindukovaného rychlými změnami napětí $\frac{du}{dt}$ na parazitní kapacitě stroje vůči zemi. Jsou výsledkem pulsních překmitů měniče, vedle nesymetrie magnetického obvodu motoru, nesymetrie napájení a přechodných jevů. Hřídelové napětí se akumuluje na rotoru a při překročení elektrické pevnosti lubrikantu se cyklicky vybíjí do země. Jde o princip elektrojiskrového obrábění (drátovačka). Vytvářejí se tím na ložiskách degenerační stopy, které zhoršují plynulost ložisek, a prvním příznakem ložiskových proudů je tedy hlučnost. Ložiskové chyby mohou odrážet defekty vnitřních a vnějších kroužků ložisek nebo kuliček či válečků.

Chyby v částečném zatížení řídicího systému, nerovnovážné zatížení, ohnutí hřídele, chyba převodovky, nebo porucha ložisek vyvolávají periodické změny zatěžovacího momentu indukčních strojů. Momentové oscilace již existují u nepoškozeného motoru vlivem prostoru vzduchové mezery, ale chybné momentové oscilace se prezentují na konkrétních frekvencích často závislých na otáčkách hřídele. Frekvence vibrace hřídele je spojená s různými chybami kuličkových ložisek, může jít o harmonické frekvence:

$$\text{porucha klece: } f_c = \frac{1}{2} f_r \left(1 - \frac{D_b \cos \beta}{D_c}\right) \quad (1)$$

$$\text{porucha vnější oběžné dráhy: } f_o = N_b \frac{1}{2} f_r \left(1 - \frac{D_b \cos \beta}{D_c}\right) \quad (2)$$



$$\text{porucha vnitřní oběžné dráhy } f_c = \frac{1}{2} f_r \left(1 + \frac{D_b \cos \beta}{D_c}\right) \quad (3)$$

$$\text{porucha kuliček: } f_b = \frac{D_c}{D_b} f_r \left(1 - \left(\frac{D_b \cos \beta}{D_c}\right)^2\right) \quad (4)$$

kde f_c je frekvence poruchy klece, f_r - frekvence rotoru, D_c - průměr klece, D_b - průměr ložiskové kuličky, β - kontaktní úhel, N_b - počet kuliček v ložisku;

Typické ložiskové poruchy jsou detekovány vibračním signálem. Vibrace a proud jsou různé povahy. Vibrace jsou definovány jako zrychlení vztažené na čtverec frekvence, avšak spektrum proudu je vůči nim posunut a citlivý především na malé kmitočty. Spojitost mezi vibracemi a složkami proudu byla prezentována užitím dvou odlišných přístupů a na vibrace bylo pohlíženo jako na složky momentu generované dvěma frekvencemi složek f_{be} ve statorovém proudu. $f_{be} = |\pm k f_0|$. V současnosti ale probíhá velký výzkum zkoumající ložiskové defekty na základě proudového signálu, což se ale týká spíše velkých defektů. Mechanicky indukovaná rychlost oscilace se projevuje na postranních pásmech základní statorové frekvence proudu, k tomu ale více až u konkrétních diagnostických metod.

2.2.1.1.2 Porucha excentricity

Excentricita rotoru [10], [8], [10], [5] okolo vzduchové mezery může být klasifikována jako statická, dynamická anebo složená. Statická excentricita je definována posunutím rotační osy, dynamická jako posun rotoru při zachování rotační osy. Příčinou může být špatná pozice ložisek při montáži motoru, opotřebená ložiska; ohnutá hřídel rotoru, nebo provoz nad kritickými otáčkami vytvářející víření. Excentricita působí na stroj a výrazně zvyšuje ložiskové víření. Radiální magnetické pole může vlivem excentricity zatěžovat vinutí statoru škodlivými vibracemi. Excentricita je většinou vyhodnocována pomocí různých signálů, jako jsou vibrace, magnetický tok a statorový proud. Vlivem smíšené excentricity obsahuje statorový proud následující frekvence:

$$f_{ex} = |\pm k(1-s)p_p f_1| \quad (5)$$

Frekvence související s excentricitou a překročením záběrného momentu na postranních pásmech proudu nejsou dostatečné pro diagnostiku. Model excentricity užívá přístup analytický i numerický s využitím konečných prvků.

Statická excentricita se většinou projevuje na postranních pásmech posunutých o synchronní otáčkovou frekvenci od síťové frekvence:

$$f_{stat_ex} = f_1 \pm \frac{f_1}{p_p} \quad (6)$$

Vedle toho se projevuje i na dvojnásobku síťové frekvence, ale to lze problematicky diagnostikovat, protože se jedná o 2. harmonickou síťové frekvence:

$$f_{sta_ex_2} = 2f_1 \quad (7)$$

Dynamická excentricita se projevuje na frekvenci:

$$f_{dyn_ex} = f_1 \pm (1-s)f_{syn} \quad (8)$$

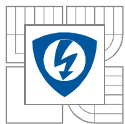
Obecně lze excentricitu vyjádřit vztahem:

$$f_{ex} = \left[(n_{rt} R \pm n_d) \frac{1-s}{p_p} n_s \right], \quad (9)$$

kde $n_{rt} = 1, 2, 3, 4, \dots$; pro statickou excentricitu je $n_d = 0$; pro dynamickou excentricitu $n_d = 1, 2, 3$; $n_s = 0, 1, 3, 5, 7, \dots$; a R je počet drážek motoru.

2.2.1.1.3 Porucha statorového vinutí

Nejčastějšími poruchami statoru jsou poruchy vinutí, zde může dojít k rozpojení vinutí, mezizávitovému (*turn-to-turn short circuit*) zkratu, fázovému zkratu anebo zkratu na kostru. Rozpojené vinutí může být způsobeno buď jejím mechanickým poškozením, poškozením izolace a prohořením mědi vlivem přetížení, možné je rovněž neodborné připojení motoru 230/400 do trojúhelníku na 400V. Měď se pak většinou karbonizuje, a jelikož je uhlík křehký, tak se buď obvod rozpojí, anebo zkratuje. Spálené vinutí je většinou lehké identifikovat pouhým čichem. Mezifázový zkrat spojuje různé fáze, zatímco zkrat na



kostru proráží celkovou izolaci a spojuje vinutí s kovovými částmi stroje, v obou případech již stroj není schopen normální funkce. Mezizávitový zkrat, propojuje části téhož vinutí, klesá moment motoru a je rozváženo symetrické pole, motor však ve většině případů dále funguje, a protože se vinutí zahřívá, je často tato porucha degenerativní, může vést až k proražení izolace a zkratu na kostru. Závadu lze v raném stádiu však jen těžko odhalit. Zkratům většinou předchází zhoršující se vlastnosti nebo nějaké nehody (časté je znečištění vinutí mechanicky drsnými částmi, vodivým materiálem, či zatopení vodou), což může buď vést k zničení, nebo zhoršení stavu izolace, zkratování obvodu nebo zhoršení odvodu tepla. Záznamem stavu motoru lze předcházet některým poruchám a odstraňovat přetrvávající příčiny při odstranění některých následků.

Jedním z klíčových projevů poruch statorového vinutí je skutečnost, že se motor stává nesymetrickou zátěží, tedy že součet fázových proudů není roven nule, což je možné jedině díky tomu, že určitý proud teče přes nulový vodič. Takovýto výsledek nesymetrie vytváří významné násobky 3. harmonické (3,6,9,...) ve spektru proudu, které v součtu fázových proudů vytvářejí stejnosměrnou složku, která svým magnetickým polem zatěžuje magnetický obvod i jiné části stroje.

Všeobecně je nutné počítat s následujícími *faktory namáhání statorového vinutí*:

Tepelné namáhání - Vzestup teploty o každých deset stupňů snižuje životnost izolace na polovinu (tepelné stárnutí) a ta je pak mnohem zranitelnější a citlivější na jiné vlivy, což může vést k poruše. Izolace ztrácí svou mechanickou a elektrickou pevnost, dielektričnost a více podléhá vlivům prostředí. Snížením provozních teplot nebo zvýšením stupně izolace lze tepelné stárnutí minimalizovat. Během rozběhu je proud 5-8 krát větší a proto při opakovaných rozbězích rychle roste teplota vinutí. Stejně tak nesymetrie napájení způsobuje nárůst teploty vinutí vlivem velkého proudu. To vše zvyšuje i provozní teploty, a proto musí být motor konstruován na teploty trvale vyšší a případně opatřen i vnějšími aktivním chlazením.

Elektrické namáhání - Na životnost izolace má vliv i napět'ové namáhání v motoru a přechodné napětí snižuje životnost vinutí. Předčasné poruchy mohou být způsobeny i kmitočtovými měniči, nahazováním a spadáváním jističů, proudových ochran, přepínáním kondenzátorů, trojfázovými poruchami, mezifázovými zkraty, zkraty na zem, nebo vícefázovými zkraty na zem.

Mechanické namáhání - Může být způsobeno střetem rotoru se státorem v důsledku defektu nebo vychýlení hřídele, či poruše ložisek. Narazí-li rotor do statoru když motor běží, je výsledkem uzemnění cívky statorové drážky, čímž vzniká nadměrné teplo v místě kontaktu. Dojde-li k nárazu během rozběhu, laminát prorazí izolaci cívky a uzemní ji, čímž může dojít k poruše vinutí. To může být způsobeno i uvolněnými šrouby a maticemi, lopatkou ventilátoru, či jiným cizím předmětem. Stator se pak přehřívá a selhává.

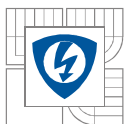
Namáhání prostředím, kontaminace - Přítomnost cizích předmětů může způsobit poruchu funkce motoru, jako poškození ložisek, proražení izolace vlivem snížení odvodu tepla. Poruchám statoru lze předejít vhodnou konstrukcí a pravidelnou údržbou - kontrolou nesousoosti a čištěním povrchu.

2.2.1.1.4 Porucha rotorových tyčí

Rotor ASM je většinou tvořený vinutím (kotvou) nakrátko. Toto klecové vinutí je symetrická vícefázová soustava, kde každá fáze je tvořena tyčí, anebo svazkem tyčí. Většinou je spojena do hvězdy a zkratována. Přeruší-li se tyč [5], [8] nebo dojde-li ke zvýšení jejího odporu, je jednak proud rozdělen mezi sousední tyče, čímž jsou více tepelně namáhány a za druhé dochází k rozvážení symetrické soustavy, což má vliv na vibrace a spektrum statorového proudu. Následkem je pak zvýšení teploty nepoškozené části vinutí, vznik parazitního momentu a zhoršení rozběhu. Do spektra proudu tedy pronikají posunutá pásma okolo základní harmonické f_1 nebo jejich násobků:

$$f_{rot_tyč} = v f_1 \pm 2s f_1 \quad (10)$$

Detekce a prognostika poruch rotoru je kritická pro průmyslové aplikace, ačkoli se týkají pouze 10 - 20 procent všech poruch ASM. K poškození rotorové tyče může dojít vlivem tepelného namáhání, elektromagnetických sil, elektromagnetického rušení, vibrací, odstředivých sil, namáhání prostředím, mechanického namáhání izolace, unavených dílů či poškozených ložisek. Může být způsobeno působením velkých sil a teplot v rotorové kleci, nebo tokem proudu poškozených tyčí. Většinou se vyskytuje mezi tyčemi a u zkratovacích kroužků. Jde o progresivní poruchu, která se šíří na sousední tyče. Lze ji však



zaznamenat jen pokud je kritická a oprava již není možná, a vede tedy ke zničení. Lze se setkat se dvěma typy klecí: litými a montovanými, montované se používají pro velké a speciální aplikace a lze je na rozdíl od litých opravit (vyměnit segment). Při proražení tyče dojde k nárůstu proudu o 50 procent u sousedních tyčí a tedy k jejich přetěžování. Hojně užívaná pro detekci je metoda *Motor Current Signature Analysis* (MCSA).

2.2.2 Vlivy okolního systému na zhoršenou funkci ASM

Vedle poruchy samotného motoru se můžeme setkat i s projevy mechanických poruch okolní soustavy a její vliv na ve spektru statorového proudu. V tomto případě se nejčastěji jedná o:

- **Vadné ustavení motoru:** – Nesprávným ustavením motoru vzhledem k poháněcímu zařízení vzniká nesouosost, vznikají pak deformační a třecí síly, jež mohou poškodit ložiska. Výrazná jsou postranní pásma posunutá o otáčkové frekvence f_i od síťové frekvence:

$$f_i = \frac{n_n}{60} + s f_1 + i \frac{n_n}{60}, \quad (11)$$

kde $i=0,1,2,\dots,\frac{f_1 + \frac{n_s}{60}}{\frac{n_s}{60}}$, n_s jsou synchronní otáčky.

Je však třeba být obezřetný, protože při malém zatížení je možné zaměnit tyto stopy ve spektru za pásma dané synchronními otáčkami točivého magnetického pole:

$$f_s = \frac{n_s p}{60} = \frac{60 f_1}{60 p} = \frac{f_1}{p}. \quad (12)$$

- **Vada převodovky:** – Je-li ASM spojen s převodovkou, mohou se ve spektru vyskytovat frekvence odpovídající výstupním otáčkám převodového stupně, případně jednotlivých převodových stupňů. Případně i zátěž nebo břemeno, které je na ose za převodovkou, může mít vliv na spektrum, zvláště pokud obsahuje nějaké nesymetrie. Z tohoto důvodu lze jen těžko provádět analýzu spektra u nerovnoměrného zatížení, jakým je například kliková hřídel.

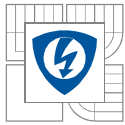
- **Torzní kmity:** – V praxi se často setkáváme, s tím že ke konstantnímu točivému poli se přičítají pulzační momenty, ty mohou být způsobeny chybným ustavením motoru vůči poháněnému zařízení, ale i samotným poháněným strojem. Vznikají pak torzní kmity, které vytvářejí postranní pásma posunutá o dvojnásobek otáčkové frekvence motoru. Torzní kmity pak rostou se zvětšujícím se úhlem rovnoběžnosti hřídele, se zvětšujícím se momentem setrvačnosti hnaného zařízení a v podkritické oblasti s rostoucími otáčkami.

2.2.2.1 Preventivní údržba jako prevence proti poruchám

Každá snaha o udržování dobrého stavu stroje musí respektovat vlivy způsobující namáhání základních částí motoru [11]:

	tepelné	elektrické/ dielektrické	mechanické	dynamické	stříhem	vibrace / šok	reziduální	elektro- magnetické	prostředím
Vinutí statoru	1	1	1			1		1	1
Rotor	1	1	1	1		1		1	1
Ložiska	1	1	1	1		1		1	1
Hřídel	1		1	1	1	1	1	1	1

Tabulka 1. – Vlivy na namáhání základních částí motoru.



Údržba se obvykle dělí [11] na čtyři hlavní aktivity:

1) **Opravná údržba:** – Po selhání se diagnostikuje a vyměňuje poškozený díl. Nevýhodou je, že díl je často nedostupný, dochází k nepředpokládanému přerušení výroby a ekonomickým ztrátám a kvůli zhoršujícímu se stavu stroje i k nárůstu spotřeby (nárůst proudu a pokles momentu). Životnost stroje je mnohem menší.

2) **Preventivní údržba:** – Preventivně se odstraňují nevyhovující podmínky, čímž se snižuje počet nápravných opatření. Postupuje se podle plánu, pravidelně, aby se zvýšila spolehlivost stroje a snížily se náklady. Je možné volit mezi kontinuálním monitorováním, periodickým měřením a prediktivním přístupem.

3) **Prediktivní údržba:** – Může být podoblastí preventivní údržby, ale má i svá specifika: využívá on-line neinvazivní přístupy (provozní diagnostika), eliminuje opravnou údržbu, nezohledňuje se životnost konstrukčních částí, lze využívat i off-line techniky.

4) **Systematická údržba:** – Nahrazování komponentů zařízení nebo zařízení jako celku.

Z hlediska pravidelné preventivní údržby je vhodné provádět základní (mechanickou a vizuální) kontrolu a v případě podezření některé jednodušší elektrické zkoušky. Nejde však ještě o systematické diagnostické metody, které jsou komplexní a tedy i ekonomicky a časově náročné.

Kontroluje se tedy fyzický, mechanický a elektrický stav stroje:

- kontrola úniku a rozvodů oleje (chladicího, hydraulického i mazacího) nebo vody, znečištění ventilace a stav ventilátorů;
- kontrola nenormálních zvuků, pachů a měření vibrací;
- kontrola upevnění motoru (koroze a utažení šroubů, hladké dosedací plochy), stav spojky;
- vyrovnaní stroje a dodržování vůlí;
- kontrola uzemnění, poškození izolace kabelů a stav svorkovnice;
- kontrola a trendy zahřívání částí při plném zatížení stroje;
- kontrola mazání (stav, typ a množství oleje a lubrikantu) a stavu ložisek (vůle, těsnění, chod, ložiskové proudy);
- kontrola uložení a souososti hřídele, plynulost a volnost otáčení rotoru;
- kontrola rušení, kvalita napájení, měření rozptylového magnetického pole;
- měření kontinuity, odporu, izolace (rázová vlna) a teploty vinutí.

Odhalené nedostatky je nutno podle akutnosti odstranit.

2.3 Diagnostika ASM

2.3.1 Specifika diagnostiky ASM

2.3.1.1 Rozdělení diagnostických metod [5]

I když je ASM provázaný systém, lze konkrétní diagnostické metody dělit:

- podle povahy poruchy, na kterou jsou primárně určeny: statorové a rotorové,
- podle zkoumaných vlastností: mechanické a elektrické. Je nutné mít na zřeteli, že tyto vlastnosti nejsou shodné s diagnostickými signály. Jako velká výhoda se pak ukazuje skutečnost, že různými diagnostickými signály lze zkoumat různé vlastnosti a různě pak i jednotlivé výsledky „fenomenologicky“ interpretovat.

Nejužívanějšími **diagnostickými signály** v případě ASM jsou: napájecí napětí, statorový proud, vnější elektromagnetické pole (rozptylový tok), teplota, vibrace, výboj, chemické složení (chladicího vzduchu, ozonu).

- **Diagnostika statorových vad** se provádí metodami:

a) *Vnitřní vyhledávací cívka* (search coil) nebo vnější senzor magnetického toku je použitelný pouze u velkých motorů. Využívá se skutečnosti, že vlivem asymetrie statoru se zvýší axiální magnetický tok. Při zkratu ve vinutí se zvyšuje amplituda na drážkové frekvenci f_d dané rotační frekvencí f_r , počtem tyčí rotoru N_r a napájecí frekvencí f_1 :

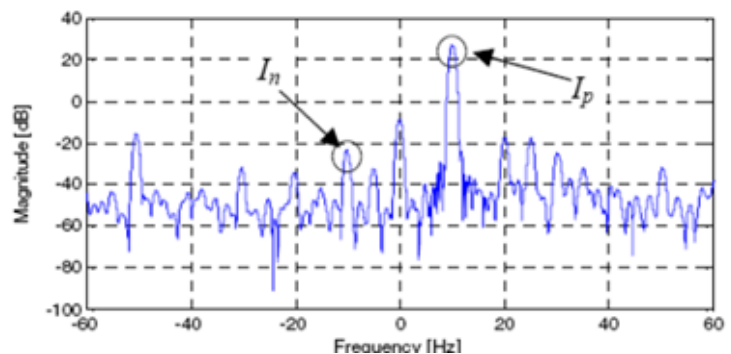
$$f_{dr} = N_r(1 - s \pm k_r)f_r = N_r f_r \pm f_1 \quad (13)$$

b) *Analýza orbitů prostorového vektoru*: Jedná se o přibližnou metodu, ve které je 3f systém proudů vyjádřen prostorovým komplexním vektorem:

$$\mathbf{I} = K_s(i_a + \mathbf{a}i_b + \mathbf{a}^2i_c) = i_d + j i_q \quad (14)$$

kde $\mathbf{a} = e^{j2\pi/3} = \frac{1}{2} + \frac{j\sqrt{3}}{2}$, $K_s = 1$. Objeví-li se v zobrazení proudů na komplexní rovině $i_d, j i_q$ kružnice, je vše v pořádku, čím je větší elipsa, tím je vada závažnější, až u šestiúhelníku jde o statorovou a rotorovou vadu; přičemž se využívá pásmo do 200 Hz

c) *Analýza dopředné a zpětné složky rotorového vektoru*: $\mathbf{I} = K_s(i_a + \mathbf{a}i_b + \mathbf{a}^2i_c) = i_d + j i_q$, kde $\mathbf{a} = e^{j2\pi/3}$ a $K_s = 2/3$. Proud je sečten, projde dolní propustí, dále je vektorově zobrazen, transformován pomocí Fourierovy transformace a zobrazen na časově-frekvenční ose jako dopředná a zpětná složka komplexního vektoru. Čím je zpětná složka (I_n) komplexního vektoru větší, tím větší je pravděpodobnost, že se jedná o statorovou vadu, protože ta by se měla blížit nule.



Obr. 1. – Příklad magnitud.

d) *Analýza zpětné impedance*: Vyhodnocuje se magnituda, spektrum komplexního prostorového vektoru proudu a napětí, přičemž při statorové vadě se několikanásobně zvětší zpětná složka proudu, tedy zpětná impedance se sníží.

e) Další metody: *měření fázových proudů* (použitelné u větších poruch), *analýza částečných výbojů* (u VN motorů, namáhání izolace, výboje nad 1,5kV); *měření oteplení* (termočlánky ve vinutí, nebo termovize); *umělé neuronové sítě a analýza pomocí konečných prvků* (vychází se z modelu poruchy stroje).



- Mezi hlavní diagnostické metody **rotorových vad** patří:

a) *Signaturní (podpisová) analýza proudu motoru (MCSA)*: Zkoumáním spektra statorového proudu se snaží identifikovat *podpisy* (signatury) konkrétních typů poruch. Experimentálně bylo zmapováno [5], [10], [8], [11], několik signatur, jejichž výskyt se zvýšenou mírou pravděpodobnosti koreloval s konkrétními nedostatky projevujícími se specifickými disbalancemi jinak symetrického stroje. Nejčastěji se jedná o postranní pásma okolo harmonických frekvencí, jež poukazují na poruchu rotorových tyčí, nesymetrii zátěže a excentricitu jako takovou.

b) *Spojená časově frekvenční analýza (JTFA) přechodových stavů motoru*: Detekuje se časově – frekvenční vývoj harmonických ve statorovém proudu při rozběhu motoru. Používá se buď *Krátkodobá Fourierova transformace (STFT)*, *Wiegner – Villeho distribuce*, *Spojité vlnové transformace* (analyzují se spektrální postranní složky okolo f_1) anebo *Diskrétní vlnové transformace* (pomocí Mallatova algoritmu (exponenciální banky zrcadlových filtrů) se například vyhodnocuje přerušovanost rozběhového proudu). Rovněž u této metody je problém s kvantifikací indikátoru poruchy a především se schopností pojímat v jednom okamžiku dostatečné množství vzorků najednou.

c) *Externí vyhledávací cívka, analýza vibrací*: Na motory velkých výkonů se umísťuje externí cívka a vyhodnocuje se na ní indukované napětí, přičemž průběh vibrací by měl být symetrický, jinak se jedná o přerušené rotorové tyče.

d) *Analýza vibrací*: Velice dobře vypracovaná metoda, jsou známy frekvence jednotlivých poruch, vycházející ze znalosti motoru, ložisek a jejich částí, zátěže. Využívá se různých druhů filtrace. Ohnutá hřídel a dynamická excentricita se projevuje vibracemi na skluzové frekvenci rotoru. Některé vady se lépe diagnostikují elektrickými veličinami (mechanická nesymetrie narušuje symetrii vzduchové mezery, toku, statorového proudu), a proto jsou vibrace využívány jako doplňková metoda pro potvrzení spektrální analýzy statorového proudu, která má povětšinou jen pravděpodobnostní charakter.

e) Další metody: *videňská monitorovací metoda (VMM)*, *analýza krouticího momentu*, *analýza výkonového spektra a neuronové sítě*.

Nejčastěji je publikována diagnostika rotorových vad, přičemž více se u ní využívá různých metod analýzy signálů, než pouze jediná. U všech příčin lze poruchy vystopovat na několika veličinách, které je nutné na motoru diagnostikovat a sice – *elektrických*: proud, napětí, výkon a tedy jejich velikost, tvar, spektrum vůči vstupním veličinám,

- *mechanických*: vibrace lze vyhodnocovat jako výchylku, rychlost anebo zrychlení, přičemž lze tyto veličiny mezi sebou převádět a spektrálně je analyzovat, protože většinou samotná intenzita chvění moc informací nepředá.

2.3.1.1.1 Tři přístupy k diagnostice ASM

Diagnostické procedury ASM lze rozdělit do tří skupin [7]: 1) na základě modelu; 2) na základě signálu; 3) na základě dat.

1) Na základě **modelu** se diagnóza definuje na asymetrickém ASM, jehož model je používán k předpovědi chybových signatur (*podpisů*). Rozdíl mezi měřenou a simulovanou signaturou je použit jako chybový detektor.

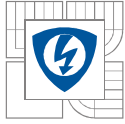
2) Na základě **signálu** se diagnostikují signatury z digitálních signálů vzorkovaných z aktuálního stroje a monitorované procesorem. Data se normalizují a izolují se chybové znaky. Na základě signálu lze diagnostiku rozdělit ještě na spektrální odhadovací techniky (*Spectral estimation techniques SET*), techniky časové domény a odhad časově-frekvenční.

3) Při diagnostice na základě **dat** není vyžadována znalost parametrů a modelu motoru. Spoléhá se pouze na zpracovávací a shlukovací techniky:

3a) *Spectral estimatin* - Spektrální odhad užívá bez parametrické (*non-parametric method*) a parametrické vysoce rozlišovací metody (*high resolutions method*).

-*Bezparametrické* metody jsou založeny na běžné Fourierově analýze, analýze filtrující optimální pásmové propusti; neřeší však limity klasické Fourierovy analýzy.

-*Parametrické* metody vycházejí z odhadu lineárního neměnného časového systému rušení od autoregresivního proměnného modelu průměrných hodnot. Mají zlepšit výkonnost,



ačkoli jsou postiženy mírou šumu (*Signal-to-noise ratio* - SNR). Vysoce rozlišovací metody mohou detekovat i nízký poměr šumu a signálu. Nedávno byly zavedeny aplikace vícenásobné klasifikace signálů (*multiple signal classification* - MUSIC). Metody MUSIC a zoomovací metody se propojují, aby zlepšily detekci většího množství frekvencí v dané šířce pásma.

3b) Analýza časové oblasti - Je silným nástrojem pro diagnostiku třífázové kotvy nakrátko. V oscilacích elektrického výkonu v časové oblasti se mapuje diskrétní průběh úhlové oblasti. Data jsou klastrována užitím extrakcí na zprůměrované vzory sloužící jako ukazatelé mechanické nevyváženosti. Může sledovat základní frekvence, skluz a vypočítat diagnostický index bez spektrální analýzy.

3c) Časově-frekvenční analýzy - se skládají z 3-D časové, frekvenční a amplitudové reprezentace signálu, která je svou povahou vhodná na indikaci přechodových jevů. [7]

2.3.1.2 Diagnostické veličiny

Techniky monitorování poruch užívají tyto charakteristiky soustavy [7]:

a) **Teplota** - Teplota statorového vinutí je měřena teplotním čidlem ve vinutí motoru, což může být monitorováno užitím pokročilých metod *Thermal Step Method* (TSM) a *Thermally stimulated discharge currents* (TSDC), které vycházejí ze souvislosti elektrického pole a tepelného kmitání částic v dielektriku. Kombinací obou metod lze predikovat životnost izolace.

b) **Magnetický tok** - Abnormální harmonické statorového proudu jsou funkcí změn způsobených magnetomotorickou silou reprezentující vzduchovou mezeru. Proto každé zkreslení ve vzduchové mezeře, způsobuje změnu hustoty toku způsobenou statorovým defektem tvořící axiální tok na hřídeli. Může nám pomoci nalézt zkratky ve statorovém vinutí.

c) **Vibrace** - Vibrace je akcelerace, která se mění se čtvercem frekvence. Změny ve spektru pak mají konkrétní výpovědní hodnotu. Zkoumá se vibrace statorové kostry, vytvořené poruchami vinutí, nesymetrií napájení a jednotlivých fází.

d) **Výkon** - Užitím okamžitého výkonu máme k dispozici parametr nesoucí více informací, než jakým je proud. Jde o snímání nezávislé na synchronních otáčkách a rušení.

e) **Proud** - *Motor current signature analysis* je výsledkem spektrální analýzy statorového proudu korelující s počátkem poruchy motoru a frekvenčního měniče. MCSA vyžaduje určení skluzu, ale garantuje určitou výpovědní hodnotu. Statorový proud je vzorkován až po ustáleném stavu. Změny otáček narušují analýzu. U velkých generátorů a turbín se používá *Transient motor current signature analysis* (TMCSA), která provádí zkoumání při změnách rychlosti - rozběhu.

f) **Indukované napětí** - Napětí na hřídeli indukované do statoru je sice důležité, ale nespolehlivé pro diagnostiku.

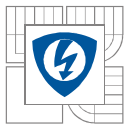
g) **Okamžitá úhlová rychlost** - V podobě vibrací na statoru slouží k diagnostice asymetrie.

h) **Tok ve vzduchové mezeře** - U kvalitního motoru má harmonická složka momentu ve vzduchové mezeře nulovou frekvenci. Nesymetrie pak vytváří složky o frekvenci -2ω . Tento moment je vytvářen tokem vázaným na rotaci stroje. Dvojitá základní frekvence toku indikuje mezeru ve statorovém vinutí nebo napětí.

f) **Částečné výboje** - On-line monitorování částečných výbojů (PD) jako důsledků poškození izolace slouží k identifikaci nedokonalosti izolace, přehřívání. Na monitorování částečných výbojů se používají speciální sensory.

j) **Nárůst proudu** - Do dvou fází jsou puštěny dvě identické vysokonapěťové špičky o veliké frekvenci a třetí je uzemněna. Odraz impulzu je porovnáván n a osciloskopu jako identifikace poruchy mezi vinutími, cívkami a zemí. Jde o prediktivní metodu, kterou lze použít na mezizávitové zkratky.

k) **Analýza plynu** - Zhoršená izolace uvnitř motoru produkuje karbonový monofilový plyn, který je detekován infračervenou absorpcí.



2.3.2 Analýza spektra proudu

2.3.2.1 Diagnostika statorového proudu

Podle [12] lze rozbořením frekvenčních spekter generovaných motorem identifikovat širokou škálu poruch - mechanických, elektrických i magnetických. Jde o funkční diagnostiku využívající statorový proud při zachování provozu motoru. Není třeba vnějšího signálu měřicí soustavy. Například k odlišení mechanických poruch od elektrických je dobré měřit rovněž i vibrace, čímž lze ve spektru nalézt dominantní frekvence, jež odhalí, zda je příčina spíše elektrická nebo mechanická. Proudové spektrum má *dominantní první harmonickou 50Hz* a její *násobky*, přičemž dominantnější jsou ty *liché* - které mohou být způsobeny buď diskretním rozložením vinutí do drážek, změnou vodivosti vzduchové mezery vlivem drážkování, nebo v neposlední řadě i nesinusovým napájecím napětím. U *symetrického napájení* by se ve spektru *neměla objevit příliš dominantní 3. harmonická a její násobky (9,15...)*. Vyšší harmonické by mohlo způsobit drážkování rotoru i statoru.

Proud může být snímán buď pomocí bočnicku (odděleného izolovaným operačním zesilovačem (např. HCPL-7800), který oddělí potenciál fázového vodiče od uzemněné svorky osciloskopu, nebo snímaného diferenční VN sondou), nebo kompenzovanou Hallovou sondou, v krajních případech i precizně navrženou Rogowského cívkou, či měřicím transformátorem (jejichž linearita a přesnost může být teoreticky zaručena až od cca 10 Hz). Signál je následně přiveden na analyzátor nebo osciloskop. Obvykle se zohledňuje rozdíl vůči první harmonické a to amplitudový odstup v logaritmické stupnici větší než o 30 – 40dB. Nutno mít na zřeteli tvar napětí samotného, ze kterého se proudové spektrum vytváří. Komplikací může být pulzně šířková modulace regulovaná na konstantní moment, která povahu napětí ještě vlivem filtrace motoru jako indukční zátěže tvarově deformuje.

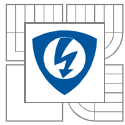
Při analýze statické excentricity je nutné zohlednit, že šířka vzduchové mezery je závislá na poloze a ne na čase - podle toho lze usoudit, že motor se otáčí synchronní rychlostí, přičemž vzduchová mezera je konstantní. Tato synchronní rychlost je dána frekvencí napájení a počtem pólových dvojic. Při **statické excentricitě** dochází k vyosení osy rotoru vůči ose statoru, tím dochází ke změnám vzduchové mezery, čímž se mění interakce magnetických polí statoru a rotoru, což lze pozorovat na *postranních pásmech*, které se posouvají *od napájecí frekvence o frekvenci otáček*, protože vzduchová mezera se stává funkcí nejen polohy ale i času.

Porucha rotorových tyčí představuje specifický problém: Tyče uložené v drážkách reprezentují mnohofázovou soustavu zapojenou do hvězdy, kde každá tyč (resp. její svazek) tvoří jednu fázi. Napětí jednotlivých tyčí pak tvoří symetrický vícefázový systém proudu, který vlivem zvětšení odporu jedné tyče poruší symetrii magnetického pole. To způsobí nesymetrii ve stroji a deformaci magnetického pole ve vzduchové mezeře, což se projevuje elektrickými, elektromechanickými, akustickými a tepelnými změnami. Poškození tyčí způsobuje: zvýšení oteplení nepoškozené části vinutí, vznik parazitních momentů a zhoršení rozběhových podmínek.

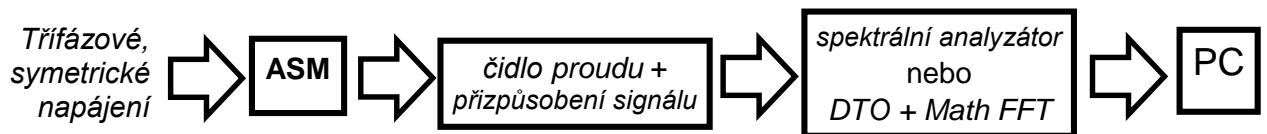
Je nutné zohledňovat, že spektrální změny nemusejí být způsobeny pouze samotným motorem, ale i soustavou, které je motor součástí, a tedy i špatným ustavením motoru nebo převodovky (což způsobuje vznik nepatrných torzních kmitů v hlavním momentu).

2.3.2.2 On-line diagnostika elektrických strojů točivých [13]

Aktuální stav asynchronního stroje je závislý na stavu jeho částí: izolačního systému, vinutí, magnetického obvodu a mechanického stavu (ložisek). Diagnostika se pak snaží nalézt vztah mezi vlastnostmi těchto částí a měřitelnými veličinami, přičemž je kladen důraz na rozpoznatelnost, zda jde o změnu stavu trvalou nebo vratnou. Nejvýhodnější je funkční diagnostika, jež měří veličiny generované strojem při provozu, a tedy nepotřebuje testovací signály. Může být tedy prováděna kontinuálně a současně provádět monitoring v on-line systémech. Zkoumat lze elektrické, magnetické a mechanické veličiny do stroje vstupující (i, u) a rovněž ze stroje vystupující (rozptylový tok, vibrace, hřidelové napětí). Průběh těchto veličin je ovlivněn stavem stroje (díky změnám magnetického obvodu – kotva, vzduchová mezera, ...), a tedy vedle jeho energetického toku s sebou nese i diagnostické signály (vlivem nesymetrie, poškozeného vinutí nebo izolace, ustavení stroje, stav ložisek, výrobní vady). Vlivem nelinearity



magnetického obvodu a prostorové proměnlivosti vzduchové mezery není průběh elektrických a magnetických veličin sinusový, i přestože zdroj energie takový je. Spektrální analýzou pomocí Fourierovy transformace pak lze rozložit takovýto signál na spektrum jednotlivých složek. Nejdostupnější se jeví zkoumání napájecího proudu pomocí vhodných sond. Sinusový proud je principiálně deformován vyššími harmonickými, subharmonickými, jež jsou způsobeny diskretním drážkováním i vzniklou nesymetrií, která je vytvořena vadou nebo závadou stroje a může vést k poruše. Spektrální analýza je většinou prováděna ve spektrálních analyzátoch nebo v digitálních osciloskopech, přičemž samotný Fourierův rozklad se získá výpočtem z naměřených hodnot.



Obr. 2. – Principiální schéma on-line vyhodnocování spektra statorového proudu.

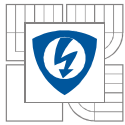
Při narušení symetrie se tedy ve spektru objevuje nová složka. Je-li proud závislý na magnetickém obvodu, pak jakákoliv prostorová, časová a momentová změna zanechá stopy v jeho spektru jakožto oscilace, protože změny se neprojevují skokově, ale jako vlny. Každá specifická nesymetrie se tedy zapisuje do napájecího proudu svou rychlostí otáčení, čímž se liší od rychlosti synchronní. Takovéto oscilace lze odhalit buď Fourierovou transformací provozního proudu, anebo filtrací rozběhového proudu, která s sebou však nese problém s vzorkováním a výpočtem v limitních okamžicích. Jakákoli nesymetrie vlivem mechanického otáčení tedy způsobuje disharmonii magnetického obvodu, který se projevuje v napájecím proudu, protože magnetický obvod ASM je primárně navržen jako symetrický pro všechny tři fáze a jím odpovídající magnetické obvody. Vzniklé čáry nebo pásma ve spektru jsou pak charakteristické pro konkrétní druh poruchy. Sledování spektra napájecího proudu odhaluje především poruchu rotorových tyčí, excentricitu rotoru a chybné ustavení stroje.

2.3.2.3 Signaturní analýza

Srovnávání [7], [10] analýzy vibrací, ESA (MCSA), rozšířené P transformace vektoru (EPVA), a signaturní analýzou okamžitého proudu (IPSA) je stále předmětem sporu. Někteří se domnívají, že každá z metod má vypověditelnost pouze pro specifické chyby, druzí tvrdí větší univerzálnost každé z nich, pravdou ale zůstává, že každá se hodí více na určité problémy než jiná:

<i>problém</i>	<i>vhodná metoda</i>	<i>středně vhodná</i>	<i>lze použít</i>
Napájení	Analýza výkonu	EPVA	
Mechanická disbalance a excentricita	MCSA a vibrace	EPVA	
Porucha izolace	Částečné výboje		EPVA
Statorová elektrická disbalance	EPVA	MCSA	Analýza výkonu
Porucha rotorových tyčí	MCSA	EPVA, IPSA	
Porucha ložisek	Vibrace	Analýza zvlnění proudu	MCSA, EPVA, IPSA
Porucha převodovky a zatížení	Vibrace	MCSA, EPVA, IPSA	

Tabulka 2. – Tabulka určení metod pro konkrétní problémy.



2.3.2.3.1 Motor Current Signature Analysis (MCSA)

V MCSA [8] je sledováno spektrum napájecího harmonického statorového proudu snímaného proudovými kleštěmi, na kterých se vytváří napěťový signál. Porovnávají se amplitudy vůči dominantní první harmonické a jejím násobkům. Poškozené rotorové tyče vytvoří nesymetrický magnetický tok v mezeře, a tedy postranní pásma ve spektru okolo první harmonické v rozsahu 45-55 Hz. Je-li odstup těchto pásem 55-60 dB jsou tyče nejspíše v pořádku, je-li 45-50 je pravděpodobné, že jsou poškozené a u odstupu menšího jak 40 dB je vysoká pravděpodobnost, že jsou tyče poškozené.

Vedle MCSA se u analýzy generátorů provádí analogická Napěťová signaturní analýza (GVSA), vedle těchto dvou se můžeme setkat i se Signaturní analýzou okamžitého výkonu (IPSA).

Požadovaná frekvenční odezva u MCSA je obvykle 5 kHz. Tímto způsobem šířka pásma snímačů musí být nejméně 10 kHz, což ale pro osciloskop znamená, že by měl mít šířku pásma alespoň pětinasobnou. Obecně se ve výkonové elektronice počítá s rozsahem alespoň 100 kHz, jak pro snímače, tak pro osciloskop.

MCSA analyzuje odebíraný statorový proud, v němž je vlivem nesymetrie rotoru generována složka o frekvenci $(1-2s)f$, když rotuje konstantní setrvačnou rychlostí. Proti této složce se objeví složka $(1+2s)f$. Tyto složky jsou obvykle rozloženy v okolí základní frekvence a nazývají se postranní pásma:

$$f_{sh} = (1 \pm 2s)f \quad (15)$$

Některými je zpochybňována vypovídací schopnost této metody k určení poruch rotoru a uchylují se tedy k *Transient motor current signature analysis*, která zkoumá proud při přechodném provozu, čímž byla zavedena analýza rozběhového proudu.

Většinou se postupuje tak že je bezkontaktně snímán proud, jehož úroveň je přizpůsobena a dále buď zobrazen na osciloskopu s funkcí FFT, nebo přímo na spektrálním analyzátoru, a následně převeden do PC. Je nutno zohledňovat, že získání signálu pomocí FFT zahrnuje tyto tři obtíže:

- Frekvenční rozsah – frekvenční odezvy jsou typicky 5kHz, což znamená, že frekvenční rozsah musí být alespoň 10 KHz.
- Nyquistův teorém – k rekonstrukci signálu bez ztráty informace je třeba vzorkovat aspoň s dvojnásobným kmitočtem než je maximální frekvence signálu. V praxi to znamená použít desetinásobek maximální frekvence, který zaručuje excelentní přesnost.
- Rozlišení – rozlišení spektrálních čar, distance mezi dvěma musí být:

$$d_f = f_s/N, \quad (16)$$

kde d_f je spektrální rozestup, f_s samplovací frekvence a N počet vzorků.

Frekvence indukovaného proudu na rotoru je funkce frekvence a skluzu. V provozu bez zátěže se rotor otáčí rychlostí blízkou synchronní. V tomto případě by měl být motor schopný překonat pouze tření a ventilaci. Skluzové otáčky:

$$n_{skluz} = n_s - n_r \quad (17)$$

Se zátěží se snižuje n_{rot} a zvyšuje n_s , čímž se zvyšuje i proud, který může vytvořit větší moment. Frekvence v rotoru je nastavena na frekvenci skluzu a tedy:

$$f_2 = (f_s - f_r)p_p \quad (18)$$

Pro MCSA je důležité, že frekvence je funkcí skluzu.

MCSA zkoumá *podpis* (signature) motoru do svého proudu, *podpisem* motoru je tedy míněno frekvenční spektrum napájecího proudu, které je odlišné od nepoškozeného motoru.

2.3.2.3.1.1 Diagnostikované frekvence u MCSA

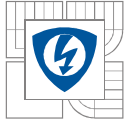
- Přerušené rotorové tyče se projevují na levé a pravé složce frekvence:

$$f_{rt} = (1 \pm ks)f_1 = f_1 \pm 2ksf_1, \quad (19)$$

kde k je 1., 2., 3. harmonická a $2sf_1$ je skluz v procentech – skluzová pólová frekvence 0-7 Hz.

- Vlivem interakce časových harmonických (neharmonický průběh napětí) a prostorových harmonických (diskrétní rozložení vodičů v drážkách) se ve spektru statorového proudu objeví hlavně levé postranní složky a pravé jsou potlačeny. Nejčastěji se projevuje kolem 5. a 7. harmonické statorového proudu:

$$f_{rt2} = k_1f_1 \pm k_22sf_1, \quad (20)$$



kde $k_1 = 1,3,5$, $k_2=1,2,3$.

- Dynamická a kombinovaná excentricita se projevuje buď okolo napájecí frekvence:

$$f_{ex} = f_1 \pm f_r = f_1 \pm \frac{f_1}{p_p} \quad (21)$$

(kde p_p je počet pólových dvojic a tedy u 6 pólových motorů je $f_r \sim 16$ Hz), nebo okolo hlavní drážkové frekvence

$$f_{ex2} = (k_1 f_1 n_{rb} + f_1) \pm f_r \quad (22)$$

kde $k=1$ a n_{rb} je počet rotorových tyčí, anebo okolo dvojnásobku drážkové frekvence f_{psl} při $k=2$. Kombinovaná excentricita se projevuje zvýšenými hodnotami na drážkové frekvenci a modulací rotačního kmitočtu.

2.3.2.4 On-line sledování rozběhu stroje

Rozběhová zkouška [13], v jejímž průběhu se sleduje napájecí proud, se jeví jako citlivý indikátor vzniku nesymetrie v rotoru, která je nejčastěji způsobena nesymetrií některé z tyčí klece. Nutnou podmínkou však je, aby rozběh trval alespoň 2s a šlo o přímý rozběh (bez softstartéru) ze sítě 50 Hz, tedy musí jít o harmonické napájení a ne napájení z frekvenčního měniče. Rovněž nesmí jít o motory zatížené proměnným momentem (např. kliková hřídel). Hlavním problémem se v praxi ukazuje předpoklad symetrie, protože ve skutečnosti nejde o symetrický obvod a například u synchronního stroje s asynchronním rozběhem, který není principiálně symetrický, odhalí metoda poruchu, i když stroj je v pořádku. Řešením se pak jeví srovnávací on-line diagnostika, která porovnává výsledky stroje v zaručeně bezvadném stavu a následně je při každém rozběhu porovnává. Opakuje-li se projev změny stavu stroje, je stroj vyhodnocen jako poruchový. Čímž lze odhalit i porušené tyče v zárodku a nedochází pak k poškození dalších tyčí (blízké tyče jsou vlivem poruchy přetěžovány). Vedle toho se ukazuje problematická i samotná citlivost metody, protože ta je samozřejmě různá, obsahuje-li rotor malý nebo velký počet tyčí, protože u velkého počtu se změna málo projeví. Všeobecně je ale vždy vhodnější sledovat trendy, než klást důraz na aktuální projevy.

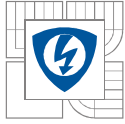
Proud je snímán během běžného rozběhu a po odfiltrování první harmonické, v praxi nad 45 Hz, buď pomocí analogových filtrů (signálu z čidla) nebo digitálních filtrů (digitalizovaného signálu). Při poruše rotoru pak vznikají zákmity před a po dosažení poloviny jmenovitých otáček. Výhodou oproti sledování spektra je možnost sledování dvouklecového stroje a stroje synchronního s asynchronním rozběhem.

Takováto rozběhová metoda (v systému Altonex) je týmem Ing. Bernata používána v přečerpávací elektrárně v Dalešicích. Protože se jedná o synchronní stroj, je zde problém s užitím frekvenční analýzy a zase naopak stroj nelze ustálit v asynchronním chodu, protože jde o poruchový stav. Vyhodnocují se trendy maximální amplitudy a efektivní hodnoty zákmitů. Proud je snímán čidlem LEM a filtrace se provádí digitálně matematickou filtrací po digitalizaci.

2.3.3 Analýza rozptylového magnetického pole [14]

V okolí každého elektrického stroje je rozptylové magnetické pole. Jeho změřením lze identifikovat možnou závadu. Vlivem nepřesností, nebo poruch vznikají nesymetrie v magnetickém obvodu stroje a vznikají tím i vhodné diagnostické signály. Jelikož moment točivého elektrického stroje závisí především na vzduchové mezeře, je velká část diagnostiky elektrických strojů zaměřena právě na vzduchovou mezeru. To s sebou ale nese mnoho úskalí v oblasti kvantifikace způsobených existencí více vinutí, proměnlivostí vzduchové mezery nejen v prostoru (statická nesymetrie), ale i v čase (dynamická nesymetrie) a nakonec i magnetickou nelinearitou použitých materiálů pro magnetický obvod. Zabýváme-li se diagnostikou okolního rozptylového magnetického pole, zkoumáme v podstatě netokotvornou složku magnetického toku.

Jelikož analýzou rozptylového toku lze určit všechny závady samotného ASM, které lze určit i analýzou statorového proudu (rotorová nesymetrie, vadné ustavení stroje, poruchy vinutí, mechanické poškození motoru, chybné připojení převodovky), je tato metoda vhodná jako doplňková. Stejně tak lze i



sledovat změnu magnetického pole na zátěži a vliv magnetického pole na okolí, jež je především důležité k identifikaci možného rušení snímačů, čidel a logických obvodů.

Velkou výhodou je možnost sledování stroje on-line a bezkontaktně, což má veliký význam ekonomický i bezpečnostní. Pro určení poruchy podle povahy spektra platí stejná pravidla jako u spektra proudu.

2.3.4 Metody identifikace mezizávitového zkratu

Mezizávitový zkrat se většinou identifikuje čtyřmi rozdílnými modely: 1) analýza magnetomotorické síly, 2) analýza konečnými prvky; 3) analýza funkce vinutí a 4) analýza dynamické reluktanční sítě.

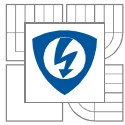
Abnormální frekvence ve statorovém proudu jsou funkcemi řady proměnných v důsledku magnetomotorické síly rozdělené ve vzduchové mezeře. Ty mohou být vytvořeny nezávisle na řídicím systému, nebo měniči a diagnostikovány on-line. Proud tekoucí mezizávitovým zkratem vytváří opačně orientované magnetomotorické napětí a snižuje tím velikost magnetomotorického napětí jedné fáze. Proto složka magnetického toku v mezeře indukuje harmonickou složku proudu ve vinutí o velikosti

$$f_s = \left(\frac{n}{p} (1 - s) \pm k \right) f_1 \quad (23)$$

kde p je číslo pólového páru, $n=1,2,3,..$ a $k=1,3,5,..$

Metoda dynamické reluktanční sítě slouží k odhadu času do selhání stroje, dojde-li ke zkratu. Nejhorší případ je, je-li číslo zkratu malé, běh pak trvá jen několik sekund.

Nejvhodnější je komparace všech čtyř přístupů. Jednoduchou, ale účinnou metodou je kontinuální monitorování negativní sekvence statorového proudu, který pomáhá detekovat elektrickou a magnetickou nesymetrii, asymetrii napájení, nasycení vinutí a dokonce i excentricitu. Může však mít mnoho příčin a není tedy jednoznačný. Aby se dosáhlo jednoznačnějších výsledků je snímán proud i napětí a je dopočítána negativní sekvence impedance, která by měla být konstantní, ale při poruše se mění. Měřit lze i jednoduše, zda platí, že součet proudů je roven nule, což může být realizováno stejně jako měření spektra na Obr. 2. s tím rozdílem, že snímán není proud jedné fáze, ale součet tří fázových proudů. Použijeme-li jedno čidlo na tři fáze místo, třech čidel a matematického součtu, odstraníme tím potíže se synchronizací a snímáním tří hodnot v identický okamžik. Jednou z nejužívanějších metod rovněž ke zjišťování mezizávitové izolace je i metoda částečných výbojů.



3 MĚŘENÍ

3.1 Teoretický rozbor měření spektra a použité měřicí přístroje

Spektrum, tedy zobrazení signálu v harmonických složkách pomocí Fourierovy transformace, lze získat několika způsoby: a) z dat o průběhu signálu v časové oblasti změřených pomocí osciloskopu, uložených v požadovaném formátu a poté převedených pomocí matematické funkce v nějakém matematickém výpočtovém softwaru PC; b) jako přímý výstup z osciloskopu, který má funkci FFT, tedy *Fast Fourier Transform* (rychlá Fourierova transformace), jenž přímo převádí signál na spektrum, které může zobrazovat v lineárních nebo logaritmických souřadnicích; c) přímé zobrazení ve spektrálním analyzátoru.

V údržbářské praxi je nejvhodnější používat přímou FFT v osciloskopu, protože spektrální analyzátoři jsou příliš nákladné a jejich přesnost, vzhledem ke korelativní povaze MCSA, je nevyužitelná a zpracování dat v PC je příliš zdlouhavé. Plně postačují grafické záznamy jednotlivých spekter.

Před měřením je nutné posoudit nároky na měřicí přístroje. V kapitole 5.3.1 bylo uvedeno, že požadovaná šířka pásma je většinou minimálně 100 kHz, tedy alespoň dvojnásobek (vlivem Nyquistova teorému) desetinásobku 5 kHz, což je za hranici spektra proudu, ve kterém se může motor projevovat (uvážíme-li obvyklý nejvyšší počet pólů (8) užívaných u asynchronních strojů, velmi vysoké otáčky, které ještě nevyžadují motory se speciální konstrukcí a alespoň 12. harmonickou, byla by signatura pod 2 kHz) a zároveň frekvenci, okolo které se většinou pohybuje nosná frekvence u kmitočtových měničů.

3.1.1 Požadavky na použitý osciloskop

Pro aplikaci na MCSA je nutné, aby osciloskop a měřicí sondy měly dostatečnou šířku pásma, vzorkovací kmitočet a hloubku paměti. Šířka pásma (Bandwidth) 100 kHz se týká především sond a snímačů. Šířka pásma současných digitálních paměťových osciloskopů (DSO) se většinou pohybuje v megahertzích, přičemž pro dostatečně přesný výpočet spektra a zachycení vzorků je vhodné zohledňovat jejich vzorkovací kmitočet a paměť. Vzorkovací frekvence v reálném čase určuje počet vzorků, které zachytí osciloskop za vteřinu, a je požadováno, aby byla alespoň 1GSa/s. Hloubka paměti udává množství zaznamenaných vzorků, které lze zpracovávat a mělo by jít alespoň o 1MSa. Vedle toho je samozřejmě vhodné, aby měl DSO co nejlepší výpočtovou schopnost, ale na nízkých kmitočtech je spíše limitní doba získání vzorků, než doba samotného výpočtu.

Vedle základních parametrů je nutné, aby měření nebylo ovlivňováno vnějším rušením, které se může objevit na zemnici PE svorce, což v daném případě nejen zarušuje měřený objekt, ale znehodnocuje i samotné měření. I když záleží na povaze (strmosti) rušeného signálu, je nejjistější obranou použít osciloskop napájený z baterie. Vedle toho je také možné galvanicky oddělit napájení osciloskopu přes transformátor, případně více transformátorů, a snížit tím parazitní kapacitu (např. propojením stran nízkého napětí u dvou identických transformátorů). V diagnostické praxi se často využívá i galvanické oddělení měřeného objektu, ale to většinou u větších výkonů nelze aplikovat.

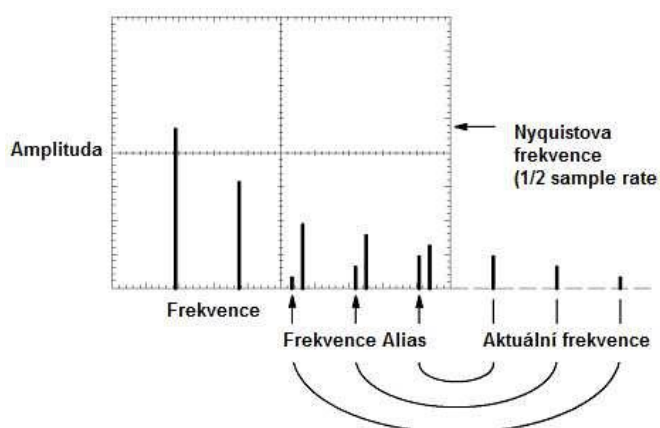
3.1.1.1 Funkce osciloskopu k výpočtu spektra - Math FFT

Vedle hardwarových požadavků, kam patří i rozlišení zobrazovacího zařízení, je dále nutné zohledňovat kvalitu převodu do spektrální oblasti, ke kterému slouží matematická funkce Math FFT [15], a také optimální nastavení osciloskopu. Před samotným výpočtem FFT, musí být nejprve vhodně zobrazen signál v časové oblasti (Y-T). Vertikální úroveň (Vertical Position) by měla být situována ve středu, aby FFT zobrazovala skutečnou hodnotu DC složky (Tru DC). Horizontální pozice (Horizontal Position) svým

středem určuje oblast signálu, která bude analyzována. Amplituda křivek (Vertical Scale, V/dílek) by měla být zobrazena celá, aby byl výpočet korektní. Stejně tak horizontální rozsah (Horizontal Scale, s/dílek) určuje rozlišení spektra, respektive frekvenční rozsah výpočtu FFT. Větší frekvenční rozsah pak eliminuje možnost FFT aliasingu, zhoršuje však rozlišovací schopnost. Osciloskop většinou zobrazí FFT, i když není nastavena časová oblast. V takovém případě určuje rozsah výpočtu sám, a zvláště u zarušených signálů může být oblast určena ve frekvencích, které nás primárně nezajímají. Pro účel MCSA je plně dostačující (pokud nás nezajímá nosná frekvence měniče) rozsah do 15. harmonické rozšířený o rezervu, abychom se vyhnuli velkým nepřesnostem na okraji oblasti výpočtu a zmíněnému aliasingu. U první harmonické 50 Hz je 15. na 750 Hz a postačí nám tedy rozsah do 1 kHz. Jelikož nás ale budou zajímat pásma mnohem nižší, je vždy výhodné se držet do 2/3 zobrazeného rozsahu. O chybě výpočtu se můžeme přesvědčit, zobrazíme-li tentýž signál na dvou rozsazích.

Osciloskop vypočítává FFT v rozsahu od 0 Hz do poloviny vzorkovací frekvence (tedy do Nyquistovy frekvence), podle toho jaký frekvenční rozsah je nastaven. Tím je určena přesnost zobrazení spektra. Vedle toho je možné použít zoom, který je pouze záležitost zobrazení a nijak neovlivňuje průběh výpočtu a vzorkovací frekvenci. Je nutné se mít na pozoru před **aliasingem**, který spočívá v promítnutí frekvencí nad Nyquistovou frekvencí do pásem okolo Nyquistovy frekvence. Zvýšením vzorkovací frekvence pomocí horizontálního rozsahu (Horizontal Scales, s/dílek) se zvyšuje i Nyquistova frekvence, a tudíž frekvence *aliases* se zobrazují na reálné frekvenci. Hrozí-li aliasing (konec rozsahu, silné magnitudy hned za rozsahem) je nutné porovnávat výsledky z různých rozsahů a spíše se držet pod 2/3 horizontálního rozsahu.

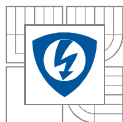
Podle volby způsobu zpracování výsledků, můžeme ukládat naměřená data jako obrázky, zaznamenaná nastavení osciloskopu, a naměřené hodnoty v podobě tabulky.



Obr. 3. – Aliasing – použito z manuálu k DSO Tektronic 2024 [15].

Spektrum je primárně určeno body jednotlivých harmonických složek podle jejich magnitud (amplitud ve spektrální oblasti) a výsledný tvar průběhu spektra je výsledkem interpolace. Pro účely MCSA je nejvhodnější použít zobrazení okna Hanning. Z důvodu přehlednosti je vhodné mít nastaven vertikální rozsah (10 dB) a dále jej neměnit; rovněž horizontální rozsahy měnit podle předem zvoleného záměru, a postupovat takto při všech měřeních stejně.

Pro zobrazení spektra je většinou výhodné použít logaritmickou vertikální stupnici s měřítkem 10 dB, aby zobrazení bylo amplitudově přehlednější. Musí se poté ale zohledňovat vztah k amplitudám (Tabulka 3). Amplitudový odstup o -30 dB (což je pro MCSA již hypotetický *podpis*) je 31 krát menší, a tedy u 100 A je tato magnituda 3,16 A, u napětí 230 V jde o špičku 10V.



dB	Násobek amplitud
10	3,16
20	10,00
30	31,62
40	100,00
50	316,20

Tabulka 3. – Amplitudový odstup v logaritmických souřadnicích.

3.1.2 Specifikace použité sondy

Při měření stavu zarušené rozvodné sítě, nebo napětí vycházející z měniče, je nutné zohledňovat maximální možné napětí, které lze sondou na konkrétním osciloskopu měřit a skutečnost, že zemnicí svorky sond jsou přímo spojeny s PE svorkou osciloskopu. Maximální přípustné napětí je primárně určeno špičkovými mezními parametry dané sondy (která je pro konkrétní model osciloskopu určená). Nelze vycházet z toho, že sondu s desetinasobným dělicím poměrem (1:10) lze použít na desetinasobné napětí, protože hlavním důvodem k vyšším dělicím poměrům může být snaha o dosažení menší kapacitní zátěže při měření. Měříme-li napětí blízká se 1 kV, je nutné použít VN sondu, která je na takováto napětí konstruována. Co se týče PE spojení osciloskopu se sítí, je vždy problematické, pokud nepoužíváme osciloskop napájený z baterie (který je galvanicky oddělen od sítě), protože rušení může procházet PE vodičem a tedy znehodnotit naměřené výsledky. Nabízí se možnost 1) měřit na galvanicky odděleném osciloskopu pomocí dvou sond určených pro dané napětí (příčemž napětí je udáváno pro danou sondu vůči zemi) a použít pak zobrazení X-Y; 2) anebo měřit pomocí aktivních diferenčních sond, které nejen, že jsou galvanicky odděleny, ale lze pomocí jedné sondy měřit napětí, které není nijak potenciálově spojeno se zemí. Diferenční aktivní sondy jsou však mnohem nákladnější, zvláště pokud jsou konstruovány pro VN. Vedle mezních parametrů [16] je rovněž nutné zohledňovat charakteristiku sondy, která udává frekvenci, od které jmenovitá hodnota (většinou 300V AC, nebo 300Vrms, efektivních 300 V sinusového průběhu) klesá, a na větších kmitočtech může být řádově nižší.

3.1.3 Použité přístroje pro měření

K měření byly použity následující přístroje, které splňují předešlá kritéria:

Digitální osciloskop:

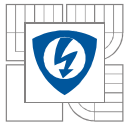
TEKTRONIX TPS 2024 – No. TPS2024 C018605.

Parametry: - 4 kanály;
- šířka pásma 200 MHz;
- vzorkovací frekvence: 2 GS/s
- možnost napájení z baterie

Proudová měřicí sonda:

Chauvin Arnoux E3N – AC a DC rozsah: 0,05-100A

- přesnost 3%
- transformační poměr: 100 mV/A - 10 mV/A
- šířka pásma: 0-100 kHz



3.1.3.1 Další měřicí přístroje

Osciloskop: - Rigol DS 1054E; DS1ET162057935.

VN sonda: - Hantek, T3100, 100:1, do 100 MHz.

Zvukový měřič napnutí řemenů: - Sonic Tension Mere - 507c.

Popis funkce: Dle specifické hmotnosti řemenů, šířky a počtu žebér, klínů, délky tětiny, zobrazuje napnutí (kg, N, lb) nebo vibrace (Hz; 60-500); vysoké frekvence brzy po úderu do napnutého řemenu zanikají a zůstává kontinuální sinusová vlna závislá především na napnutí.

Vibrotest: - VT60; Bruel a Kjev Vibro; sn 00003728 - měření výchylky a zrychlení.

Ručičkové úchylkoměry: - Mahr, MarCator 803A; 0,01mm; BH 451673.

- Kinex 0,001-1mm, sn8814567.

Posuvné měřidlo: - MiTako, sn c1110240469.

Multimetr: - Voltcraft VC-531; No140218788.

Měřidlo vyvážení: - Hofmann, EB30021; SN 0808266.

Popis funkce: Vstupem jsou otáčky a vibrace z hřídele; přístroj se zkalibruje závažími po 120 stupních okolo osy otáčení a po měření přístroj zobrazí posunutí závaží.

3.2 Rozbor měření a diagnostiky

Jelikož vědecké práce zabývající se MCSA především řeší pouze teoretickou stránku souvislostí mezi poruchou a jejím projevem v proudovém spektru, bylo nutné až v průběhu měření vytvořit pravidla a korigovat je v závislosti na výsledcích měření a efektivitě jejich získávání. Cílem měření bylo na několika vzorcích různé povahy ověřit možnosti použití MCSA.

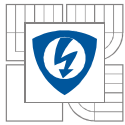
Měření bylo realizováno v následujících etapách:

- rozběh stroje a případně jeho zahřátí;
- zjištění a zaznamenání stavu sítě pomocí VN sondy;
- přiložení proudové sondy a její nastavení v časové oblasti
- zaznamenávání spekter vypočítaných pomocí funkce osciloskopu *Math FFT*.

Mezi měřením napětí a proudu bylo nutné i přenastavit Trigger (podle kterého kanálu bude probíhat spouštění). Jelikož se spektrum s časem mění, byly sledovány trendy kolísání spekter a v první řadě byla snaha zaznamenávat střední hodnoty. V případě sledování napětí bylo nutné zaznamenat i nestabilní výkyvy.

V samotné analýze byly srovnávány vzorky: A) Hlavní pozornost se zaměřila na rizikové frekvence, tedy předpokládané teoretické *podpisy* poruch ve spektru, které byly vypočítány podle známých informací o motoru. B) Spektrum proudu se porovnávalo se spektrem napětí, přičemž všechny dominantní magnitudy ve spektru napětí, vyjma první harmonické a jejich násobků, se ve spektru proudu nezohledňovaly (případně se pochybovalo, o tom že jde o spektrální *podpis* motoru). Jako spektrální *podpis* motoru byla brána magnituda, která měla odstup menší než 30 - 40 dB a která se přímo netýkala vyšších harmonických samotné sítě.

Měřeno bylo celkem 6 vzorků, přičemž 4 vzorky byly napájeny ze sítě 3x400V a dva z kmitočtového měniče Heidehain UM113 D. Aby mohl být zkoumán i deformovaný proud určený kmitočtovým řízením, byla nalezena metoda převodu tohoto proudu na analogické spektrum vytvářené při napájení ze sítě.



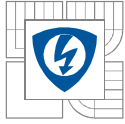
3.2.1 Metodika měření

V návaznosti na postup měření byla zpracována i specifická metodika pro analýzu proudových spekter. Teoretická literatura zabývající se MCSA nezdůrazňuje nutnou znalost napětí; důraz na povahu měření, jakožto sledování trendů. Není zpracována ani cílená manipulace se stavy soustavy, aby byl vytvořen diferencovaný popis, atd.

Zpracovaná metodika:

- 1) Změříme a zaznamenáme napájecí **napětí motoru** a prověříme stav sítě, na kterou je motor, či měnič připojen. Snažíme se identifikovat veškeré abnormální magnitudy v jeho spektru, přičemž některé můžeme sledovat před i za měničem.
- 2) Měříme spektrum **proudu** pro každý stav soustavy, přičemž jako signifikantní se berou ty magnitudy, které odpovídají průměrnému **trendu** – sice jde o přibližné měření, ale jelikož měřicí sonda je lineární a s deklarovanou přesností, zaměřujeme se spíše na profil spektra než na konkrétní naměřené hodnoty. Zajímá nás především odstup magnitud, které nejsou ve spektru napětí.
- 3) Volíme několik stále stejných rozlišení vzorku, které se zaznamenávají při každém stavu soustavy. Identifikace vzorků zaznamenáváme do tabulky.
- 4) Měníme stav soustavy a získáváme vzorky pro **různé stavy**, čímž se odfiltruje vliv stavu soustavy a spektrum pak více koreluje s elektromechanickým stavem soustavy než s aktuálním dynamickým stavem – sníží se tak riziko záměny signatury oscilace harmonických a oscilace zátěže. Dbáme na opakovatelnost měření, aby měření mělo, co největší výpovědní hodnotu.
- 5) Pokud to soustava umožňuje, měříme spektrum nezatíženého motoru a **postupně soustavu zatěžujeme**: sundají se řemeny, odpojí se převodovka, přeřadí se na poměr 1:1, zatíží se symetricky, stroj se zatíží reálnou zátěží.
- 6) Odděluje se **vliv převodování** (řemenové, zubové,...) a samotného motoru na postranní pásma. Měřením bez převodu a s převodem při stejných otáčkách motoru se získává *podpis* vlivu převodovky. Výhodou je, že není třeba znát převodové stupně. Vypočítá se pouze převod mezi zátěží a motorem, a pokud odstup postranních pásem od první harmonické odpovídá násobku první harmonické a převodu, respektive násobku tohoto převodu, jedná se o nesymetrii zátěže nebo převodovky. Pokud jsou postranní pásma mimo tyto hodnoty, je problém pouze v převodovce. Většinou se ale vliv převodovky do spektra podepisuje jako pouhá zátěž, protože vůle v převodech působí proti rychlým změnám a přenáší převážně střední hodnotu zátěže. Stejně tak je možné identifikovat poruchu konkrétního ozubeného kola, která se rovněž projevuje s odstupem určeným převodem [11].
- 7) Měří-li se kmitočtově řízený motor, je třeba nastavit již před měřením napětí otáčky tak, aby modulační frekvence byla 50 Hz. Stejně tak i při hledání stejných otáček při druhém převodu (Kapitola 3.5).
- 8) Analýza výsledků se provádí buď jako diferenciální diagnostika, kdy jsou srovnána spektra v různých stavech zařízení (se zátěží, bez zátěže, nový motor starý motor; po dlouhém provozu, na začátku provozu, atd.), aby byl získán spektrální *podpis* samotného změněného stavu (nejobecněji rozdíl spektra proudu a napětí); anebo jako „historická“ diagnostika, která zaznamenává a zkoumá vývoj a změnu stavů v průběhu technické doby života zařízení.

Přestože je celé měření zatíženo silnou **nepřesností** a pracuje pouze s pravděpodobnostním charakterem korelace, tedy výsledky diagnostiky vypovídají pouze o korelacích a ne o deterministických závislostech, jde i tak o velice cenné informace pro provozní diagnostiku. Podle pravděpodobnosti poruchy se možné kritické body mechanicky a elektricky kontrolují, měří a případně vyměňují. Dochází tak k časové a finanční úspoře. Metoda může odhalit vznikající poruchu, čímž předejde dlouhým odstávkám a nákladným



výměnám. V neposlední řadě, pokud je součástí prediktivní diagnostiky, tak s nárůstem měřených vzorků, resp. získáním zkušeností s vyhodnocováním, znatelně narůstá pravděpodobnost korelace. Signatura má pak osobitý charakter konkrétní soustavy, ze které lze číst jednotlivé stopy vývoje jejího stavu.

3.2.2 Postup měření v případě provozní diagnostiky

- 1) Zjištění spektra napětí **sítě, napájení motoru a vnějších vlivů** rušení – měření napětí VN sondou anebo proudovou sondou na lineární odporové zátěži;
- 2) elektrické **propojení**, mechanické ukotvení, uvedení stroje do provozu;
- 3) **ustálení provozních hodnot** – po rozběhu a zahřátí mechanických částí na provozní teploty;
- 4) **propojení** měřicího přístroje – měření při napájení z baterie kvůli eliminaci rušení;
- 5) měření proudu **jednotlivými fázemi** za ustáleného elektromechanického stavu – přibližné ověření symetrie – spektrální profil musí být na jednotlivých fázích analogický;
- 6) měření protékajícího proudu **fázovými vodiči současně** a měření proudu procházející PE vodičem, měření proudového rušení mezi měničem a motorem (před a za „tlumivkou“) a měření rušení mezi sítí a měničem (před a za „tlumivkou“) – vyhodnocení vlivu okolní sítě a vlivu stroje na okolní síť;
- 7) pokud je potvrzena symetrie, měří se na **jedné fázi**, zaznamenávají se trendy;
- 8) **zaznamenávají** se jednotlivé obrazy spektra pro daný stav v místech s významnými amplitudami vůči první harmonické při předem určeném rozlišení;
- 9) podle metody měření se **mění stav** soustavy a ukládají se obrazy spektra – přičemž je do tabulky zaznamenáváno jakému stavu odpovídají;
- 10) po měření se **vypočítají hodnoty teoretických kritických frekvencí**, které se identifikují v obrazech spektra;
- 11) významné amplitudy vůči první harmonické se **interpretují** buď jako postranní pásma, oscilace (motoru, převodovky, zátěže) nebo jako násobky první harmonické, či vlivy napájecí sítě nebo měniče;
- 12) z **kritických frekvencí se usuzuje na pravděpodobnost možných poruch.**

Vždy se musí zohledňovat tyto **meze metody**:

- a) **předpoklad symetrie napájení** nemusí být splněn, ale je obtížné jej změřit;
- b) **chyba měření** je způsobena nejen měřicími přístroji, ale i matematickým výpočtem FFT osciloskopu;
- c) mechanický stav soustavy není konstantní, ale mění se, a proto i zaznamenané spektrum nemusí odpovídat trvalému stavu ale **pouze okamžitému stavu**;
- d) podoba spektra může odpovídat **stavu** soustavy, který je sice **deterministický, ale** jelikož je **složitý** a spousta **informací** o soustavě **nemáme**, nemusí být identifikovatelný – s rostoucí znalostí o soustavě roste i možnost identifikace spektrálního *podpisu*, proto je i *podpis* bezporuchové soustavy cennou znalostí;
- e) **některé poruchy se nepromítají** do spektra jako konkrétní oscilace, ale spíše ve frekvenčních pásmech. Například poškozená izolace je touto metodou nepostižitelná, protože se mění reaktance elektrického obvodu, která funguje jako kmitočtový filtr a modeluje určité frekvenční pásmo. Identifikovat lze tedy pouze elektromechanické poruchy, které mají vliv na průběh magnetického pole ve vzduchové mezeře vlivem otáčení stroje. Proto je tedy vhodné provádět MCSA nejen společně s měřením vibrací, ale i s funkční diagnostikou vinutí a izolací magnetického obvodu motoru.



3.3 Zjištění stavu napájecí sítě

Z hlediska analýzy rušení (Elektromagnetické kompatibility - EMC [17], [18], [19]) je nutno odlišovat EMI (interference) tedy rušení prostředí a EMS (susceptibilita) odolnost vůči rušení. S ohledem na MCSA nás zajímá především rušení v NF oblasti šířící se po vedení a především energetické rušení, které se uplatňuje jako deformace napájecího napětí do frekvencí 2 kHz.

Dle projevu rušení na průběh signálu lze odlišit: jehlové impulzy, harmonické složky a pilovité zvlnění. Jehly jsou především zapříčiněny VF rušením - může se jednat o spínací procesy u elektromechanických prvků, či VN výboje. Harmonické složky většinou způsobuje nesymetrie sítě (vlivem zátěže) nebo podpětí, přepětí či výpadek jednotlivých fází. Pilové zvlnění je často parazitním superponováním nosné frekvence kmitočtových měničů (PWM). Jelikož motory jsou energeticky odolnější na rozdíl od elektronických prvků, lze ve většině případů usuzovat, že z hlediska EMC je více určující nesymetrie napájení než samotné poruchy vlivem energie rušení. Vzhledem k povaze rušení je vhodné si uvědomit, že pro analýzu MCSA nás tedy primárně zajímá především spojitě (kontinuální) rušení, protože právě to může mást svými *podpisy* ve spektru proudu. Z možných vstupů rušení (sít', kryt, signál řízení, zemnění) nás zde především zajímá sít' a zemnění.

Z hlediska vazebních mechanismů je nutné mít na zřeteli galvanickou vazbu měřicího přístroje a kapacitní vazbu motoru a měniče vůči zemi. Soufázové rušení (které je superponované na všech fázových vodičích) vlivem spínacích jevů měniče se snaží odstranit tzv. soufázové tlumivky [20], - jde o vliv cizího zařízení na sít'. „Tlumivka s proudovou kompenzací“ odstraňuje fázové rušení mezi měničem a motorem, nebo mezi sítí a motorem. Pokud se objevují právě tyto nedostatky v napájecí síti, je vhodné tyto části zkontrolovat.

Vhodné je zkontrolovat kvalitu uzemnění: správné dimenzování PE; zda je přímé spojení s hlavní PE svorkou a nejsou slučovány dílčí PE vodiče; jestli se nevytvářejí společné části napájecích přívodů; zda jsou zařízení různých technologií připojena na vlastní zdroje; galvanické oddělení řídicích a výkonových cest; spojení stínění, co nejbližší a nejkratší cestou k hlavnímu PE; jestli nevznikají velké kapacitní vazby galvanicky oddělených částí.

Většinou ani nelze v údržbářské praxi zkusit odolnost zařízení proti rušení, proto se vychází z předpokladu, že vnější rušení je absorbováno, ale i tak je diagnostika chápána jako přibližná. Především se jedná o kontrolu, zda sít' splňuje mezinárodní požadavky EMI podle ČSN IEC 50081, přičemž nás zajímají NF normy pro průmysl ČSN IEC 61000-2-4 [21], a v nich nejvíce odstup harmonických složek od první harmonické. V *Tabulka 4.* jsou uvedeny odstupy vyšších harmonických s dlouhodobými účinky:

Harmonická	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	13.	14.	15.
Poměr vůči první harmonické (%)	100	2	5	1	6	0.5	5	0.5	1.5	0.5	3.5	0.47	3	0.43	0.4
Odstup od 1. H (dB)	0	-35	-26	-40	-24	-46	-26	-46	-36	-46	-29	-46	-30	-47	-48

Tabulka 4. - Odstupy složek harmonických podle ČSN 61000-2-4 [21].

Přenos rušení vedením se většinou měří jako úbytek napětí na 50 Ω odporu vřazeném mezi zařízení a připojený k PE vodiči; přičemž zařízení je připojeno na umělou sít', tedy sít' připojenou přes sériový a paralelní (vůči PE) kondenzátor. Nesymetrické rušení se měří oddělením fázového i nulového vodiče sériovým kondenzátorem. V údržbářské praxi ale většinou nelze tento způsob použít (velký výkon, napětí). Proto se používají napěťové sondy nebo proudové sondy na zemní proudy v PE vodiče. Norma rovněž určuje harmonické složky proudu. Většinou je ale velice problematické identifikovat všechny cesty, kterými proud uniká do země a proto je vhodnější (vyjma ložiskových proudů) zaměřit se na kvalitu napájení.

Z praktického hlediska je nutné dbát na to, aby rušení bylo měřeno za provozu všech okolních zařízení. Výhodné je pak porovnání úrovně při vypnutých okolních zařízení, pokud to provoz umožňuje. Vždy je nutné mít přehled o struktuře rozvodu NN. Často je přínosem i respektování skutečnosti, že

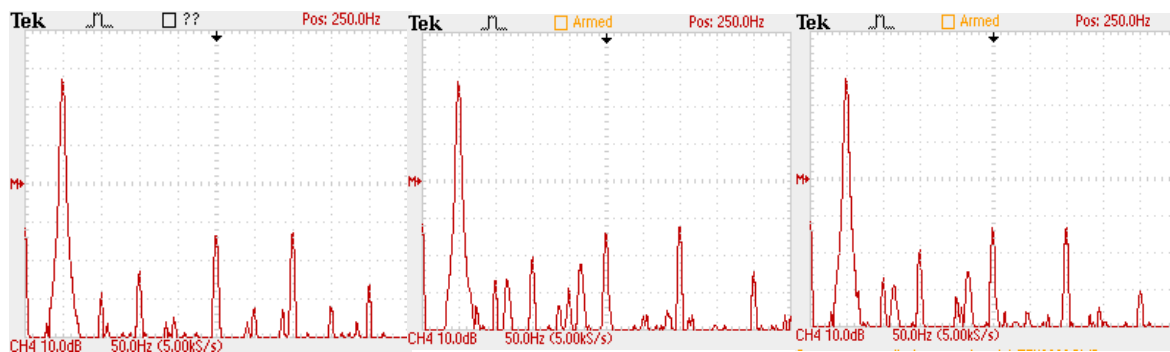
kompenzační stanice oddělují (na určitém frekvenčním pásmu) jednotlivé větve elektrických rozvodů, pokud jde o rušení, protože se většinou jedná o kapacitní paralelní větev a tedy dolní propust'.

3.3.1 Zjišťování kvality napájecí sítě ve výrobních halách, ve kterých byly zkoumány vybrané vzorky

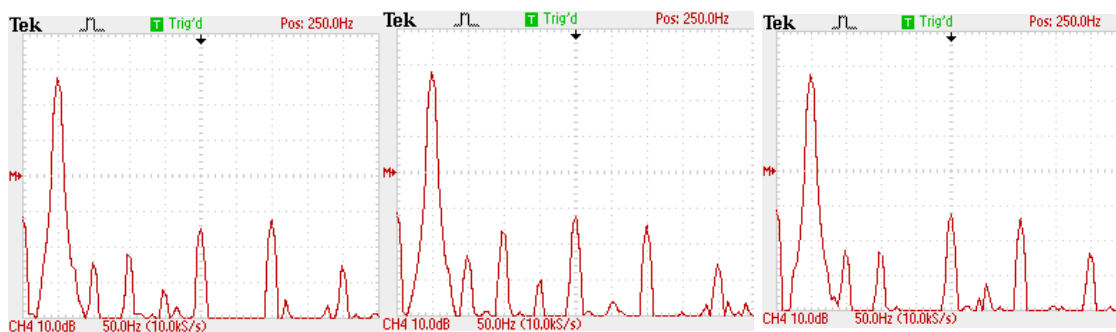
Dříve než jsem přistoupil k analýze statorový proudů, provedl jsem analýzu napájecí sítě. Jelikož jsem ale neměl k dispozici technické prostředky pro součtovou analýzu okamžitého napětí, aby byla odhalena případná nesymetrie sítě, pouze jsem porovnal obrazy magnitud spektra ve všech bodech sítě, kde se analyzovaný objekt nacházel. Vyloučeno bylo relevantní rušení do 10 kHz i VF rušení po vedení. Zároveň jsem však odhalil významné vyšší meziharmonické, na jejichž odstranění se v rámci efektivního využití výkonu právě pracuje. Porovnána byla i spektra jednotlivých fází a zároveň bylo porovnáno galvanicky oddělené měření osciloskopem napájeným přes baterii a s připojeným PE vodičem. Měření za plného provozu bylo porovnáno s výsledky měření při vypnuté většině výkonových zařízení. Významné byly jen násobky 3, 5, 9, 12 první harmonické, ty šlo teoreticky předpokládat a byly i pro srovnání naměřeny v neprůmyslové síti. Vždy se jednalo o odstup vyšších harmonických o více jak -30 dB, který nikde nebyl trvale nižší, než určují normy, a takřka nulové oscilace na vyšším frekvenčním pásmu. Současné analýzy [22] ukazují, že nedostatečná symetrie sítě představuje nejen problém údržby a spolehlivosti točivých strojů, ale i samotného využití elektrické energie a zvýšení účinnosti.

Na Obr. 4. jsou prezentována naměřená spektra přímo v hlavní rozvodně. Na Obr. 5. je opakované měření osciloskopem galvanicky spojeným se sítí. Je zde patrná jen malá odlišnost, přičemž průběhy spojené se sítí vykazují menší rušení, protože se rušení kompenzuje vlivem posunuté reference. Na přípojnicí staršího měniče (Obr. 3.) se začínají objevovat postranní pásma, která mají ale dostatečný odstup od první harmonické.

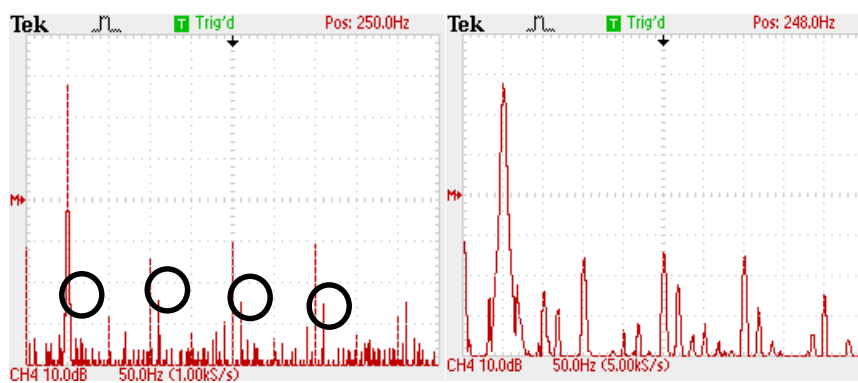
Z měření je zřejmé, že síť nelze chápat jako ideální zdroj výkonového sinusového průběhu, ale spíše jako nosnou frekvenci s dominantní amplitudou a jejími superponovanými násobky. Lze si tedy představit, že stejným prizmatem lze pohlížet i na napájení vytvořené frekvenčními měniči. Důležité je, že síť nevykazuje rušení, které by mohlo ovlivňovat výsledky MCSA a ani žádné *podpisy* ve spektru, které by nasvědčovaly, že nevyhovuje požadavkům na EMC podle ČSN [17], [21].



Obr. 4. – Napájecí spektrum na jednotlivých fázích v hlavní rozvodně měřené GO osciloskopem.



Obr. 5. – Napájecí spektrum na jednotlivých fázích v hlavní rozvodně měřené galvanicky spojeným osciloskopem se sítí.



Obr. 6 – Přípojnice záběhové stolice napájené starším kmitočtovým měničem.

3.4 Měření ASM s kotvou na krátko při napájení „harmonickým“ napětím z rozvodné sítě

První část měření byla věnována identifikaci *podpisů* ve spektru proudu u asynchronních motorů napájených harmonickým napětím. Nejdříve byl získán spektrální *podpis* nového motoru, u něhož se dalo předpokládat, že půjde o spektrum prosté všech deformovaných oscilací. Takovýto motor byl změřen v nezátíženém stavu s vyváženou hřídelí, byl pevně ukotven a uveden do zahřátého stavu. Připojen byl na síť, která byla pečlivě změřena. V dalším měření je získán *podpis* zatíženého motoru a posléze asymetricky zatíženého motoru. Dále byl analyzován motor, který poháněl zátěž přes řemen, přičemž výsledky byly porovnány s výsledky měření při různém využití řemenů.

3.4.1 Měření 1. vzorku – *studium vlivu excentricity*

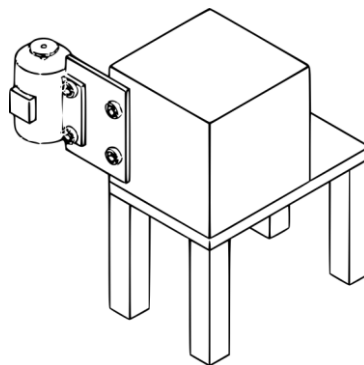
Prvním vzorkem byl nový motor 2,2 kW, který byl zprvu pevně ukotven pomocí patek na konzole užívané pro záběhy malých obráběcích hlav. Konzola je z litiny a svou hmotností několikanásobně převyšovala hmotnost motoru. Byla umístěna na stole, který byl ukotven k zemi a měl dřevěnou desku s tlustou gumovou podložkou. Guma jednak tlumí vibrace a jednak elektricky izoluje. Lze tedy předpokládat, že proud z obvodu uniká především přes zemnicí vodič. Hlavním přínosem tohoto měření bylo získat spektrální *podpis* funkčního motoru bez závad. Korelace mezi upevněním pomocí příruby nebo patek, vibrační a spektrem proudu se nijak průkazně nelišily.

Motor byl nejdříve měřen v poloze, kdy je osa otáčení orientována kolmo k zemi, posléze je osa otáčení vodorovná. Měření bylo opakováno s 1,5 kg zátěží, jež byla vyvážená, a posléze byla na jednu stranu zátěže vytvořena 19 g nesymetrie ve vzdálenosti 70 mm od osy hřídele. Měřeno bylo zároveň i napětí. Přestože se měření soustředilo na všechny potenciální signatury, základní orientace však byla stanovena podle teoretických vztahů respektujících parametry motoru.

3.4.1.1 Typ a upevnění motoru měřeného přípravku



Siemens 3~mot 1LE1002 1AB42 2AA0
400V Y, 50Hz, 4,8A, 2,2kW, 1425 min⁻¹



Obr. 7. – a) Ilustrativní fotografie 1. měřeného vzorku; b) ilustrace uspořádání: konzola užívaná pro záběhy malých obráběcích hlav. Motor byl upevněn pomocí patek. Korelace mezi upevněním pomocí příruby nebo patek, vibrační a spektrem proudu se nijak průkazně nelišily.

3.4.1.2 Dopočítané kritické frekvence pro MCSA

$$n_s = \frac{60f_1}{p_p} = \frac{3000}{2} = 1500 \text{ min}^{-1} \quad (24)$$

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{1500 - 1425}{1500} = 0,05 \quad (25)$$

$$f_{rt} = f_1 \pm 2ksf_1 = 50 \pm 5k \text{ Hz} \quad (26)$$

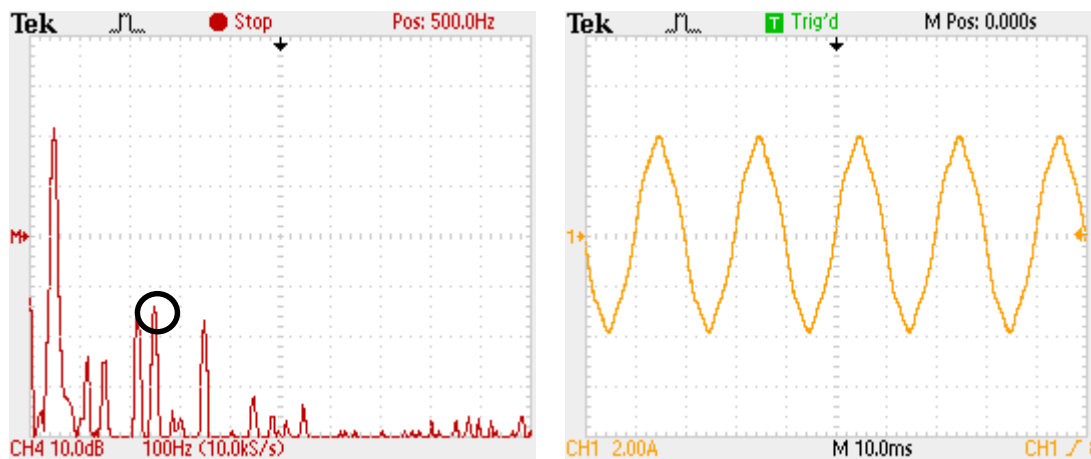
$$f_{rt2} = k_1f_1 \pm k_22sf_1 = 50k_1 \pm 5k_2 \text{ Hz} \quad (27)$$

$$f_{ex} = f_1 \pm \frac{f_1}{p_p} = 50 \pm 25 \text{ Hz} \quad (28)$$

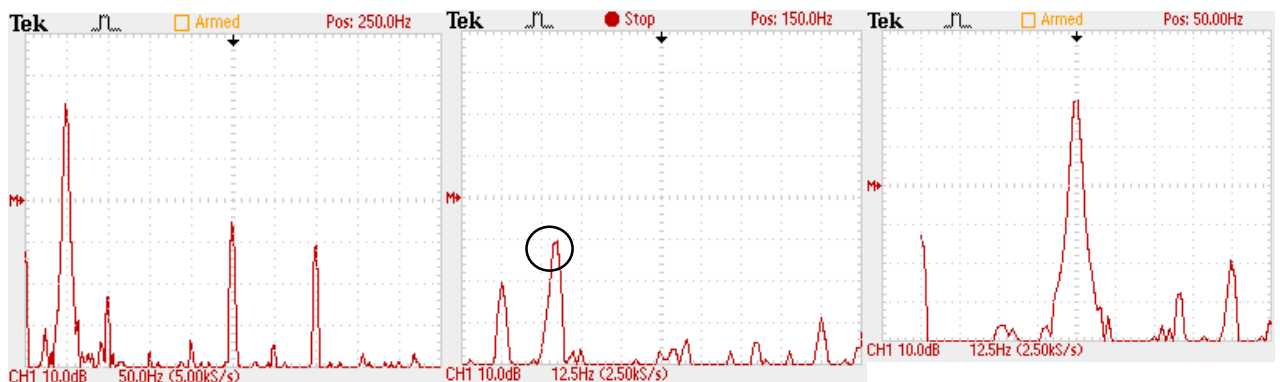
$$f_{ex2} = (k_1f_1n_{rb} + f_1) \pm f_r = (50 k_1n_{rb} + 50) \pm 25 \text{ Hz} \quad (29)$$

3.4.1.3 Výsledky naměřených spekter napětí a proudu

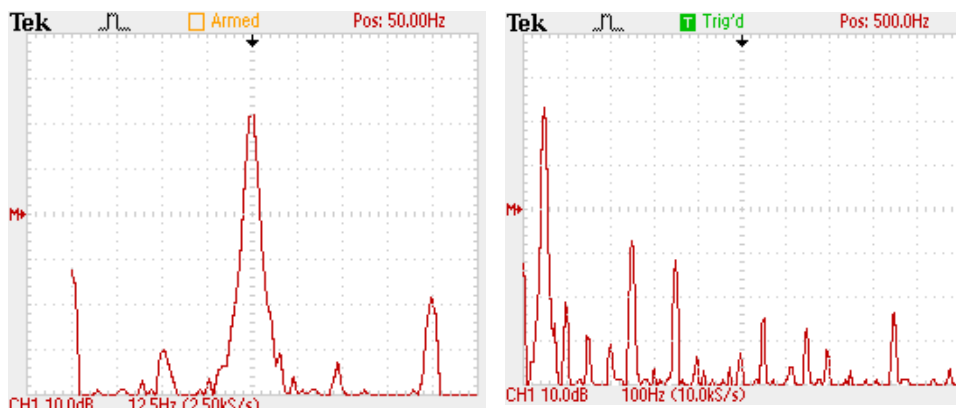
Naměřené spektrum napětí se shodovalo u všech fází. Není nijak zarušené, splňuje normy (ČSN 61000-2-4 [21]) na EMC. Jedinou výjimkou jsou oscilace, jež se občas projevují na kmitočtech 116 Hz, 176 Hz, 216 Hz (Viz Obr. 8)



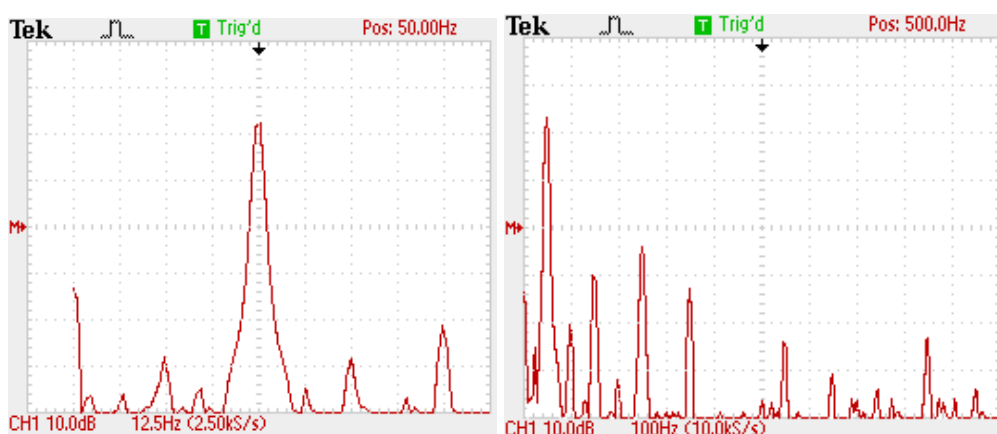
Obr. 8. – a) Spektrum napájecího napětí. Relativně shodné spektrum bylo naměřeno při zapnutém i vypnutém motoru; b) zaznamenaný průběh proudu.



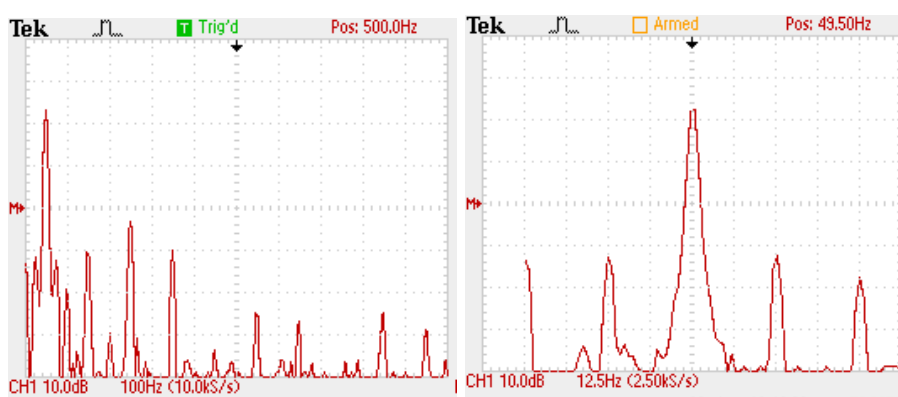
Obr. 9. – Naměřená proudová spektra při ose otáčení orientované kolmo k zemi: a) spektrum prakticky obsahuje stejné složky jako napájecí napětí; b) v okolí první harmonické (50 Hz) se nevytvářejí žádná postranní pásma; c) spektrum obsahuje i složku 116 Hz podmíněnou napájením.



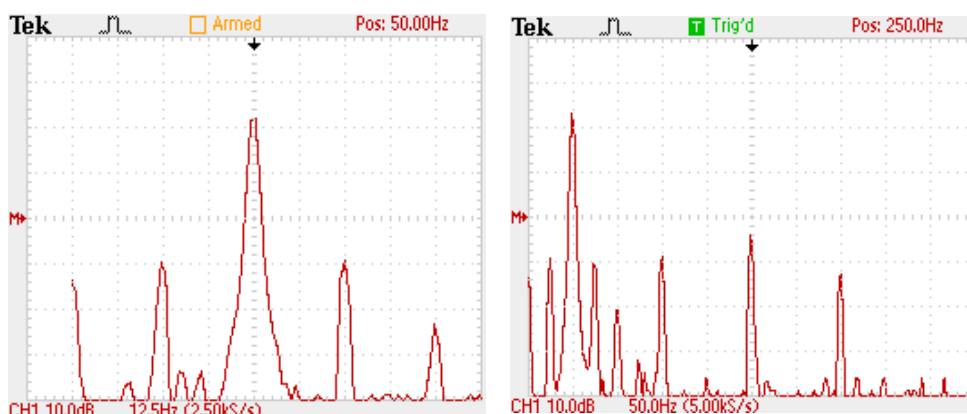
Obr. 10. – Naměřená proudová spektra při ose otáčení orientované vodorovně k zemi: a) postranní pásma okolo první harmonické se nijak zásadně nezvětšila; b) celkové spektrum proudu je analogické.



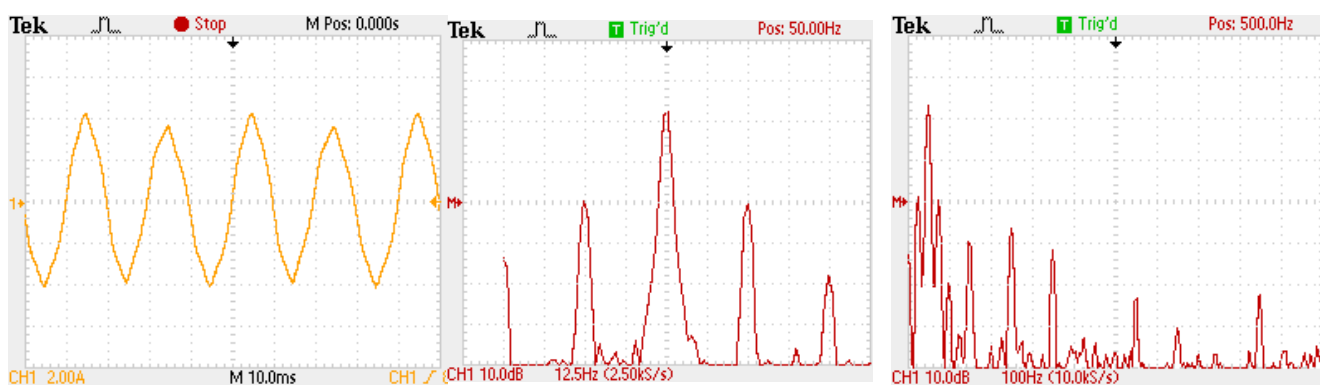
Obr. 11. – Naměřená proudová spektra zatíženého motoru při ose otáčení orientované kolmo k zemi: a) nárůst postranních pásem, v okolí první harmonické; b) zbytek spektra je analogický se spektrem nezatíženého motoru.



Obr. 12. – Naměřená proudová spektra zatíženého motoru při ose otáčení orientované vodorovně k zemi: a) spektrum s ohledem na vyšší harmonické je takřka stejné; c) kolem základní harmonické se vytvářejí postranní pásma ve vzdálenosti ± 25 Hz, jak bylo vypočítáno vzorcem 30.



Obr. 13. – Naměřená proudová spektra nesymetricky zatíženého motoru při ose otáčení orientované kolmo k zemi; a) nárůst postranních pásem v okolí první harmonické ($\pm 25\text{Hz}$) s odstupem -35 dB ; b) zbytek spektra je analogický se spektrem nezatíženého motoru.



Obr. 14. – Naměřené průběhy proudu nesymetricky zatíženého motoru při ose otáčení orientované vodorovně k zemi: a) amplitudy průběhu proudu začínají kolísat; b) odstup postranních pásem je -23 dB ; c) zbytek spektra je analogický se spektrem nezatíženého motoru.

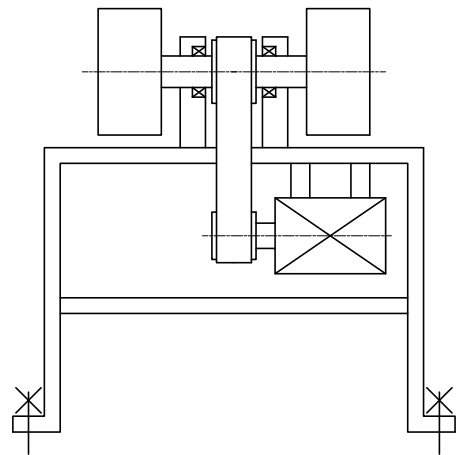
3.4.1.4 Závěr 1. etapy měření

V prvním měření byla ověřena souvislost mezi napětím a proudem, tedy skutečnost, že tokotvorná a tedy i momentotvorná je pouze první harmonická odebraného proudu. Vyšší harmonické tohoto proudu jsou především pouhými průměty spektra napájení do spektra proudu a stejně tak i rušivé magnitudy na kmitočtech 116, 176, 216 Hz. Ve spektru nezatíženého motoru se nevyskytují žádná významná postranní pásma, symetrickou zátěží se zvětší, přičemž záleží na orientaci osy otáčení. Orientace osy otáčení kolmo k zemi nevytváří tak významné oscilace, jako ve vodorovné poloze, kde se vlivem gravitace stává i symetrická zátěž mnohem významnější. Vytvořením i 19g nesymetrie v zátěži má za následek vznik velkých postranních pásem v souladu s vypočítanými teoretickými hodnotami, tedy podle počtu pólpárů. Oscilace jsou patrné dokonce i na průběhu proudu. Nesymetrie se maximálně projevuje při ose otáčení orientované vodorovně, což při simulované nesymetrické zátěži dosahuje odstupů až -23 dB , což je podle teorie MCSA chápáno jako jasný spektrální projev poruchového stavu.

3.4.2 Měření 2. vzorku – *studium vlivu řemenového převodu*

Ve druhé etapě měření byl analyzován záběhový přípravek s nesymetrickou zátěží poháněnou přes řemenový převod 3:1. Motor měl vinutí zapojené do hvězdy, napájený je ze sítě harmonickým napětím. Převod byl realizován jedním ozubeným řemenem. Zatížení motoru představovaly dvě kleštiny značné hmotnosti, přičemž řemenice nebyla přesně ve středu osy a osa rotace zaujímal nejnepříznivější rovnoběžnou polohu. Přípravek nebyl relevantně ukotven. Jelikož měl motor značný výkon (2,2 kW) a zátěž byla také značná, vyvíjel podnik snahu prověřit, zda motor nebyl (po cca 8 letech provozu) poškozen, či zda excentricita neměla na motor vliv a zpětně jej nepoškozovala, protože změřené vibrace dosahují hodnoty v desetinách milimetru, až milimetru.

3.4.2.1 Analyzovaný stroj - typ motoru



Obr. 15. – a) Fotografie 2. měřeného vzorku – „vyvažovačky“; b) ilustrace principiálního uspořádání elektromechanické soustavy.

Motor: Siemens

- 3~mot 1LM 7113- 6AA10

230/400V D/Y

D 50Hz, 2,2kW, 940 min⁻¹

3.4.2.2 Dupočítané kritické frekvence pro MCSA

$$n_s = \frac{60f_1}{p_p} = \frac{3000}{3} = 1000 \text{ min}^{-1} \quad (31)$$

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{1000 - 940}{1000} = 0,06 \quad (32)$$

$$f_{rt} = f_1 \pm 2ksf_1 = 50 \pm 6k \text{ Hz} \quad (33)$$

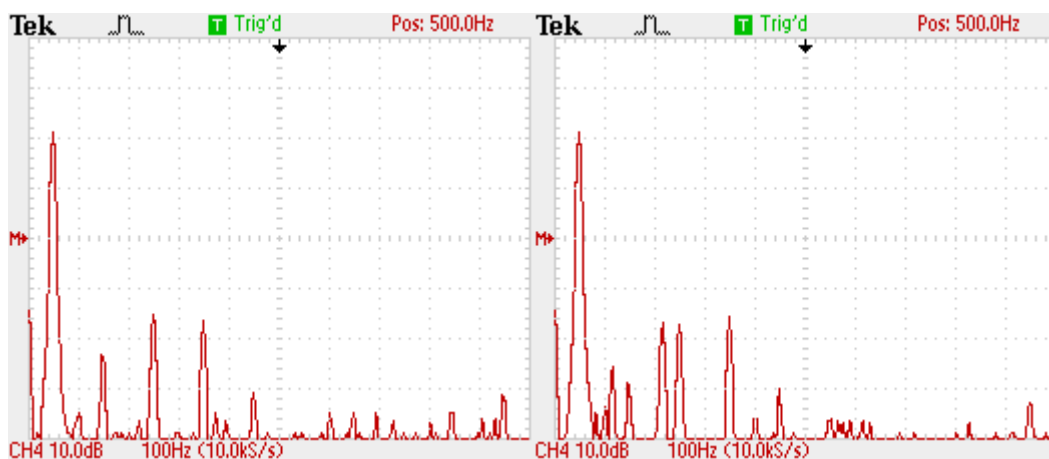
$$f_{rt2} = k_1f_1 \pm k_22sf_1 = 50k_1 \pm 6k_2 \text{ Hz} \quad (34)$$

$$f_{ex} = f_1 \pm \frac{f_1}{p_p} = 50 \pm 16 \text{ Hz} \quad (35)$$

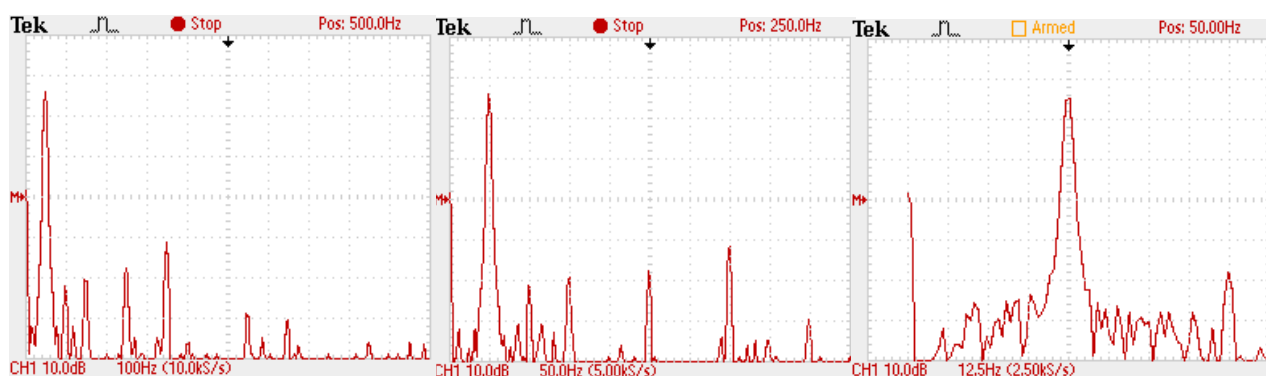
$$f_{ex2} = (k_1f_1n_{rb} + f_1) \pm f_r = (50 k_1n_{rb} + 50) \pm 16 \text{ Hz} \quad (36)$$

3.4.2.3 Naměřená spektra napětí a proudu

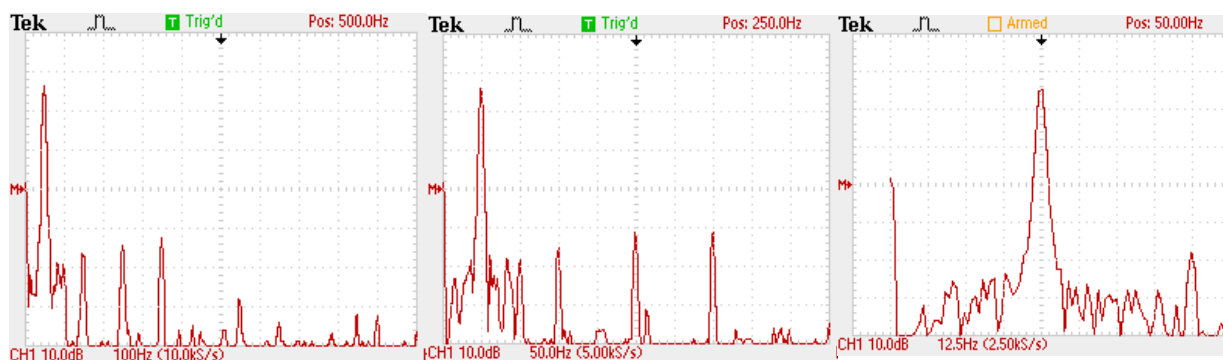
Jelikož byl přípravek připojen na stejnou větev jako starší kmitočtový měnič, u něhož se dalo předpokládat, že ovlivňuje okolní síť, bylo nejdříve analyzováno napájecí napětí motoru.



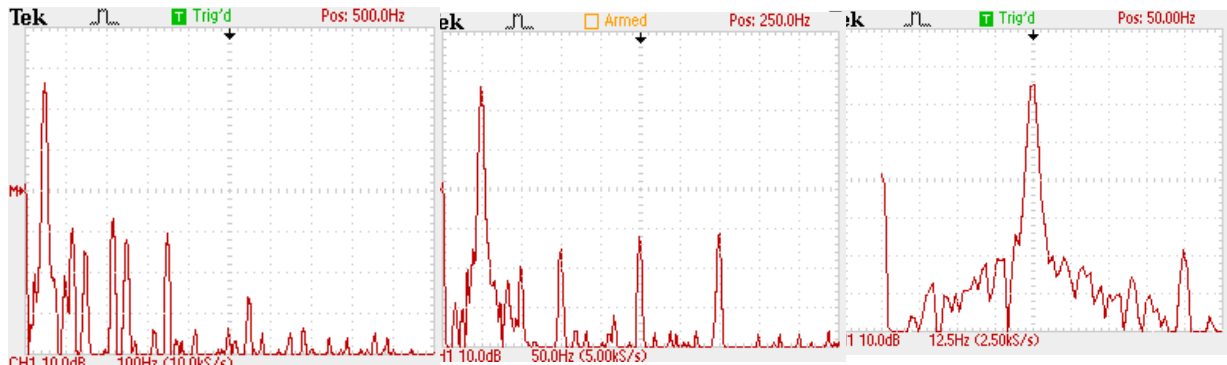
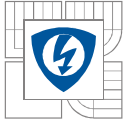
Obr. 16. – Naměřené spektrum napájecího napětí motoru: a) Vzhledem k tomu, že na všech fázích byly naměřeny analogické průběhy, lze usuzovat na symetrickou síť; b) ve spektru se v určitých okamžicích na všech fázích vyskytují zákmity na 176 a 216 Hz, lze předpokládat, že tentýž podpis bude i ve spektru proudu.



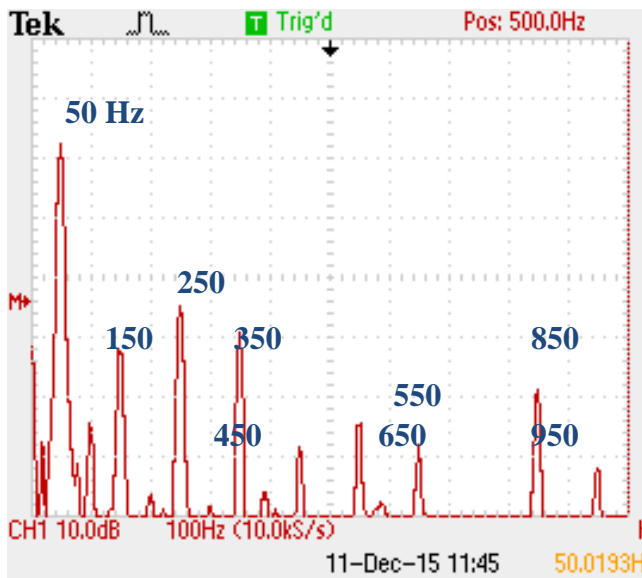
Obr. 17. – Naměřené spektrum proudu při nezatíženém motoru (ve stavu naprázdno).



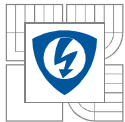
Obr. 18. – Naměřené spektrum proudu při zatíženém motor ($J \approx 0,15 \text{ kg m}^2$).



Obr. 19. – Naměřené spektrum proudu při nesymetricky zatíženém motoru.



Obr. 20. – Naměřené spektrum proudu nového (spolehlivého) nezatíženého motoru stejného typu s dominantními lichými harmonickými 3, 5, 7, 9, 11, 13, 17, 19. Jelikož motor běží naprázdno, teče jím minimální proud, a proto i odstup od vyšších (napěťových) harmonických je menší jak -30 dB.



3.4.2.4 Závěr 2. etapy měření

Z naměřených průběhů bylo patrné, že i když motor pracoval ve značně nepříznivých podmínkách, dokázal svou převahou výkonu a pružností řemene pracovat bez jakýchkoli parazitních oscilací. Ve spektru proudu nebyla odhalena žádná stopa nesymetrie. Pokud bychom neznali spektrum napětí, mohli bychom uvažovat o rezonanci na frekvenci 216 Hz, což by se shodovalo s teoretickou frekvencí, na které by se měla excentricita projevovat. Jelikož se objevovala oscilace i ve spektru napětí a se zátěží se nijak nezvyšovala její magnituda, bylo nutné tuto hypotézu opustit. Na *Obr. 20* bylo pro porovnání změřeno spektrum nového motoru stejného typu.

Měřením stojanové vrtačky se značně nesymetrickou zátěží, jež způsobovala vibrace až 0,05 mm, u které byl rovněž motor spojen s vřeteníkem přes klínový řemen avšak v kolmé poloze vůči zemi, bylo prokázáno, že ani při jiné orientaci otáčení motoru nepůsobí oscilace na motor. Toto měření rovněž vyloučilo, že by na pohlcení vibrací mělo vliv špatné ukotvení měřícího přípravku, protože vrtačka byla pevně ukotvena masivní konstrukcí.

3.4.3 Měření 3. vzorku – stojanová bruska

Pro třetí etapu měření byla zvolena stojanová bruska, která vykazovala vibrace špičkově až 0,025 mm v rovnoběžné ose otáčení motoru.

3.4.3.1 Specifikace motoru a naměřené parametry



- Stojanová bruska TOS Prachovice BI4S.
- Poháněná řemenovým převodem 1:1.
- Motor (typový štítek takřka nečitelný): výrobce Mez Mohelnice.
- Naměřené otáčky bez zátěže: cca 1480 min⁻¹.

Obr. 21. – Ilustrativní fotografie 3. měřeného vzorku: stojanové brusky: principiálně shodné elektromechanické uspořádání jako v předešlém případě.

3.4.3.2 Dupočítané kritické frekvence pro MCSA

$$n_s = \frac{60f_1}{p_p} = \frac{3000}{2} = 1500 \text{ min}^{-1} \quad (37)$$

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{1500 - 1480}{1500} = 0,0133 \quad (38)$$

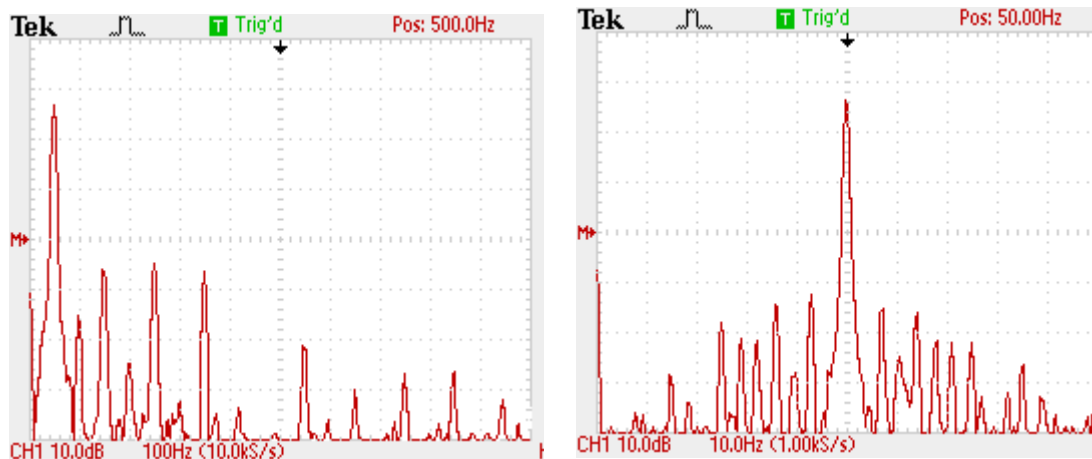
$$f_{rt} = f_1 \pm 2ksf_1 = 50 \pm 1,3k \text{ Hz} \quad (39)$$

$$f_{rt2} = k_1f_1 \pm k_22sf_1 = 50k_1 \pm 1,3k_2 \text{ Hz} \quad (40)$$

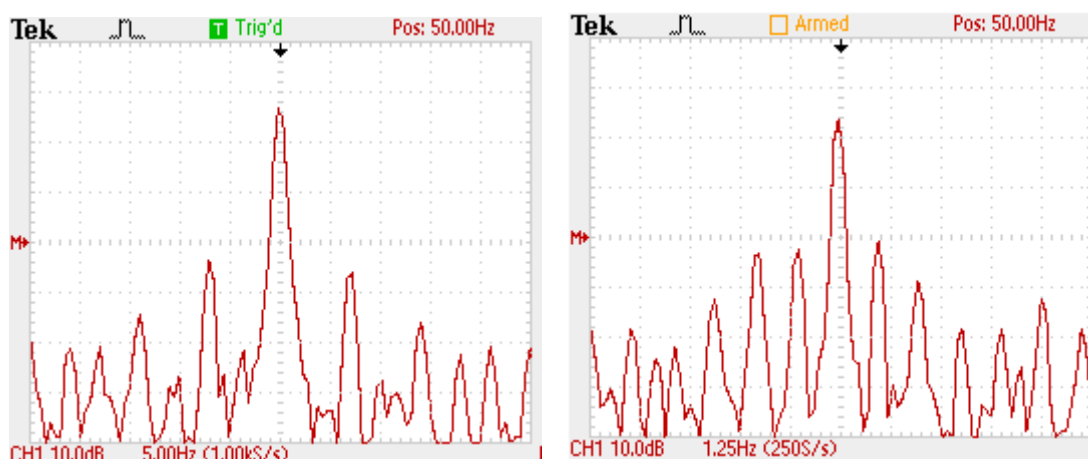
$$f_{ex} = f_1 \pm \frac{f_1}{p_p} = 50 \pm 25 \text{ Hz} \quad (41)$$

$$f_{ex2} = (k_1f_1n_{rb} + f_1) \pm f_r = (50 k_1n_{rb} + 50) \pm 25 \text{ Hz} \quad (42)$$

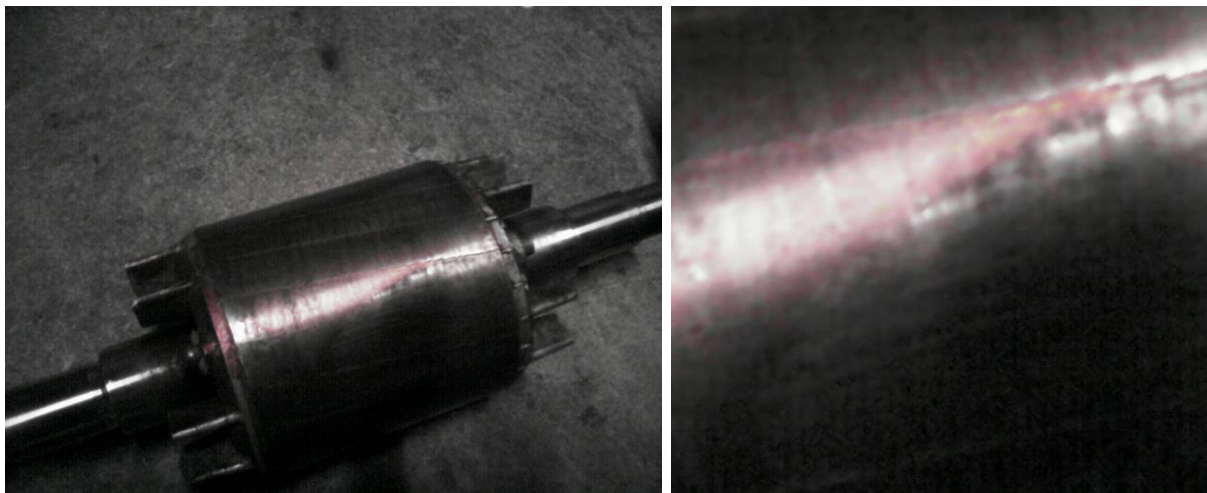
3.4.3.3 Naměřená spektra proudu



Obr. 22. – Naměřená spektra proudu s významnými postranními pásmy okolo první harmonické.



Obr. 23. – Naměřená spektra proudu: – a) postranní oscilace s rozstupem $\pm 2,5$ Hz; b) přibližně s periodou 5s se objevovaly i nižší rozestupy postranních pásem.



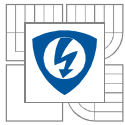
Obr. 24. – Rotor z demontovaného motoru: patrné jsou barevné stopy (mapy), které byly nejspíše důsledkem přehřátí plechů, což s nejvyšší pravděpodobností způsobila porucha rotorových tyčí.

3.4.3.4 Závěr 3. etapy měření

Měření ve 3. etapě bylo prováděno na motoru stojanové brusky se starším motorem středního výkonu, jenž přes volnou řemenovou převodovku poháněl dva 8 kg kotouče. Rozběh do dosažení ustálených otáček trval až 5s. Otáčky mírně oscilovaly okolo hodnoty o 10 nižší, než byly naměřeny naprázdno - 1480 min^{-1} , skluz mohl být tedy mírně vyšší, než je teoretická hodnota.

Okolo první harmonické byla naměřena významná postranní pásma, u nichž by mohlo být podezření na poruchu rotorových tyčí. Jejich frekvence se mírně lišily od vypočítaných frekvencí této poruchy. Bude-li však ve vzorci $f_{rt} = 50 \pm 1,3 k$, $k=2$, bude se jednat o spektrální *podpis* poruchy rotorových tyčí, který má odstup -25 až -30 dB.

Motor byl demontován a rozebrán, a na rotoru byly identifikovány barevné stopy. Ty nejspíše odpovídají následkům po přehřátí rotorových plechů, které bylo s nejvyšší pravděpodobností způsobeno nárůstem proudu rotorovými tyčemi v důsledku poruchy sousední tyče.



3.4.4 Měření 4. vzorku – ověření působení soustavy na motor u vertikální frézky

Ve čtvrté etapě měření bylo cílem ověřit, zda vřetenový motor starší frézky FGW nějak zásadně nepociťuje nesymetrii způsobenou defekty například na spojce nebo na převodovce. Důvodem k posouzení byla skutečnost, že motor zprvu „vybavoval“ jistič a pak došlo k poškození izolace. Ze strany vedení firmy byl tedy zájem, aby po převinutí stroje neprojevoval ještě nějaký další problém. S odstupem času bylo zjištěno, že závada byla na centrálním mazání, odkud unikal mazací olej. Za motorem byla spojka, pak zubový převod do vertikální polohy a dvoustupňová planetová převodovka. Vzhledem ke stáří stroje již nebyla nalezena odpovídající technická dokumentace.

3.4.4.1 Typ motoru



Vřetenový motor – Frézka - FGW 50
- rozběh Y/D, převod ozubenými koly
- označení motoru: 1M3001
D: 380V, 84A, 29kW, 1445 min⁻¹

Obr. 25. – Ilustrativní fotografie vřetenového motoru vertikální frézky FGW50.

3.4.4.2 Dupočítané kritické frekvence pro MCSA

$$n_s = \frac{60f_1}{p_p} = \frac{3000}{2} = 1500 \text{ min}^{-1} \quad (43)$$

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{1500 - 1445}{1500} = 0,036 \quad (44)$$

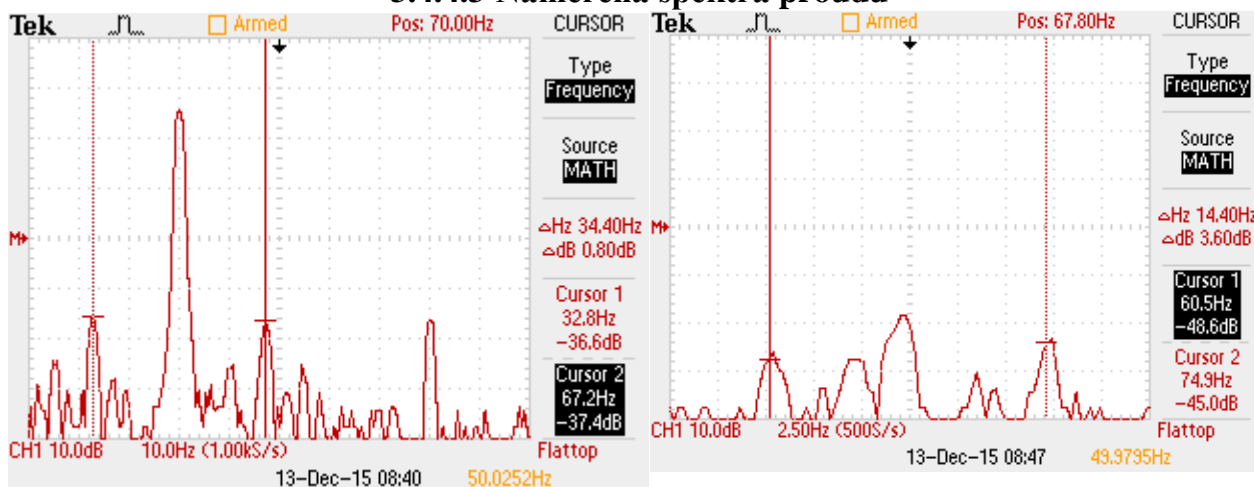
$$f_{rt} = f_1 \pm 2ksf_1 = 50 \pm 3,6 \text{ k Hz} \quad (45)$$

$$f_{rt2} = k_1f_1 \pm k_22sf_1 = 50k_1 \pm 3,6k_2 \text{ Hz} \quad (46)$$

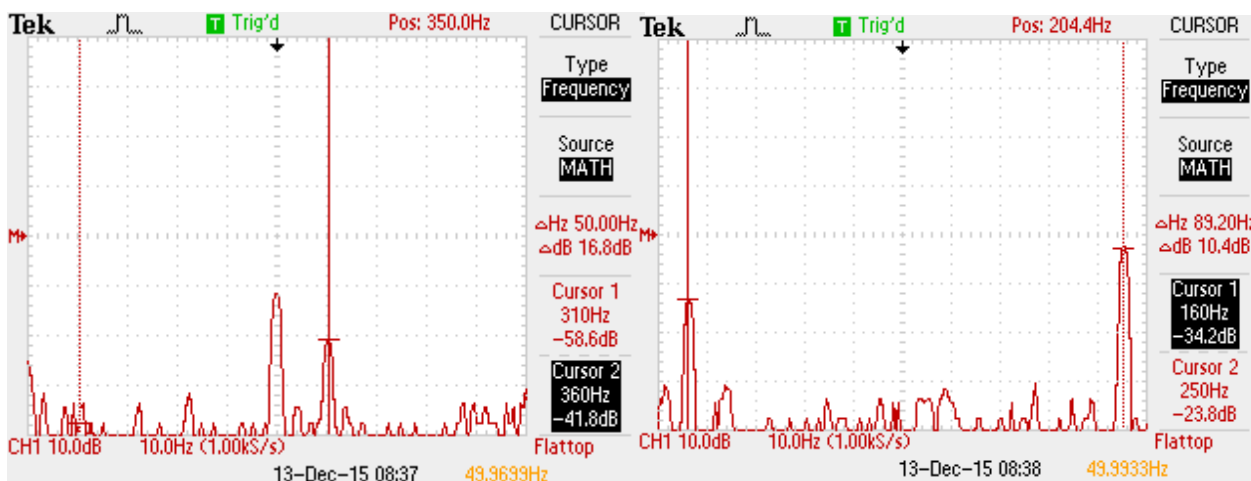
$$f_{ex} = f_1 \pm \frac{f_1}{p_p} = 50 \pm 25 \text{ Hz} \quad (47)$$

$$f_{ex2} = (k_1f_1n_{rb} + f_1) \pm f_r = (50 k_1n_{rb} + 50) \pm 25 \text{ Hz} \quad (48)$$

3.4.4.3 Naměřená spektra proudu



Obr. 26. – Naměřené proudové spektrum: postranní pásma okolo první harmonické poukazují na zatížení, jejich odstup o -40 dB neindikuje nic závadného.



Obr. 27. – Naměřená spektra proudu: na kmitočtech 160 a 360 Hz vznikají magnitudy, mají však odstup takřka -50 dB od první harmonické a nelze je ztotožnit se žádným z předpokládaným poruchovým stavem.

3.4.4.4 Závěr 4. etapy měření

V závěru etapy 4. měření bylo možné konstatovat, že z obrazů spektra nelze usuzovat na to, že by byl motor vystavován zvýšenému mechanickému riziku, pokud jde o jeho vinutí. Spektrum napětí nevykazovalo žádné abnormální frekvence a ze spektra jednotlivých fázových napětí bylo možné v mezích přesnosti měření usuzovat, že síť je symetrická. Stejně tak proudová spektra vykazovala stejné trendy. Ve spektru bylo možno předpokládat stopy zátěže, a výsledky vibrací okolo 160 a 360 Hz, šlo však o značný odstup od první harmonické. Vzhledem k tomu, že ke stroji již nebyla dostupná mechanická dokumentace, nebylo možné určit původce některých oscilací. Motor byl měřen opakovaně s odstupem 4 měsíců. V daném časovém odstupu nedošlo ovšem k žádným změnám a po odstranění problému s přimazáváním stroje se dokonce zlepšily i úrovně vibrací (nejvyšší vibrace na motoru v ose otáčení cca 0,005 mm).

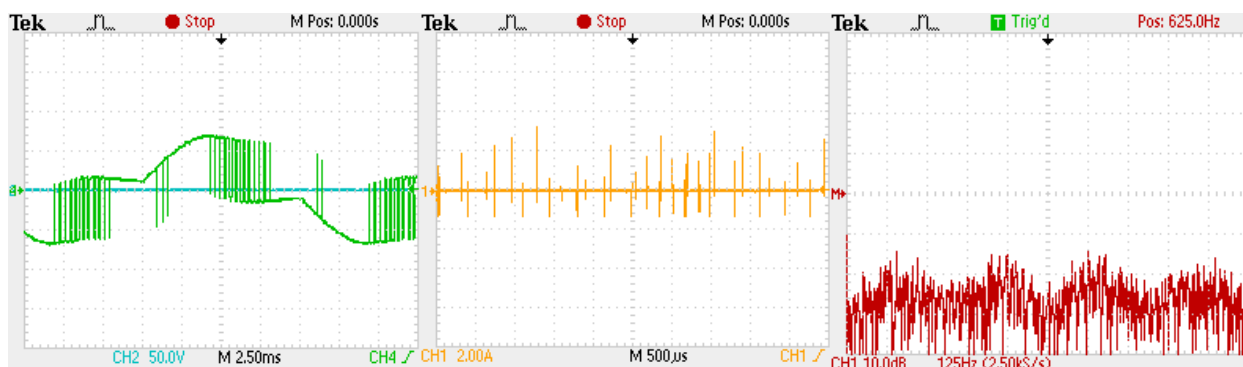
3.5 Měření ASM s kotvou nakrátko – napájeného z frekvenčního měniče

Následující měření se snažilo uvést do souvislostí spektrum proudu metodou MCSA a abnormálně zatížený asynchronní motor frekvenčně řízený s vektorovou regulací, která je využívána v moderních CNC řízených obráběcích strojích. V první řadě bylo nutné pokusit se nalézt způsob jak se ve spektru zorientovat. Zobrazíme-li spektrum napětí vytvořené měničem a proud při zatížení motorem, jeví se při náhodné modulační frekvenci chaotické a bez nějakých zvláštních zákonitostí. Když bylo zkoumáno spektrum napětí v závislosti na otáčkách, bylo odhaleno, že při dosažení určitých otáček dojde k zásadnímu zjednodušení spektra. Na 50 Hz, resp. na násobcích 50 Hz získává spektrum proudu stejné složky jako spektrum proudu motoru napájeného napětím rozvodné sítě, nebo přesněji sítě, ze které je napájen měnič. Proto byly přepočítány parametry motoru (u motorů u nichž se předpokládá frekvenční řízení, jsou parametry udávány pro určité druhy řízení) na frekvenci 50 Hz.

Abychom nastavili požadované otáčky, při kterých je modulační kmitočet 50 Hz, je nutné zohledňovat, že řídicí systém zobrazuje pouze otáčky vřetene, které je potřeba přepočítat na otáčky výstupu převodovky a dále na otáčky motoru. Řídicí systémy dovolují zobrazit výstup přímo z encoderu motoru, není-li ale otevřena tato opce, je výhodnější řídit se měřenou frekvencí statorového proudu a vypracovat si tedy převodovou tabulku mezi otáčkami vřetene a frekvencí první harmonické odebíraného proudu.

V parametrické tabulce (MP nebo MD) řídicího systému je vhodné změnit regulační konstanty a strmosti, tedy zhoršit parametry regulační smyčky (pokud nejde úplně vypnout), aby regulační vazba co nejméně zasahovala do průběhu proudu. Vedle toho je vždy nutné respektovat skutečnost, že všechny neaktivní osy a funkce je nutné odhlásit a deaktivovat, aby mohl být proces otáčení spuštěn.

Postup zřehlednění proudového spektra byl prověřen na měničích firem Heidenhain, Siemens, Fagor, které se používají k vektorovému řízení a regulaci u obráběcích strojů. U levnějších měničů sloužících k vektorovému řízení samotného motoru se tento postup nepodařilo aplikovat, protože fázové napětí je „konstruováno“ z izolovaných impulzů a točivé magnetické pole se vytváří až jako součtová složka sdružených napětí. Impulzní charakter se pak nutně promítá i do spektra proudu, ve kterém není první harmonická jednoznačně dominantní.



Obr. 28. – Levný měnič (Hitachi X200 -015SFEF) využívající skalární řízení otáček bez regulace: a) naměřený průběh napětí na měniči, b) průběh proudu motorem; c) spektrum proudu motorem.

3.5.1 Měření 5. vzorku – *prověření aplikace MCSA na motor napájený z kmitočtového měniče*

V páté etapě měření byl zkoumán vřetenový motor užívaný jako pohon vřeteníků o průměru uložení 130 mm, který je součástí horizontálních navrtávaček WRF firmy Fermat. Na motor je „zatepla“ nasunuta planetová převodovka, na jejímž konci je zubová třířadá řemenice s 68 zuby, druhá řemenice má 116 zubů a je přímo spojena výsuvným (730 mm) uložením, které je upevněno na třech ložiscích po obou stranách. Zprvu musela být sundána dvoustupňová planetová převodovka Baruffaldi, aby mohl být změřen proud protékající vinutím nezátíženého motoru.

Na motoru bylo připojeno i napájení pro ventilátor a zároveň i absolutní snímač otáček (který je pro vektorové řízení nutný). Motor byl ukotven k záběhové plotně.

3.5.1.1 Typ motoru a měniče



- Motor: Siemens – Simotics-
3~ 1PH8137 – 1MD03-1CC1;
 $P_n=19,5$ kW; $n_n=1150$ min⁻¹;
 $U_n=350$ V, $f_n=39,9$ Hz, $I_n=43$ A.

- Kmitočtový měnič Heidehain UM113 D,
PWM vektorová modulace s regulací na
konstantní moment, $f_{nos}=5$ kHz.

Obr. 29. – Ilustrativní fotografie motoru 1PH8137 s připojeným napájením z měniče kmitočtu, odměřování absolutního úhlu natočení a ventilátoru.

Na štítku motoru jsou uvedeny různé hodnoty pro různé parametry měničů. Napětíová hladina určuje moment, na němž je závislý skluz a na něm zase jmenovité otáčky a frekvence. Je tedy nutné zohlednit souvislost parametrů motoru vzhledem ke konkrétnímu měniči.

3.5.1.2 Dopočítané kritické frekvence pro MCSA

$$n_r = \frac{50}{f_n} \times n_s = \frac{50}{39,9} \times 1150 = 1441 \text{ min}^{-1} \quad (49)$$

$$n_s = \frac{60f_1}{p_p} = \frac{3000}{2} = 1500 \text{ Hz} \quad (50)$$

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{1500 - 1441}{1500} = 0,0393 \quad (51)$$

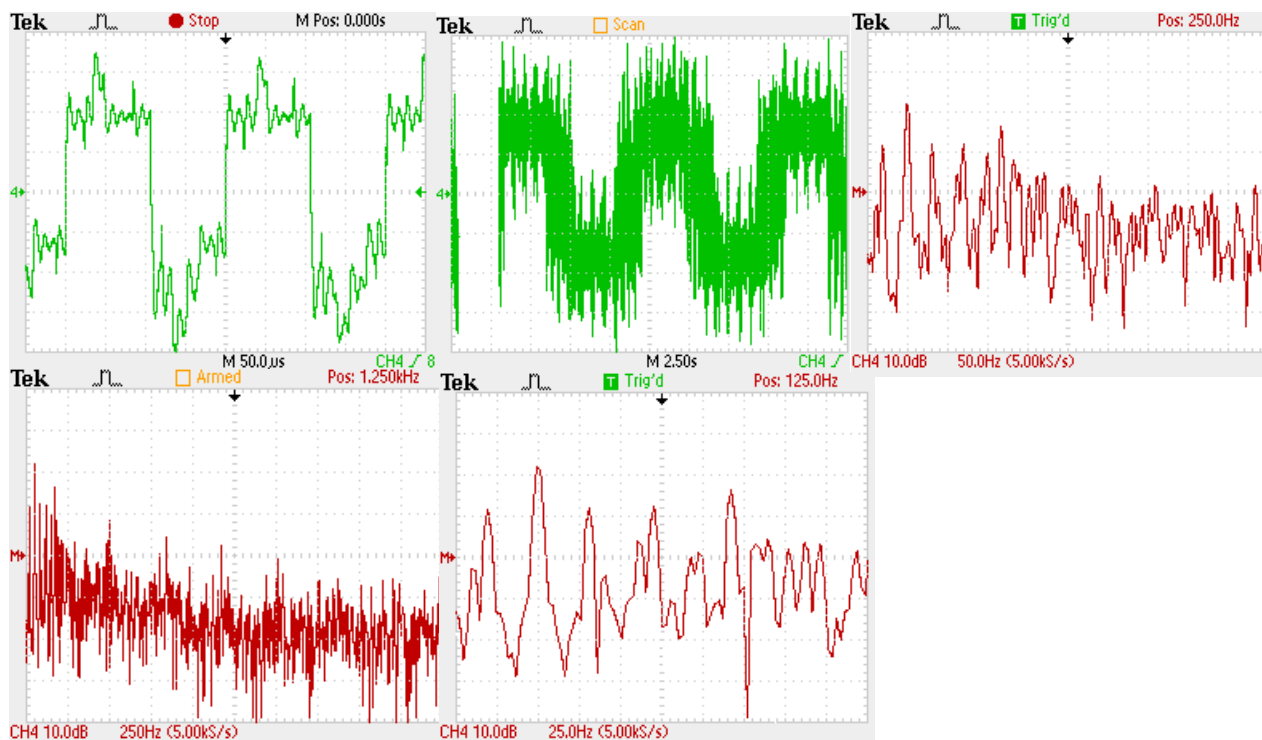
$$f_{rt} = f_1 \pm 2ksf_1 = 50 \pm 3,9k \text{ Hz} \quad (52)$$

$$f_{rt2} = k_1f_1 \pm k_22sf_1 = 50k_1 \pm 3,9k_2 \text{ Hz} \quad (53)$$

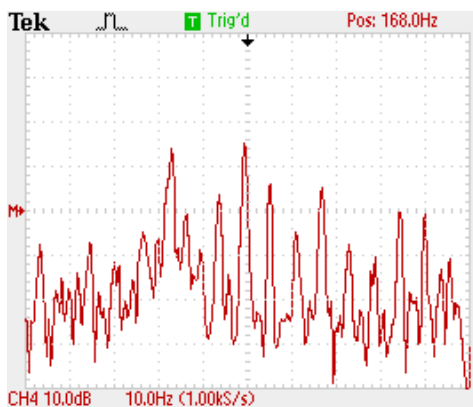
$$f_{ex} = f_1 \pm \frac{f_1}{p_p} = 50 \pm 25 \text{ Hz} \quad (54)$$

$$f_{ex2} = (k_1f_1n_{rb} + f_1) \pm f_r = (50 k_1n_{rb} + 50) \pm 25 \text{ Hz} \quad (55)$$

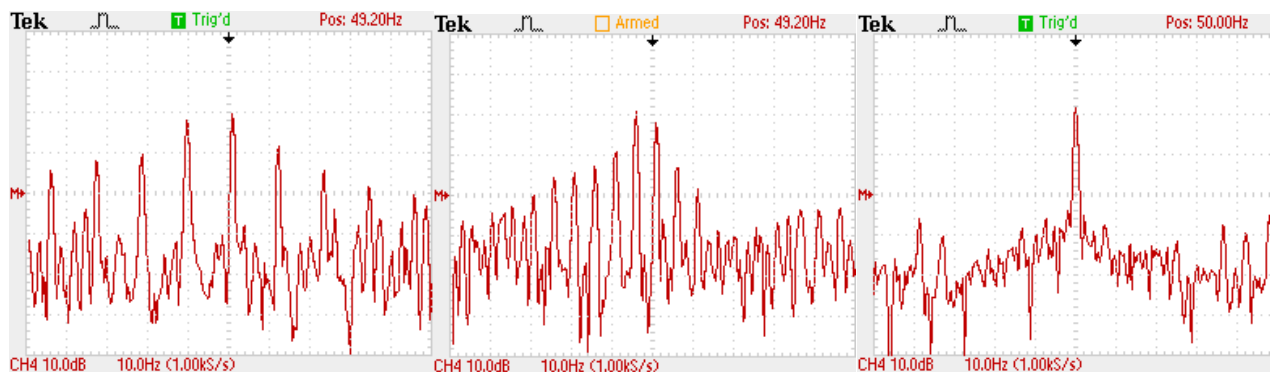
3.5.1.3 Naměřená spektra napětí a proudu



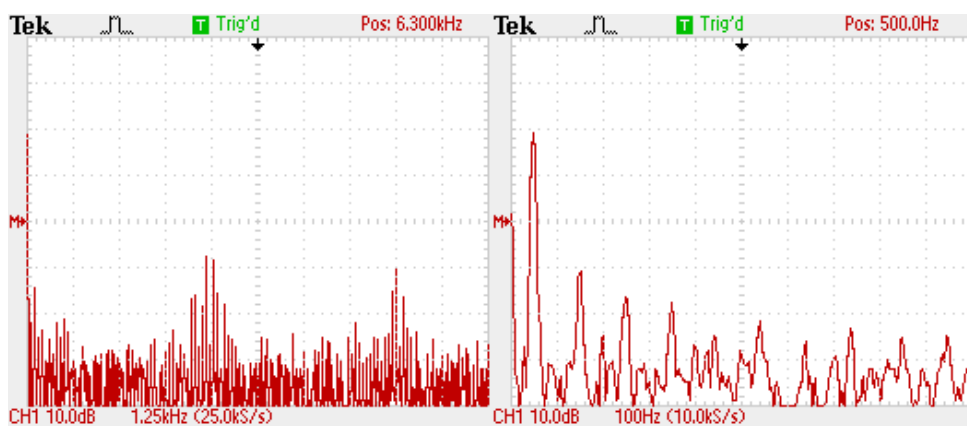
Obr. 30. – Naměřené průběhy a spektra napájení na výstupu měniče při náhodně zvolených otáčkách vřetene (100) a tedy při jiné modulační frekvenci než 50 Hz.



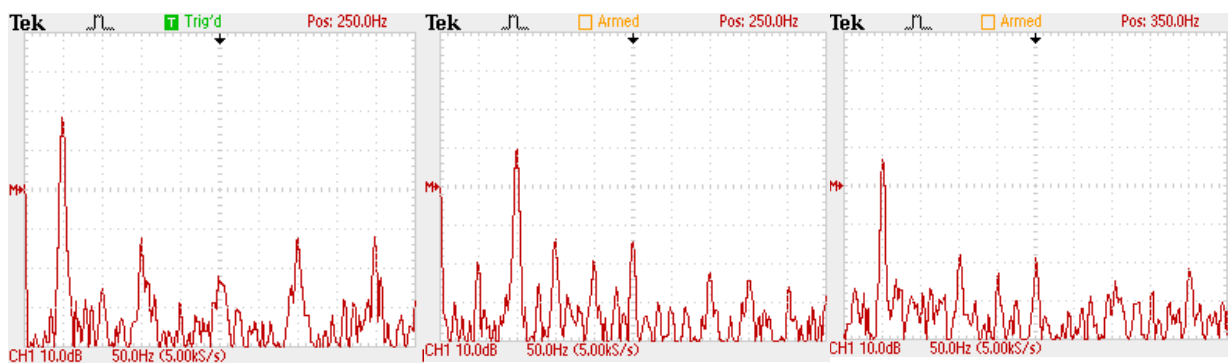
Obr. 31. – Naměřené spektrum napětí i za frekvenčním měničem stále obsahuje meziharmonickou 168 Hz.



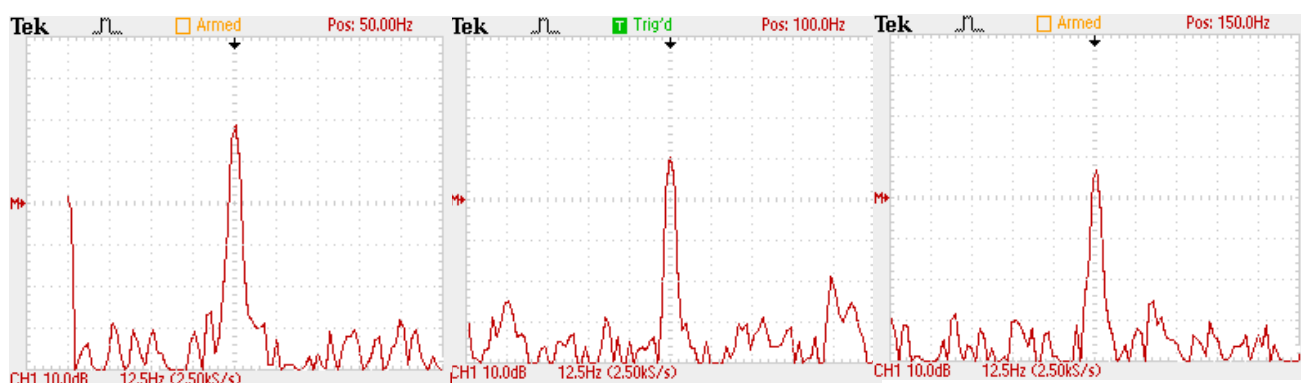
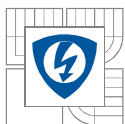
Obr. 32. – Naměřená spektra napětí na výstupu frekvenčního měniče: souvislost mezi proměnnou spektra a nastavováním otáček (výstupní modulační frekvence měniče) – Dochází ke křížení spektra sítě a měniče s rostoucími otáčkami (zleva doprava).



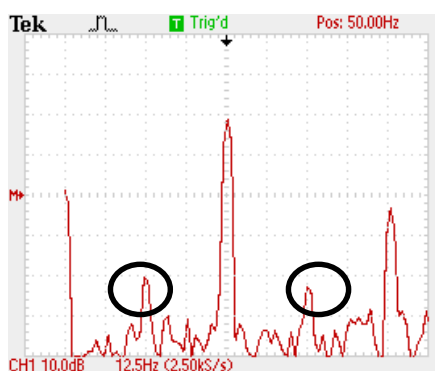
Obr. 33. – Naměřená proudová spektra při modulační frekvenci 50 Hz: kromě magnitud v okolí 5 kHz a jejich násobků (nosná frekvence) je spektrum analogické spektru proudu při harmonickém napájení.



Obr. 34. – Naměřené spektrum proudu nezatíženého motoru s nastavenou modulační frekvencí a) 50 Hz, b) 100 Hz, c) 150 Hz.



Obr. 35. – Naměřená první harmonická proudu při modulaci: a) 50 Hz, b) 100 Hz a c) 150 Hz.



Obr. 36. – Naměřené spektrum proudu při simulované značně nesymetrické zátěži (10 kg, s rozvážením 2 kg na každé straně): Vznikají postranní pásma ± 25 Hz okolo první harmonické, tedy spektrální podpisy zátěže.



3.5.1.4 Závěr 5. etapy měření

Zkoumáním souvislosti změn otáček spektra napájení a tedy i proudu, bylo zjištěno, že pro analýzu spektra jsou nejvýhodnější frekvence 50 Hz, 100 Hz a 150 Hz, protože se proudové spektrum prolíná se spektrem sítě. Jelikož na měniči nebylo možné sledovat otáčky motoru ale pouze vřetena, byly nalezeny otáčky vřetene pro frekvence 50 Hz, 100 Hz a 150 Hz; ty činily 255, 511, 767 min^{-1} . Výhoda možnosti měření proudu motoru na různých násobcích frekvence sítě spočívá v možnosti odmyslet vlivy sítě na průběh proudu. Porovnání výsledků na jednotlivých frekvencích umožňuje ještě více odfiltrvat vliv sítě. Navíc u frekvencí 100 Hz a 150 Hz si lze povšimnout subharmonické 50 Hz jež svou magnitudou identifikuje pouze vliv napájecí sítě na výstupní napětí z měniče. Přesto by bylo třeba provést hlubší zkoumání zaměřené na změny spektra při modulační frekvenci 100 Hz a 150 Hz. Měření tedy bylo provedeno s nastavenou frekvencí 50 Hz

V druhé části měření bylo, vlivem simulování silné nesymetrické zátěže, dosaženo vytvoření určitých spektrálních *podpisů*, jež odpovídají předpokládaným frekvencím. Vzhledem k výkonu motoru 19,5 kW nebylo možné dosáhnout větší nesymetrie zátěže, aby nedošlo k případnému poškození mechanických částí motoru. Bylo však prokázáno, že za určitých podmínek lze MCSA použít i na kmitočtově řízené motory a nemusí být tedy omezena na napájení z rozvodné sítě, jak je běžně uváděno v literatuře zabývající se analýzou asynchronního motoru. Aby mohl být takovýto motor napájen ze sítě, musel by být za běžných podmínek roztočen měničem a až následně připojen na síť. To byl i prvotní záměr těchto měření. Nepodařilo se však dosáhnout natolik harmonického přepnutí napájení, aby špička neaktivovala nadproudovou ochranu. Rovněž rozběh s využitím přepínače hvězda-trojúhelník u takovýchto motorů se ukázal jako nedostatečný.

Jelikož bylo měření prováděno na záběhové stolici, která je z hlediska architektury vstupů a výstupů stejná jako skutečný stroj, bylo nutné nasimulovat všechny odpojené koncové snímače, teplotní čidla, čidlo převodu a v systému odhlásit rotační snímač otáček z vřetene. Budou-li na skutečném stroji zkoumány otáčky samotného motoru, bude nutné pouze v systému odhlásit vřetenový rotační snímač a případný snímač z převodovky.

3.5.2 Měření 6. vzorku – *motor napájený frekvenčním měničem a zatížený převodovkou*

Předmětem 6. etapy měření byla snaha prokázat vliv planetové převodovky na spektrum proudu motoru z předchozího (5.) měření. Zprvu byla změřena spektra na frekvencích 50 Hz a 100 Hz při zařazení obou převodů a výsledky byly následně porovnány s proudovými spektry, které byly změřeny při nesymetrickém zatížení téhož motoru. Na motor byla „za tepla nasazena a připevněna převodovka, jejíž součástí byla i řemenice, jež se musela vyvážit.

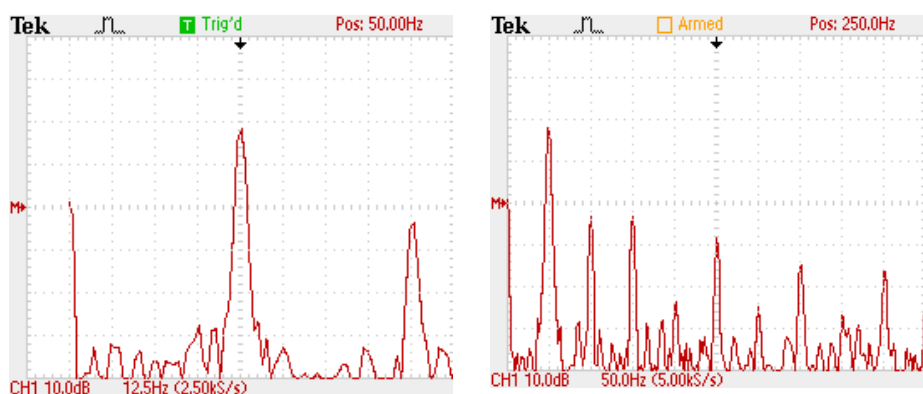
3.5.2.1 Typ převodovky



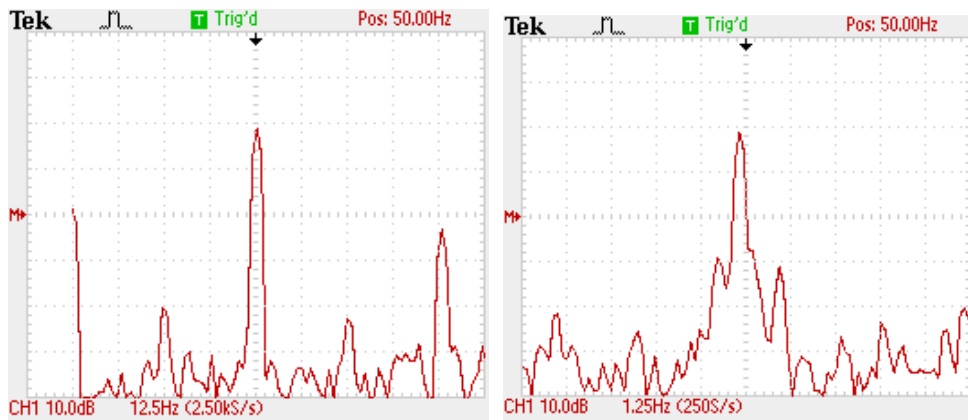
Obr. 37. – a) Ilustrativní uspořádání motoru; b), c) planetová dvoustupňová převodovka Baruffaldi – CE13, $i=4,923$; 60W.

3.5.2.2 Naměřená proudová spektra

- Motor zatížený pouze převodovkou

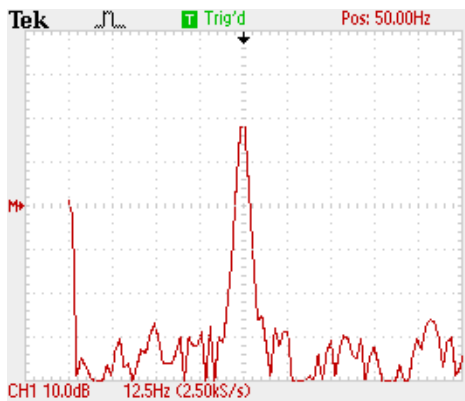


Obr. 38. – Naměřená spektra proudu, při zařazeném I. převodovém stupni s nastavenými otáčkami, jež odpovídaly modulačnímu kmitočtu 50 Hz. Kromě výrazné druhé harmonické nedošlo k významným projevům na spektru.

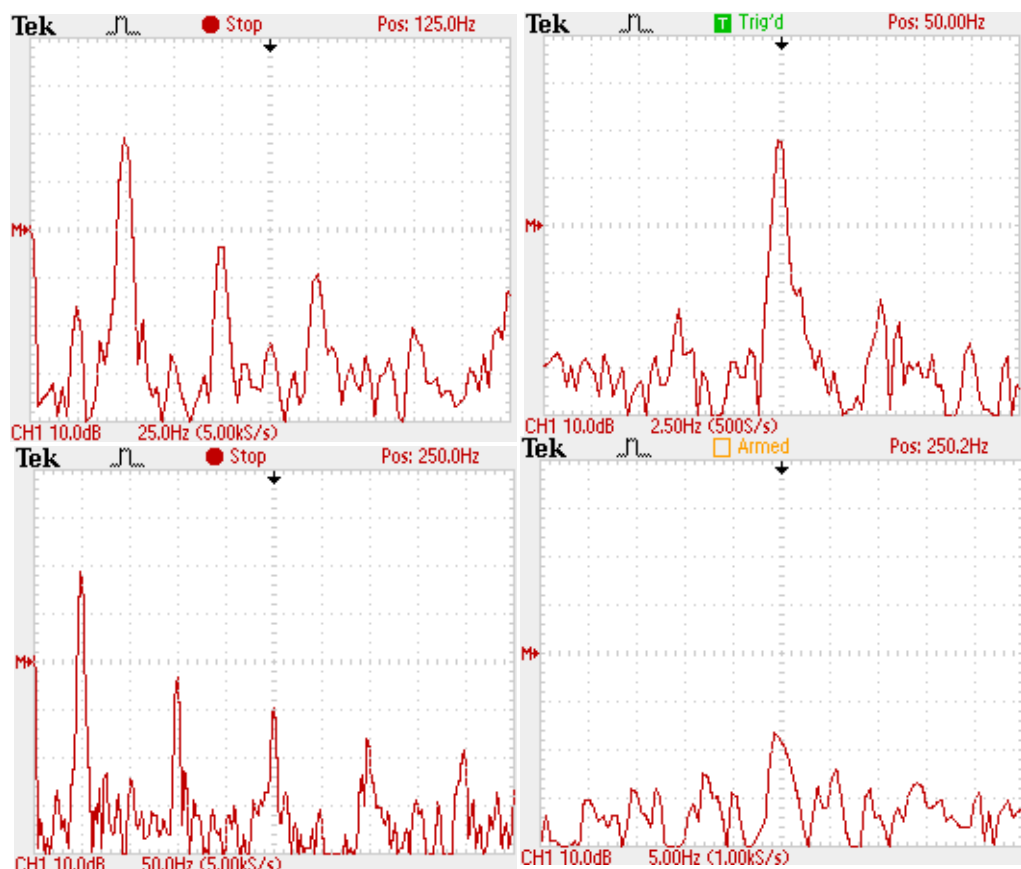


Obr. 39. – Naměřená spektra proudu, při zařazeném II. převodovém stupni s nastavenými otáčkami, jež odpovídaly modulačnímu kmitočtu 50Hz; otáčky na vřetenu 1255: a) II. převodový stupeň vytváří zátěž (pásma ± 25 Hz okolo 1. harmonické); b) pásma okolo ± 1 Hz značí zřejmě první ozubené kolo převodovky.

- Motor zatížený převodovkou s vytvořenou nesymetrickou zátěží (250g na řemenici o hmotnosti 8 kg)



Obr. 40. – Naměřené spektrum proudu (I. převodový stupeň, 50 Hz), se simulovanou nesymetrií zátěže.



Obr. 41. – Naměřená spektra proudu, II. převodový stupeň (50Hz) se simulovanou nesymetrií: a) okolo první harmonické se objevují stopy zátěže (pásma ± 25 Hz); b) dále jsou zde patrná postranní pásma ± 5 Hz, jež by mohla odpovídat vyššímu ozubenému kolu planetové převodovky; c) a d) patrný je i vznik postranních pásem okolo 250 Hz, jež s nejvyšší pravděpodobností odpovídaly zátěži při převodu cca 5.

3.5.2.3 Závěr 6. etapy měření

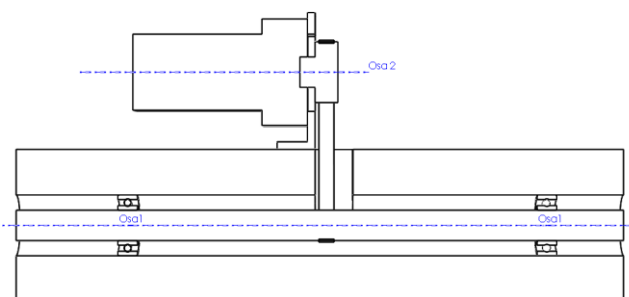
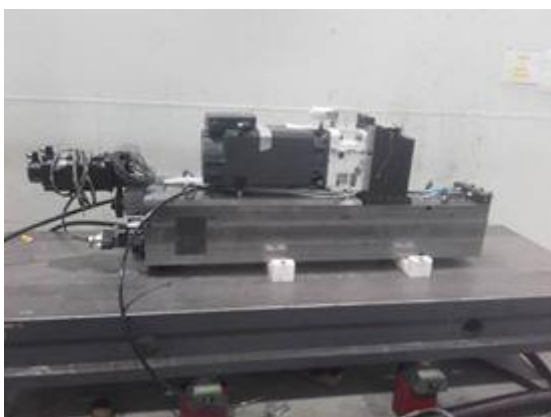
V 6. etapě měření byly k otáčkám, které odpovídají modulačnímu kmitočtu 50 Hz (255 min^{-1}), nalezeny i otáčky odpovídající druhému převodovému stupni (1255 min^{-1}). Měření při násobné frekvenci nebylo provedeno, protože na druhém převodovém stupni by mohlo dojít k poškození převodovky, nebo by byly překročeny maximální otáčky vřeteníku.

Simulace nesymetrie byla omezena vibračními limity převodovky. Patrné jsou rozdíly ve spektrech při různých převodových stupních a při zátěži a bez ní. Přesto však mohla být zátěž simulována pouze do 0,02 mm střední hodnoty vibrací (úchylky) na převodovce, což vytvářelo určité stopy ve spektru, avšak byly s tak velkým odstupem, že je nelze považovat za průkazné. Výsledkem měření tedy bylo, že nesymetrie za řemenic na převodovce svými vibracemi spíše poznamená mechanický stav převodovky než samotný motor. V následujícím měření bude poukázáno na to, že určité „ukotvení“ převodovky přes řemeny k vřeteníku nijak zásadně tento limit neovlivní.

3.5.3 Měření 7. vzorku – *motor jako součást vřeteníku horizontální navrtávačky*

Cílem sedmé etapy měření bylo získání poznatků o souvislostech předešlých měření s kompletním elektromechanickým systémem, který se používá u obráběcích strojů. Tedy systém: motor - převodovka - řemeny - vřeteník anebo motor - řemeny - převodovka - vřeteník. Přičemž první systém je šetrnější k převodovce, protože ji izoluje od zbytku mechanismu, zatímco druhý izoluje motor od hrozící poruchy převodovky. Řemeny jsou tedy určitým vibračním izolantem, jak se potvrdilo měřením, jehož sekundárním cílem bylo posouzení kvality elektromechanického systému.

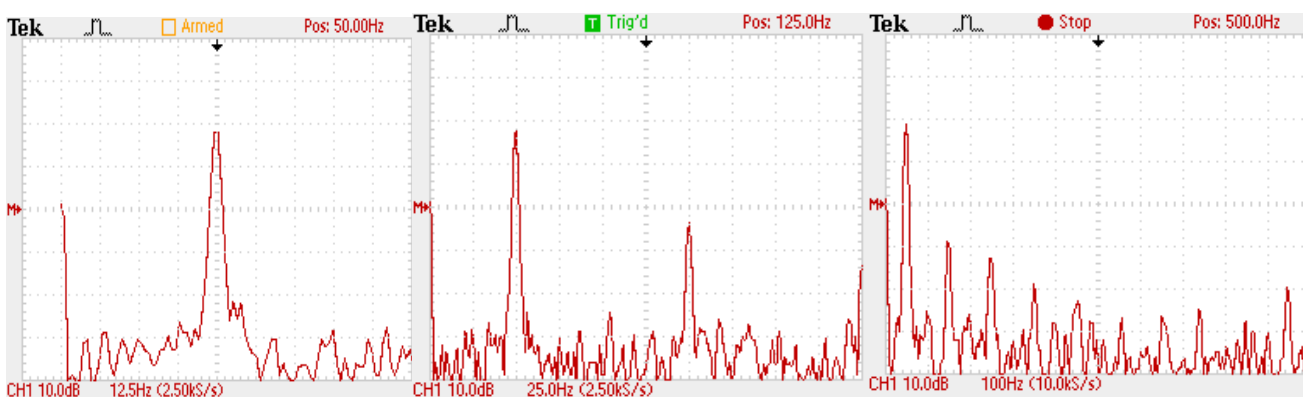
3.5.3.1 Vřeteník WRF 110



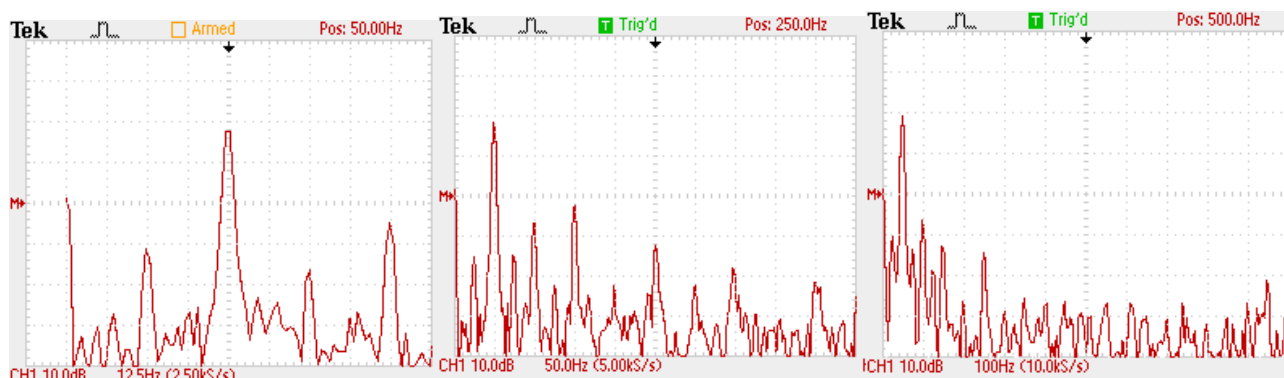
Obr. 42. – a) Ilustrativní fotografie uspořádání vřeteníku ukotveného k litinové plotně pomocí čtyřech šroubů přes distanční silonové držáky; b) ilustrace uspořádání přenosu točivého pohybu vřeteníku.

Měřen byl standardní vřeteník o průměru 110 mm, jež firma Fermat používá u svých horizontálních navrtávaček WRF. Převodový poměr mezi motorem a převodovkou je $I_1=4,923$ a převod mezi převodovkou a vřetenem je pomocí řemenic 68/116, tedy $I_2=0,586$. Převodový poměr vřeteníku na motor pak je buď 0,586, nebo 2,884. Při prvním převodovém stupni by se měly oscilace z vřetená projevovat na poloviční frekvenci vůči první harmonické, zatímco u druhého stupně do trojnásobku první harmonické. Před měřením bylo zkontrolováno napnutí řemenů a při samotném měření byly kontrolovány vibrace (úchytky) na převodovce.

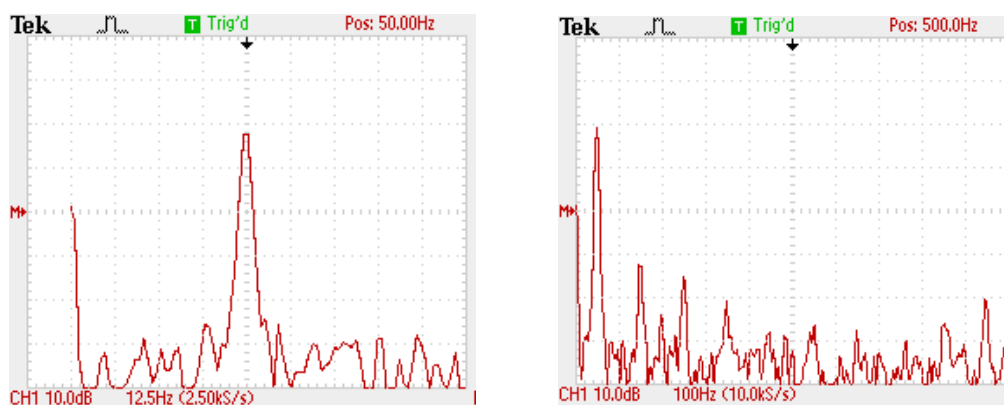
3.5.3.2 Naměřená proudová spektra



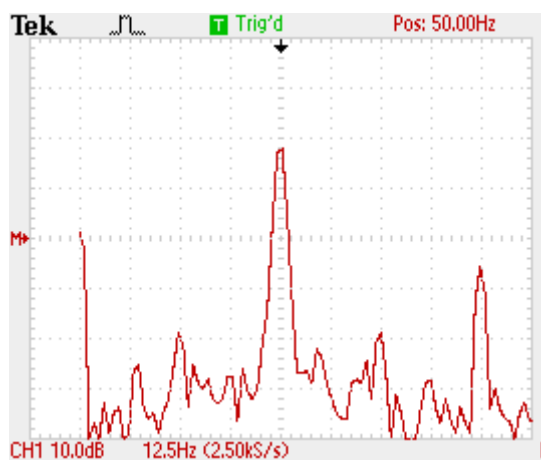
Obr. 43. – Naměřená proudová spektra na nezátíženém vřeteníku s otáčkami 255 min^{-1} (I. převodový stupeň), tedy na motoru řízeném 50 Hz.



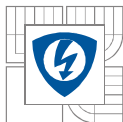
Obr. 44. – Naměřená proudová spektra na nezatíženém vřeteníku s otáčkami 1255 min^{-1} (II. převodový stupeň), tedy motoru řízeném 50 Hz.



Obr. 45. – Naměřená proudová spektra na nesymetricky zatíženém vřeteníku s otáčkami 255 min^{-1} (I. převodový stupeň).



Obr. 46. – Nesymetricky zatížený vřeteník s otáčkami 1255 min^{-1} (II. převodový stupeň) a tedy řízený 50 Hz.



3.5.3.3 Závěr 7. etapy měření

Předmětem 7. etapy měření byl nový vřeteník, jaký firma Fermat používá u svých navrtávaček WRF. Jednalo se o nově sestavený, zaběhnutý stroj, který byl ověřen vibračními a teplotními zkouškami. Na první harmonické bylo odhaleno, že na zátěž motoru má vliv spíše zařazený převodový stupeň, než samotná zátěž vřetena, což je logické, protože při druhém převodu jsou-li otáčky dvojnásobné, je moment poloviční. Nutno však podotknout, že zátěž nebyla nijak značná, aby zůstaly splněny vibrační limity nebo aby nedošlo k poškození uložení vřeteníku. Významná je rovněž oscilace okolo druhé harmonické při zařazeném druhém převodovém stupni, která je způsobena druhým převodovým kolem.

Ve spektru se nepodařilo nalézt oscilace vlivem nesymetrické zátěže v jiné podobě než jako pásma okolo první harmonické. Magnituda na 100 Hz byla způsobena pouze druhým převodovým stupněm. Pomocí MCSA lze tedy analyzovat oscilace na motoru způsobené převodovkou, ale ne již oscilace za řemenovým převodem. To vše za předpokladu, že je hlavní uložení v pořádku a zároveň lze předpokládat, že oscilace přenáší hlavní točivý systém a ne celá konstrukce vřeteníku. Výsledkem měření tedy bylo, že elektromechanický systém vřeteníku WRF vykazuje za normálních provozních podmínek takovou tuhost, že nesymetrie zátěže (což je u frézek a navrtávaček standardní stav) nemá z tohoto pohledu na motor negativní vliv.

3.5.4 Měření 8. vzorku - *aplikace na zabíhací a měřicí stolici*

V poslední, 8. etapě měření byla pomocí MCSA analyzována záběhová stolice firmy Feramat, která slouží k zabíhání, měření geometrií a kontrole obráběcích hlav. Vřeteník zde má větší tuhost než běžně vyráběné stroje protože zde není výsuv v horizontální ose. Stolice byla před měřením mechanicky repasována a prověřena z hlediska vibrací a teplot. Abnormalita byla sledována pouze u motoru, který silně píská a vibruje. Ložiska byla vyměněna a motor byl kompletně vyčištěn. Megmetem nebyl zjištěn žádný problém s izolací. Na měniči byl vyzkoušen jiný motor, který vykazoval standardní vlačnost. Lze tedy usuzovat, že jde o problém buď magnetického obvodu statoru, nebo problém rotorových tyčí.

Nejdříve byly podle typu motoru a použitého frekvenčního měniče odečteny specifické parametry motoru. Dále vypočítány kritické frekvence. Při měření byly nalezeny otáčky pro frekvenci 50 Hz. Nakonec byly odečteny vzorky spektra proudu.

3.5.4.1 Zabíhací a měřicí stolice oddělení obráběcích hlav



- Motor: Siemens 3~Mot 1PH7167-2nF23;
parametry dle měniče: $P_n=37$ kW;

$$n_n=1500 \text{ min}^{-1}; U_n=350 \text{ V},$$

$$f_n= 50,8 \text{ Hz}, I_n= 77,8 \text{ A}.$$

- Kmitočtový měnič Heidehain UM113 D, PWM vektorová modulace s regulací na konstantní moment, $f_{nos}= 5$ kHz.

Obr. 47. – Ilustrativní fotografie vřeteníku měřicí a záběhové stolice.

Skladba elektromechanické soustavy: vřetenový motor – převodovka Heynau (SGOO151-22371-311B, $I_1=5,5$), dále přes klínový řemen (s převodovým poměrem $I_2=74/124=0,596$) spojený se vřetenem 130 mm. Tedy výsledné převody jsou: 0,596 a 3,278.

3.5.4.2 Dopočítané kritické frekvence pro MCSA

$$n_r = \frac{50}{f_n} \times n_s = \frac{50}{50,8} \times 1500 = 1476 \text{ min}^{-1} \quad (56)$$

$$n_s = \frac{60f_1}{p_p} = \frac{3000}{2} = 1500 \text{ min}^{-1} \quad (57)$$

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{1500 - 1476}{1500} = 0,016 \quad (58)$$

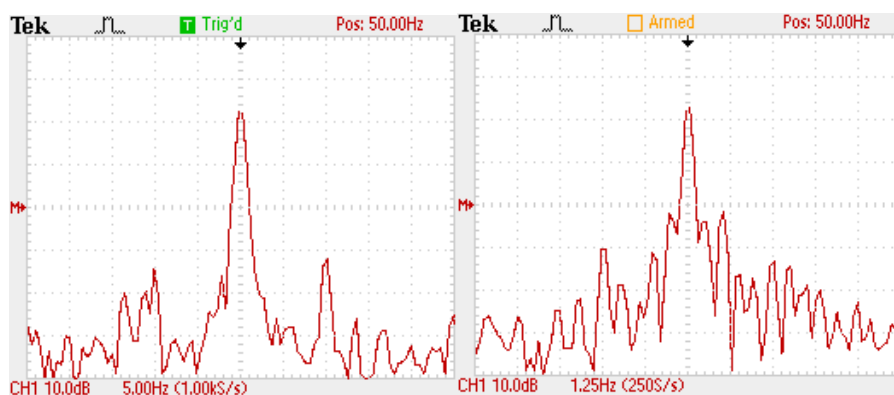
$$f_{rt} = f_1 \pm 2ksf_1 = 50 \pm 1,6k \text{ Hz} \quad (59)$$

$$f_{rt2} = k_1f_1 \pm k_22sf_1 = 50k_1 \pm 1,6k_2 \text{ Hz} \quad (60)$$

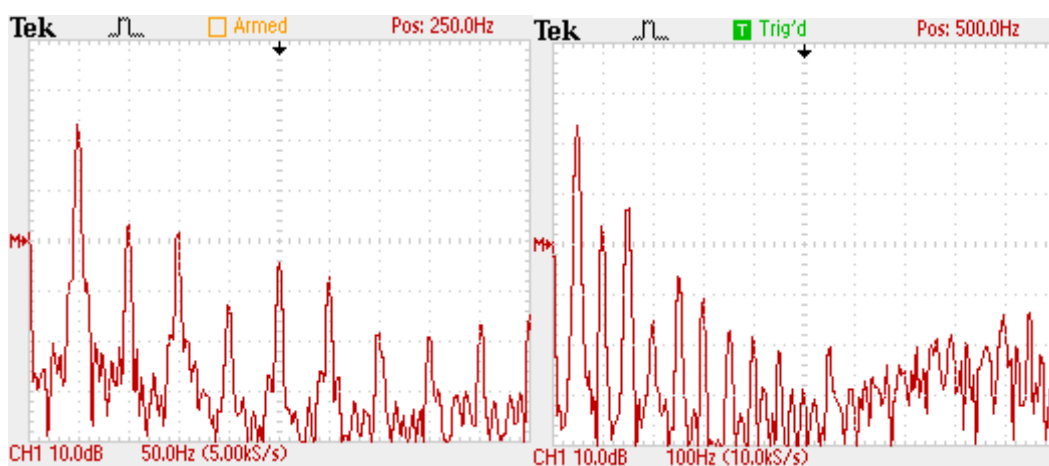
$$f_{ex} = f_1 \pm \frac{f_1}{p_p} = 50 \pm 25 \text{ Hz} \quad (61)$$

$$f_{ex2} = (k_1f_1n_{rb} + f_1) \pm f_r = (50 k_1n_{rb} + 50) \pm 25 \text{ Hz} \quad (62)$$

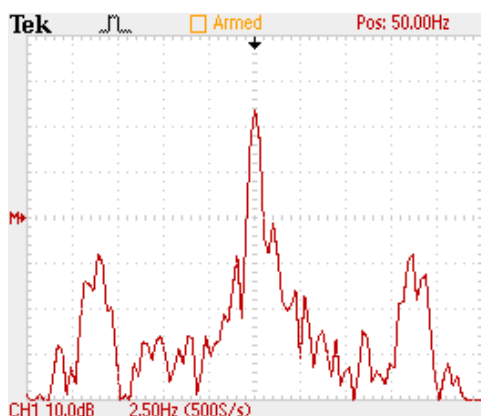
3.5.4.3 Naměřená proudová spektra



Obr. 48. – Naměřená postranní pásma okolo první harmonické proudu motorem: postranní pásma na frekvencích $\pm 0,8$ a $\pm 1,6$ Hz poukazují na zvýšenou pravděpodobnost výskytu problému rotorových tyčí měřeného motoru.



Obr. 49. – Naměřená postranní pásma okolo první harmonické proudu motorem: postranní pásma z předešlého měření se vyskytují i u vyšších harmonických, což rovněž spadá do teoreticky vypočítaných pro poruchy rotorových tyčí.



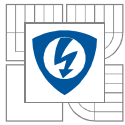
Obr. 50. – Naměřená postranní pásma okolo první harmonické proudu motorem: postranní pásma se tvoří i v oblasti ± 10 Hz, přičemž jejich magnituda narůstala se zvyšováním zátěže na vřetenu.



3.5.4.4 Závěr 8. měření

V poslední etapě byla vypracovaná metodika v předešlých měření aplikována na identifikaci motoru u záběhové stolice oddělení hlav, který byl přetěžován porouchanou převodovkou a zkoumáním vibračních limitů na obráběcích hlavách. I zde bylo konstatováno, že nelze identifikovat přesné oscilace za řemeny. Jelikož se náš zájem soustřeďoval na spektrální *podpisy* samotného motoru a ne převodovky, byla měření provedena pouze na prvním převodovém stupni, na kterém vzniká převod mezi motorem a zátěží okolo 0,6. Po nastavení takových otáček, aby modulační kmitočet měniče byl 50 Hz, se objevila ve spektru proudu okolo první harmonické dominantní postranní pásma, která splňovala teoreticky vypočítané oscilace pro poruchu rotorových tyčí. Vzhledem k tomu, že ostatní možné poruchy byly vyloučeny, je více než možné, že se jedná právě o poruchu rotorových tyčí. Při výměně ložisek však žádný defekt nebyl pozorován, čemuž by odpovídal i značný odstup postranních pásem od první harmonické.

Dominantní magnitudy okolo první harmonické na frekvencích ± 10 Hz lze s nejvyšší pravděpodobností přičítat oscilaci zátěže, která s takřka polovičním převodem neosciluje na frekvencích ± 25 Hz, jak bylo předběžně určeno výpočtem, ale na frekvenci poloviční, což by odpovídalo i skutečnosti, že narůstají se zátěží.



4 ZÁVĚR PRÁCE

Předkládaná práce se v teoretické části věnovala pojetí diagnostiky (2.1) a především provozní diagnostice jako nástroji údržby; klasifikovala a charakterizovala druhy poruch ASM (2.2) a podle toho zpracovala diagnostické metody (2.3). Hlavní zřetel byl věnován on-line diagnostice a především analýze spektra statorového proudu (2.3.2), který v sobě nese informace o stavu ASM v podobě charakteristických *podpisů*² ve spektru, tedy *Motor Current Signature Analysis* (podpisová analýza proudu motorem) (2.3.2.3.1) studující korelace mezi stavem zátěže a spektrem proudu u pohánějího ASM.

Praktická část byla věnována měření, ve kterých byla aplikována metoda MCSA. Před samotným měřením byly zpracovány základní požadavky na měřicí přístroje (3.1.1). Jelikož nejrozšířenější práce zabývající se MCSA [4], [5], [7], [8], [9], [10], [23] nezpracovávají samotnou realizaci měření, byla vypracována metodika a postup měření (3.2.2). Zde se jako klíčová ukázala znalost napájecího napětí, přičemž za signifikantní byly pojímány *podpisy* ve spektru proudu, které se neshodovaly se spektrem napětí.

Bylo provedeno osm etap měření: 1) první čtyři se snažily ověřit, demonstrovat a aplikovat metodu MCSA na ASM napájený „harmonickým“ napětím z rozvodné sítě 3x400 V, 50 Hz, což je běžná aplikace MCSA; 2) následující čtyři měření se pokoušela aplikovat metodu netradičně na motor napájený z frekvenčního měniče.

V první etapě měření (3.4) byly změřeny vzorky napájecího napětí a proudu u nezátěženého, zatíženého a nesymetricky zatíženého motoru, u kterého byla osa otáčení orientována kolmo nebo rovnoběžně. Bylo prověřeno spektrum napětí podle ČSN 61000-2-4 [21] vztahujících se k EMC v průmyslu. V dalším kroku byl změřen nový motor, čímž byla prokázána souvislost spektra proudu a napětí. Dále byla diferenciální analýzou odhalena korelace mezi napětím, proudem a různým způsobem simulovanou zátěží na jednom měřeném vzorku. Naměřená spektra byla porovnána s teoreticky vypočítanými frekvencemi, na kterých se konkrétní vlivy mají projevit (*podpisy* ve spektru). Došlo tak k ověření metody na jednom vzorku.

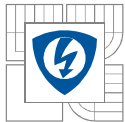
Výsledky druhé až čtvrté etapy měření jsou: 1) prokázání korelací na více měřených vzorcích; 2) provedení kontroly vlivu nesymetrické zátěže na motor přes řemenový převod (u vyvažovačky a stojanové brusky); 3) prokázání korelací mezi *podpisy* ve spektru proudu a poruchou rotorových tyčí (barevné stopy na rotoru jako možný následek přehřátí); 4) ověření vlivu převodovky na motor (u vertikální frézky).

Následovala čtyři měření ASM napájeného z frekvenčního měniče (3.5), přičemž bylo experimentálně zjištěno, že při generování napětí z vektorově řízeného frekvenčního měniče (jaký je používán u obráběcích strojů) o stejné frekvenci jako je napájecí síť, se spektrum proudu zjednoduší na analogickou podobu, kterou vytvoří ASM napájený přímo ze sítě. Na rozdíl od nepřehledného spektra proudu, které vzniká při kmitočtovém řízení na různých frekvencích, získáme velice signifikantní vzorky spektra, u kterých je možné poukazovat na konkrétní korelace. Předmětem měření tedy bylo aplikovat a ověřit tuto podobu metody MCSA i na frekvenčně řízený motor, což nebylo v dostupné literatuře nijak zvlášť diskutováno. Měřen byl samostatný motor, motor s převodovkou a soustava nového a staršího vřeteníku používaná u horizontálních navrtávaček Fermat WRF, ve všech případech bez zátěže a se simulovanou nesymetrickou zátěží.

Výsledky páté až osmé etapy měření jsou: 1) demonstrace proměn spektra napětí a proudu v závislosti na generovaných otáčkách motoru; 2) zachycení korelace mezi proudovým *podpisem* a formou zátěže; 3) prokázání tuhosti vřeteníku a „vibrační izolace“ mezi silně nesymetrickou zátěží (která je u frézek a navrtávaček běžná) a motorem, i při dosažení vibračních limitů; 4) prokázání, že i u staršího vřeteníku, při jeho vystavování silným vibracím a přetěžování, není elektromagnetický systém motoru výrazně namáhán.

Závěrem práce je tedy poznatek, že MCSA lze využít k diagnostice především výkonných motorů s velkými zátěžemi značného momentu setrvačnosti, u kterých nejsou tak výrazné parazitní frekvence napájecí sítě. U malých motorů je možné snadněji simulovat jednotlivé asymetrie zátěže. Přesto i u velkých

² Viz poznámka pod čarou na str. 12.

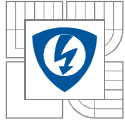


motorů napájených frekvenčními měniči využívanými u obráběcích strojů je MCSA vhodná především jako diferenciální diagnostika, ve které se srovnává proudové spektrum mechanicky vyváženého, optimalizovaného elektromechanického systému s aktuálním stavem a nejlépe se spektrálním *podpisem* již identifikované poruchy. V těchto případech je analýza signifikantní. Jde-li však o analýzu jako součást diagnostiky, která je prováděna takřka „naslepo“, tedy bez znalosti *podpisů* v různých stavech, lze mluvit o pouhé korelaci, vyjma oscilací způsobených zátěží a defektem rotorových tyčí, jež mají odstup od první harmonické menší jak -25 dB. Ve všech případech se ukázala nutná znalost stavu napájecí sítě, aby nedocházelo k záměnám „*podpisů*“ sítě a *podpisů* motoru.

Hlavním záměrem měření bylo posoudit meze a možné aplikace analytické metody MCSA v rámci provozní diagnostiky jako nástroje údržby a kontroly strojů ve výrobním podniku. Mezi hlavními výsledky práce tedy lze vyzdvihnout: 1) systematické zpracování aktuální diskuse týkající se diagnostiky a poruch u asynchronního motoru; 2) rozpracování, demonstrace a uplatnění metody MCSA v údržbářské praxi; 3) aplikace MCSA na kmitočtově řízený ASM.

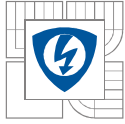
Meze práce jsou především určeny: 1) mezemi metody MCSA, která má pravděpodobnostní charakter (sleduje trendy ve spektru statorového proudu (*podpisy*) a jejich korelace s poruchami) a dokáže sledovat jen změny, které mají elektromechanický původ; 2) rozsahem práce a s tím i související omezené množství měřených vzorků; 3) omezeným časovým horizontem, ve kterém mohla být sledována korelace mezi proměnami stavu stroje a projevem ve spektru proudu; 4) technickým omezením, které nedovolovalo měřit symetrii proudu a napětí, ani zemní proudy, a nakonec i provádět srovnání výsledků MCSA s analýzou spektra vibrací.

Ve světle uvedeného se tedy MCSA jeví vhodná především jako nástroj historické a diferenciální diagnostiky, tedy diagnostiky sledující korelace mezi vývojem stavu stroje a projevy ve spektru proudu, a diagnostiky, která analyzuje proměny spektra proudu v závislosti na změnách struktury elektromechanického systému.



BIBLIOGRAFIE

- [1] CIGÁNEK, L. *Stavba elektrických strojů*. Praha: SNTL, 1958.
- [2] VESELKA, F. a VALOUCH, V. *Laboratoře elektrických strojů a přístrojů*. Brno: VUT v Brně, Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2006.
- [3] KREDL, M. *Diagnosticke systémy*. Praha: ČVUT, 1997. ISBN 80-01-02349-4.
- [4] MERTLÍK, V., a další. *Diagnostika elektrických zařízení*. Praha: BEN technická literatura, 2008. ISBN 978-80-7300-2.
- [5] JAKSCH, I. *Metody diagnostiky indukčních motorů*. [On-line] [Citace: 12. 12. 2015.] http://www.rss.tul.cz/download/tdg/P10_diag_motoru_ESF.pdf.
- [6] VDOLEČEK, F. *Spolehlivost a technická diagnostika*. Brno: FSI VUT v Brně, 2002.
- [7] PANDEY, K K, ZOPE, P H a SURALKAR, S R. Review on Fault Diagnosis in Three-Phase Induction Motor. *Three-Phase Induction Motor. IJCA Proceedings on National Conference "MEDHA 2012"*. MEDHA, 2012, stránky 53-58.
- [8] PILLONI, A., a další. Fault Detection in Induction Motors. [editor] Fouad Giri. *AC Electric Motors Control - Advanced Design Techniques and Applications*. University of Caen Basse-Normandie, France, 2013, stránky 275-312.
- [9] PENROSE, H. Large Electric Motor Reliability: What Did The Studies Really Say? *Maintenance Technology*. [On-line] 2012. [Citace: 12. 12. 2015.] <http://www.maintenancetechnology.com/2012/03/large-electric-motor-reliability-what-did-the-studies-really-say/>.
- [10] MIA, J.H., a další. International Conference on Computer Information Systems and Industrial Applications. *Research on the Current Eigenfrequencies for Motor with Bearing Fault and Mixed Eccentricity*. [On-line] 5. 2015. [Citace: 12. 12 2015.] http://www.atlantis-press.com/php/download_paper.php?id=22661.
- [11] BONALDI, E. L., a další. *Predictive Maintenance by Electrical Signature Analysis to Induction Motors*. [On-line] 2012. [Citace: 15. 4. 2016.] <http://www.intechopen.com/books/induction-motors-modelling-and-control/predictive-maintenance-by-electrical-signature-analysis-to-induction-motors>.
- [12] SOKANSKÝ, K. *Diagnostika vybraných poruch asynchronních motorů pomocí proudových spekter*. [On-line] [2010]. [Citace: 12. 12. 2015.] http://www.cmms.cz/archiv-clanku/doc_download/36-diagnostika-proudovych-spekter.html.
- [13] BERNAT, Petr. VŠB-TU. *On-line diagnostika elektrických strojů točivých*. [On-line] 2015. [Citace: 12. 12. 2015.] <http://homen.vsb.cz/~ber30/texty/diagnostika/DIAGO98.pdf>.
- [14] CHMELÍK, K., FOLDYNA, J. a MIŠÁK, S. ZCU, FEI. *Magnetické pole v okolí asynchronního stroje, jeho zjišťování a využití*. [On-line] 13. 09. 2007. [Citace: 12. 12. 2015.] <http://ketsrv.fel.zcu.cz/diagnostika/konference/Sbornik/Sekce2/27.pdf>.
- [15] TEKTRONIX_TDS2024C. *Technická dokumentace k osciloskopu TEKTRONIX_TDS2024C*. [On-line] [Citace: 12. 12 2015.] http://www.produktinfo.conrad.com/datenblaetter/100000-124999/122480-an-01-cs-TEKTRONIX_TDS2024C_200MHZ_4_CH__OSZILOSK.pdf.
- [16] [MATFYZ, UK]. *On line skripta elektroniny*. [On-line] 2002. 3 7. [Citace: 4. 4. 2016.] http://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/elektronika/kap4/4_2.html.
- [17] ČSN IEC 50(161). *Mezinárodní elektrotechnický slovník - Elektromagnetická kompatibilita*. Praha: Český normalizační institut, 1996. 334201.



- [18] SVAČINA, J. *Elektromagnetická kompatibilita*. [On-line] [Citace: 4. 4. 2016.] <http://www.radio.feec.vutbr.cz/emc/prezentace.pdf>.
- [19] VŠB TU, FEI. *Elektromagnetická kompatibilita - 1 Základní pojmy, normalizace*. [On-line] [Citace: 3. 3. 2016.] http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/FEI/EMC/sylaby/1_Zakladni_pojmy_normalizace.pdf.
- [20] PATOČKA, M. *Vybrané statě z výkonové elektroniky svazek II. - Pulzní měniče bez transformátoru*. Brno: VUT v Brně, 2005.
- [21] ČSN EN 61000-2-4. *Elektromagnetická kompatibilita (EMC). Prostředí - Kompatibilní úroveň pro nízkofrekvenční rušení šířené vedením vprůmyslových závodech*. Praha: Český normalizační institut, 2003. 333432.
- [22] SMETANA, J. *Měření a vyhodnocování kvality elektrické energie zdroj úspor podniku*. [On-line] 10. 3 2016. [Citace: 4. 4 2016.] http://www.odbornecasopisy.cz/data-ftp-user/konference/2016/Energie_pro_budoucnost_AMPER_2016/05_SMETANA.pdf.
- [23] WIDUP, R. *Large Motor Maintenance: Basics For Machine Reliability*. [On-line] 2008. [Citace: 12. 12 2015.] <http://www.maintenancetechnology.com/2008/09/large-motor-maintenance-basics-for-machine-reliability/>.
- [24] BERNAT, P. VŠB-TU. *Vybrané problémy provozní diagnostiky elektrických strojů*. [On-line] 1999. [Citace: 12. 12. 2015.] <http://homen.vsb.cz/~ber30/texty/diagnostika/Plzen99.pdf>.
- [25] MERLÍK, V. *Aspekty a perspektivy diagnostiky elektrických silnoproudých zařízení*. [On-line] 11. 2014. [Citace: 12. 12. 2015.] <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/aspekty-a-perspektivy-diagnostiky-elektrickyh-silnoproudych-zarizeni--13892>.
- [26] ČERNÝ, V. *Měření proudu na základě Hallova jevu*. *Elektro*. Praha, 1997.
- [27] PATOČKA, M. *Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřící technice a silnoproudé elektronice*. Brno: VUT, 2011. ISBN 978-80-214-4003-6.
- [28] HUDECZEK, M. *ABC kontroly elektromotoru*. *Elektrotechnika v praxi*. Ostrava, 1991.
- [29] MATTHES, W. *Hledání a odstraňování poruch*. Praha: BEN, 2001. ISBN 80-86167-18-6.

