



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A
BIOMECHANIKY**

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

**VLIV FREKVENČNÍHO MĚNIČE NA ŽIVOTNOST LOŽISEK
A JEJICH POŠKOZENÍ**

THE INFLUENCE OF THE FREQUENCY CONVERTER ON THE LIFE AND DAMAGE OF BEARINGS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Adam Sukovatý

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Nahodil

BRNO 2018

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student: **Bc. Adam Sukovatý**
Studijní program: Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor: Mechatronika
Vedoucí práce: **Ing. Petr Nahodil**
Akademický rok: 2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Vliv frekvenčního měniče na životnost ložisek a jejich poškození

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Firma Siemens Electric Machines s.r.o. je výrobcem asynchronních a synchronních motorů a generátorů. V dnešní době je stále více elektromotorů používáno ve spojení s frekvenčními měniči. Toto spojení přináší řadu úskalí z hlediska poškozování valivých ložisek jak na vlastních motorech, tak na poháněcích zařízeních. Úkolem diplomové práce je popsat vlivy, které toto poškození způsobují a navrhnout opatření pro zabránění poškození ložisek elektromotoru.

Cíle diplomové práce:

V diplomové práci se soustředíte na následující cíle:

1. Pojednejte obecně o vibrodiagnostice a elektrodiagnostice a jejich přínosu při zkoušení strojů se zaměřením na motory a generátory.
2. Vytvořte návrh diagnostického systému pro testování soustavy frekvenční měnič a elektromotor.
3. Navrhněte metodiku měření.
4. Realizujte vybraná měření a proveďte jejich vyhodnocení.
5. Z provedených měření popište vlivy, které mají vliv na životnost ložisek motorů.
6. Dosažení výsledky řešení úkolů zhodnoťte a navrhněte opatření s ohledem na prodloužení životnosti valivých ložisek.

Seznam doporučené literatury:

BILOŠ, Jan a BILOŠOVA, Alena. Aplikovaný mechanik jako součást týmu konstruktérů a vývojářů: část vibrační diagnostika. 1.vyd. Ostrava 2012, VŠB – TU Ostrava, fakulta strojní.

CHMELÍK, Karel, POSPISILÍK, Jiří a FOLDYNA, Jiří. Ložiskové proudy v elektrických strojích, 1 .vyd. Ostrava 2008. VŠB-TU Ostrava. ISBN 978-80-7225-290-9.

KREIDL, Marcel a ŠMID, Radislav. Technická diagnostika. Senzory-metody-analýza signálu. 1.vyd. Praha BEN – technická literatura, 2006. 408 s. ISBN 80-7300-158-6.

HELEBRANT, František a ZIEGLER, Jiří. Technická diagnostika a spolehlivost, II. Vibrodiagnostika . 1. vyd. Ostrava 2005, VŠB-TU Ostrava. ISBN 80-248-0650-9.

HUDECZEK, Mečislav, Zvyšování spolehlivosti asynchronních elektromotorů včetně poháněných strojů. Ostrava 2011, Hudeczek Service s.r.o.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Tato práce zkoumá vliv frekvenčního měniče na životnost valivých ložisek u asynchronního motoru. Měření bylo provedeno v Laboratoři spínacích přístrojů elektrotechnické fakulty na soustavě frekvenční měnič a elektromotor od firmy Siemens. Data byla zpracována pomocí měřicího analyzátoru Adash VA4 Pro. Byly použity metody měření širokopásmových hodnot a frekvenční analýzy vibrací a proudu.

Zjištěná vzájemná podobnost frekvenčních spekter vibrací a proudu prokazuje přítomnost vysokofrekvenčních kapacitních proudů, které prochází přes ložiska motoru a snižují jejich životnost. Byla navržena opatření, která by tomuto měla zabránit. V druhé části měření byl zdokumentován vliv změny pulzní šířkové modulace (PWM) na vibrace motoru. Cílem bylo provést základní analýzu a poskytnout podklady k dalšímu výzkumu.

Klíčová slova

frekvenční měnič, asynchronní motor, RMS vibrace, FFT, valivá ložiska, kapacitní proud, pulzní šířková modulace, Adash VA4 Pro

Abstract

This thesis deals with the effect of frequency inverter on the lifetime of roller bearings. The measurement has been carried out on the frequency inverter and induction motor by Siemens in the Switchgear laboratory of Faculty of electrical engineering and communication. Data has been recorded and processed on Adash VA4 Pro analyzer. Methods of measuring RMS values and frequency analysis of vibration and current were used for the analysis.

Based on the mutual similarity of frequency spectrum, the presence of the high frequency capacitive current in the bearings has been proven. To prevent this, possible solutions have been presented. In the second part of the experiment an effect of changing pulse width modulation (PWM) on vibration was examined. The goal was to make a basic analysis and to provide background material for further research.

Keywords

frequency inverter, induction motor, RMS vibration, FFT, roller bearings, capacitive current, pulse width modulation, Adash VA4 Pro

Bibliografická citace

SUKOVATÝ, A. *Vliv frekvenčního měniče na životnost ložisek a jejich poškození*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 65 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Nahodil.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně podle pokynů vedoucího diplomové práce a že jsem uvedl všechny použité zdroje a literaturu.

V Brně dne

.....
Bc. Adam Sukovatý

Poděkování

Rád bych poděkoval především vedoucímu práce Ing. Petru Nahodilovi za cenné rady a odborné vedení při zpracování mé diplomové práce.

Obsah

Úvod.....	11
1 Vibrační diagnostika	12
1.1 Základní pojmy kmitavého pohybu	14
1.2 Vzájemná závislost mezi měřenými veličinami.....	15
1.3 Vliv frekvenčního rozsahu na volbu měřené veličiny.....	16
1.4 Použité metody.....	17
1.4.1 Měření širokopásmových hodnot vibrací a proudu	17
1.4.2 Frekvenční analýza vibrací a proudu	17
2 Elektrodiagnostika	18
2.1 Hřídelová napětí a ložiskové proudy.....	18
2.2 Kapacitní proudy	19
2.2.1 Princip měniče	19
2.3 Vnější zdroje proudu	21
2.4 Další typy měření	22
3 Diagnostický systém pro testování soustrojí motor-měnič-generátor	23
3.1 Seznámení se soustavou měnič-motor-generátor	23
3.2 Měření proudu	24
3.3 Měření vibrací	24
3.3.1 Uchycení čidel vibrací	25
3.4 Měření otáček.....	26
3.5 Zpracování měření	27
3.5.1 Datakolektor ADASH VA4 Pro	27
3.5.2 Virtuální analyzátor a nastavení čidel.....	28
3.5.3 DDS (Digital Diagnostics System)	30
4 Metodika měření	31
4.1 Porovnání proudu a vibrací	31
4.2 Vliv změny pulzní frekvence na vibrace.....	31
5 Realizace měření.....	33
5.1 Porovnání pulzní frekvence v mechanických vibracích a v napájecím proudu.....	33
5.2 Měření vibrací motoru v závislosti na velikosti pulzní frekvence	40
5.2.1 Závislost rychlosti vibrací na změně pulzní frekvence.....	40
5.2.2 Závislost zrychlení vibrací na změně pulzní frekvence.....	43
6 Vyhodnocení měření.....	49
6.1 Vyhodnocení prvního měření a návrh opatření.....	49

6.1.1	Aplikace uzemňovacího kartáče.....	50
6.1.2	Použití filtrů na vstupu měniče.....	50
6.1.3	Použití motorové tlumivky a filtrů na výstupu měniče	51
6.1.4	Hybridní ložisko	52
6.1.5	Použití vhodných symetrických stíněných kabelů	53
6.1.6	Důkladné pospojování neživých částí soustavy	53
6.1.7	Důraz na odstranění mechanických nesymetrií již při konstrukci stroje ..	53
6.2	Vyhodnocení druhého měření	54
Závěr.....		55
Použité zdroje.....		57
Seznam obrázků		59
Seznam proměnných		61
Přílohy		62

Úvod

V posledních letech se čím dál častěji setkáváme s termíny digitalizace, Průmysl 4.0, chytrá města nebo internet věcí. Souvisí to s rozvojem technologií a zařízení, která jsou schopna zaznamenávat a přenášet mezi sebou velké množství dat. Analýza získaných dat poté může vést k optimalizaci procesů v průmyslu, v dopravě, ve zdravotnictví nebo v zemědělství. Realizace nových moderních postupů a mechanismů dnes pomalu dostává reálné kontury, i když stále jde o běh na dlouhou trať. Inženýry, vývojáře, programátory i politiky čeká ještě mnoho nejen technologických výzev. Pokud se zaměříme na průmysl, který má historicky v České republice důležitou roli, aplikace nových myšlenek a inovací by mohla tuto pozici ještě posílit, zlepšit produktivitu a také konkurenceschopnost firem, které chtějí být na technologické špičce.

Základním stavebním kamenem většiny průmyslových odvětví jsou pohony. Tato práce se zabývá zejména elektromotory, frekvenčními měniči a generátory. První pohony se objevily již v průběhu 19. století a od té doby prošly výrazným vývojem. Díky počítačovým simulacím, novým materiálům a zpřesnění výrobních procesů došlo v poslední době k významné optimalizaci mechanické konstrukce motorů a generátorů. Současně byl kladen důraz i na zvýšení účinnosti a snížení ztrát v pohonech. K tomu v posledních desetiletích výrazně přispěl nástup frekvenčních měničů, což přineslo lepší regulovatelnost a nové možnosti v oblasti řízení pohonů. Účinnosti rotujících strojů dnes běžně dosahují přes 90%, s frekvenčním měničem ještě více. Přes veškerý výzkum a vývoj však stále přetrvávají poruchy a problémy s regulovanými pohony. Jsou to přitom pohony, které často představují nepostradatelný článek složitého výrobního, zpracovatelského nebo těžebního řetězce.

Role údržby je v takových případech zásadní, ale v podnicích podceňovaná. Včasné odhalení a diagnostika nestandardního chování strojních zařízení může zabránit pozdější havárii, prolukám a ušetřit nemalé finanční výdaje na náhradu škod. Vzhledem k nedostatku kvalifikovaných techniků a růstu mzdových nákladů jsou firmy nuceny svoje provozny co nejvíce automatizovat, instalovat čidla pro záznam různých parametrů, školit personál v diagnostice a jdou tak iniciativám jako například Průmysl 4.0 naproti. Globální elektrotechnické koncerny jako ABB, nebo Siemens jdou příkladem a od letošního roku nabízí ve svých motorech standardně jednoduchý diagnostický box, který měří kinematické veličiny a teplotu a lze se k němu připojit přes mobilní aplikaci.

Na první pohled by se mohlo zdát, že tímto je již role údržbářů a diagnostiků zbytečná, opak je ale pravdou. Jak již byl řečeno, jde o běh na dlouhou trať. V současnosti jsou senzory a dostupné automatizované diagnostické systémy schopny zaznamenat základní veličiny a maximálně provést jednoduchou analýzu. Neméně důležité je propojit více zařízení mezi sebou a naučit je spolehlivě komunikovat. Pravděpodobně největší výzvu však představuje správné vyhodnocení dat a přesné stanovení diagnózy problému. Existuje totiž nepřeberné množství aplikací a soustav, které pracují v různých podmínkách a režimech práce a je tedy nutné k nim při diagnostice přistupovat individuálně. S tím souvisí i rostoucí složitost samotných pohonů a řídicích systémů. Frekvenční měniče vnášejí do prostředí točivých strojů řadu méně známých jevů a závislostí, které jsou stále předmětem výzkumu a každý diagnostik by je měl vést v patrnosti. Zkoumáním některých z nich se zabývá i tato práce.

1 Vibrační diagnostika

Vibrační diagnostika, nebo také vibrodiagnostika, patří mezi nedestruktivní bezdemontážní metody technické diagnostiky. Jak vyplývá z názvu, základním parametrem pro měření a následné vyhodnocení jsou vibrace (kmitání) elektrických strojů. Získané informace slouží ke zjištění technického a provozního stavu vyšetřovaných soustav. Lze tak předejít možnému poškození ložisek, rotoru, spojkou připojenému zařízení a dalším. Pro správné zhodnocení celkového stavu však v některých případech nelze spoléhat pouze na výsledky měření vibrací. V praxi je často doporučeno sledovat i jiné parametry. Patří mezi ně například analýza maziva, kterou se zabývá tribodiagnostika. Dále termodiagnostika, jejímž úkolem je odhalovat zejména místa s nestandardní teplotou či teplotní anomálie, ultrazvuková diagnostika využívající ultrazvuk generovaný suchým třením a v neposlední řadě elektrodiagnostika, která sleduje elektrické veličiny (např. napájecí proud, napětí, jalový a činný výkon, izolační odpory a různé elektrické koeficienty strojů). Každá z uvedených metod může přispět k odhalení potenciální poruchy stroje svým vlastním dílem. Vzájemně se doplňují a poskytují tak diagnostikovi komplexnější a jistější obraz při rozhodování. Toto je ideální stav, který však v praxi nebývá často splněn. Překážkou mohou být omezené prostředky, chybějící vědomosti technika nebo nedostatek času, tzn. snaha o rychlou identifikaci problému. Z tohoto pohledu se jeví vibrační diagnostika jako nejuniverzálnější nástroj, jelikož vibrace ve srovnání s ostatními parametry nesou nejvíce informací o možných příčinách poruch rotačních strojů, viz tabulka níže.[1]

Typ stroje: Čerpadlo	Změna symptomu nebo parametru									
Závada	Únik kapaliny	Měření délek	Výkon	Tlak nebo vakuum	Otáčky	Vibrace	Teplota	Doba do běhu	Znečištění oleje	Netěsnost oleje
Poškozené oběžné kolo		.	.	.	.	.	.	.	.	
Poškozené ucpávky	.	.		.	.	.				
Excentrické oběžné kolo			.	.	.	.	.	.		
Poškozené ložisko		.	.		.	.	.	.	.	.
Opotřebené ložisko		.				.	.	.	.	
Chybná montáž						.				
Nevyváženost						.				
Nesouosost		.				.				
• Když se vyskytne závada, může se vyskytnout indikovaný symptom nebo změna parametru.										

Obrázek 1.1: Sledování provozních parametrů podle ČSN ISO 17359 [1]

Diagnostika by obecně, bez ohledu na konkrétní parametr, měla být nedílnou součástí údržby strojů. Cílem údržby je minimalizace výluk, zajištění maximální životnosti, produktivity strojů a také bezpečnosti provozu.

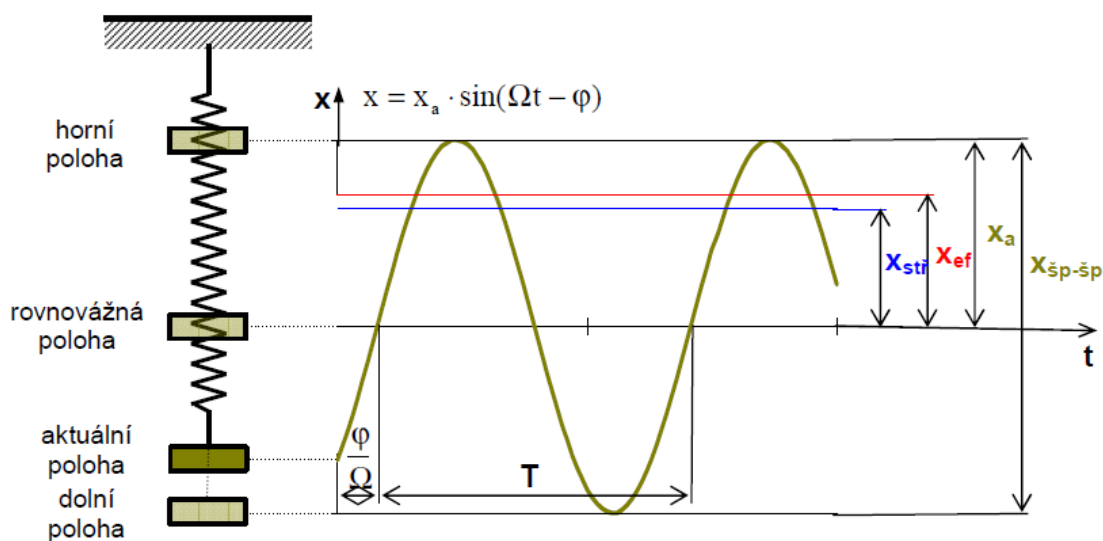
Údržbu lze dělit na několik typů:

- **reaktivní údržba (údržba po poruše)** – základní typ údržby praktikovaný u většiny méně významných strojů. Zařízení pracuje do poruchy, poté je nahrazeno novým (**okamžitá údržba**). Pokud je schopno vykonávat alespoň částečně svou činnost lze, po zvážení pracovníkem údržby, tuto výměnu odložit na vhodnější dobu, např. v době odstávky (**odložená údržba**). [2]
- **preventivní údržba s předem stanovenými intervaly** – spočívá v provádění kontrol nebo prohlídek v pevně daných termínech. Četnost prohlídek je dána statistickým monitorováním, případně odhadem podle zkušeností obsluhy. Rizikem jsou případné náklady vzniklé při opětovné montáži a zprovoznění u strojů bez poruchy. [2]
- **preventivní údržba podle stavu** – základem je monitoring stavu strojních zařízení a odpovídající reakce údržby. Pro základní subjektivní analýzu se stále využívají lidské smysly i přes aktuální velký rozvoj snímačů a diagnostických přístrojů. S ohledem na cenu těchto zařízení je důležité zvážit kritické nepředvídatelně se měnící parametry, které je třeba sledovat nepřetržitě, zatímco u některých postačuje kontrola v delším časovém úseku. Výhodou tohoto typu údržby je, že se používá, když je jí opravdu potřeba. Snižuje riziko havárie a tím i úrazu a zlepšuje znalosti obsluhy. [2]
- **prediktivní údržba** – využívá různých metod technické diagnostiky ke zjištění potenciálních rizik, jež by mohly negativně ovlivnit provoz strojů. Analýzou naměřených veličin a následnou predikcí se snaží tato rizika eliminovat a učinit taková opatření, která by zabezpečila bezproblémový chod zařízení. [2]
- **proaktivní údržba** – vznikla evolucí z prediktivní údržby jako reakce na pravidelně se opakující poruchy, jejichž původ lze snadno identifikovat. Jedná se například o nevhodnou organizaci údržby, nekvalitní instalaci a nastavení objektu, špatně provedenou údržbu, nebo nedostatečně proškolený personál. Oproti prediktivní údržbě se proaktivní údržba snaží o hledání spojitostí v širším kontextu, tedy o určitou systematičnost a nastavení správné metodiky. V praxi se to projevuje hlubší analýzou příčin poškození a zavedením odpovídajících opatření, důrazem na dlouhodobě stabilní technický stav objektu a předvídáním jeho budoucího vývoje s pomocí komplexnější databáze diagnostických dat. A neposlední řadě posílením role týmu, který zahrnuje širší okruh pracovníků a rovněž užším propojením údržby s výrobou. Tento typ údržby nejvíce naplňuje požadavky iniciativy Průmysl 4.0. [3]

V následujících kapitolách bude stručně věnována pozornost základním veličinám a pojmům, se kterými se ve vibrodiagnostice setkáváme.

1.1 Základní pojmy kmitavého pohybu

Vibrace točivých strojů jsou odezvou na poškození a poruchy soustav, ne jejich příčinou. Existují různé typy sil, které budí vibrace. Pro popis a vyhodnocení vibrací se používá nejčastěji analýza vibrací, která má matematicky snadno popsitelný průběh. Její další výhodou je, že pokud je soustava buzena budící silou, která může pocházet i z více zdrojů vibrací (nevyvážený rotor, utrhlá patka, poškozený vnitřní kroužek ložiska,...) lze toto popsat na základě známých (vypočtených) budících frekvencí (využívá se posléze při FFT, viz níže). Samotný harmonický sinusový průběh je popsán na obr.1.2. Pro zjednodušení budeme uvažovat pohyb bez tlumení.[1]



Obrázek 1.2: Harmonický pohyb tělesa zavěšeného na pružině [1]

Základní veličiny kmitavého pohybu jsou (x v našem případě označuje výchylku) [1] :

- Střední hodnota výchylky:

$$x_{stř} = \frac{1}{T} * \int_0^T |x| dt \quad (1)$$

- není v praxi tak používána jako efektivní hodnota

- Efektivní hodnota výchylky (Root Mean Square):

$$x_{ef} = x_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} * \int_0^T x^2 dt} \quad (2)$$

- vyjadřuje průměrný výkon měřené veličiny
- Amplituda výchylky x_a udávající maximální výchylku
- Rozkmit výchylky $x_{sp-sp} = 2 * x_a$ (peak to peak)
- Perioda T (při periodickém pohybu udává trvání 1 cyklu)
- Počáteční fázový úhel φ (je dán počáteční výchylkou)
- Vlastní kruhová (úhlová) frekvence $\Omega = \frac{2\pi}{T}$

1.2 Vzájemná závislost mezi měřenými veličinami

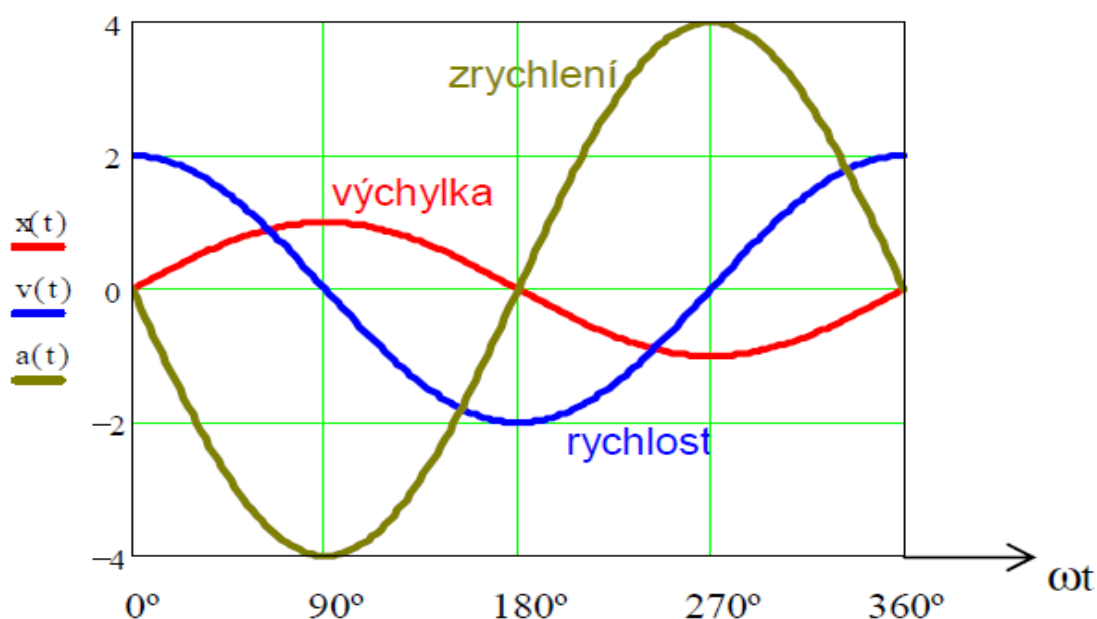
Kmitání rotujících soustav je zpravidla zaznamenáváno instalovanými čidly měřícími výchylku, rychlost, tedy derivací výchylky podle času a zrychlení, které získáme derivací rychlosti podle času.

$$x(t) = X_a * \sin(\Omega t) \quad (3)$$

$$v(t) = \frac{dx}{dt} = x_a * \Omega * \cos(\Omega t) \quad (4)$$

$$a(t) = \frac{dv}{dt} = -x_a * \Omega^2 * \sin(\Omega t) \quad (5)$$

Fázový posun jednotlivých veličin vůči sobě je znázorněn na obr.1.3.



Obrázek 1.3: Průběhy veličin a jejich fázový posun za 1 periodu[1]

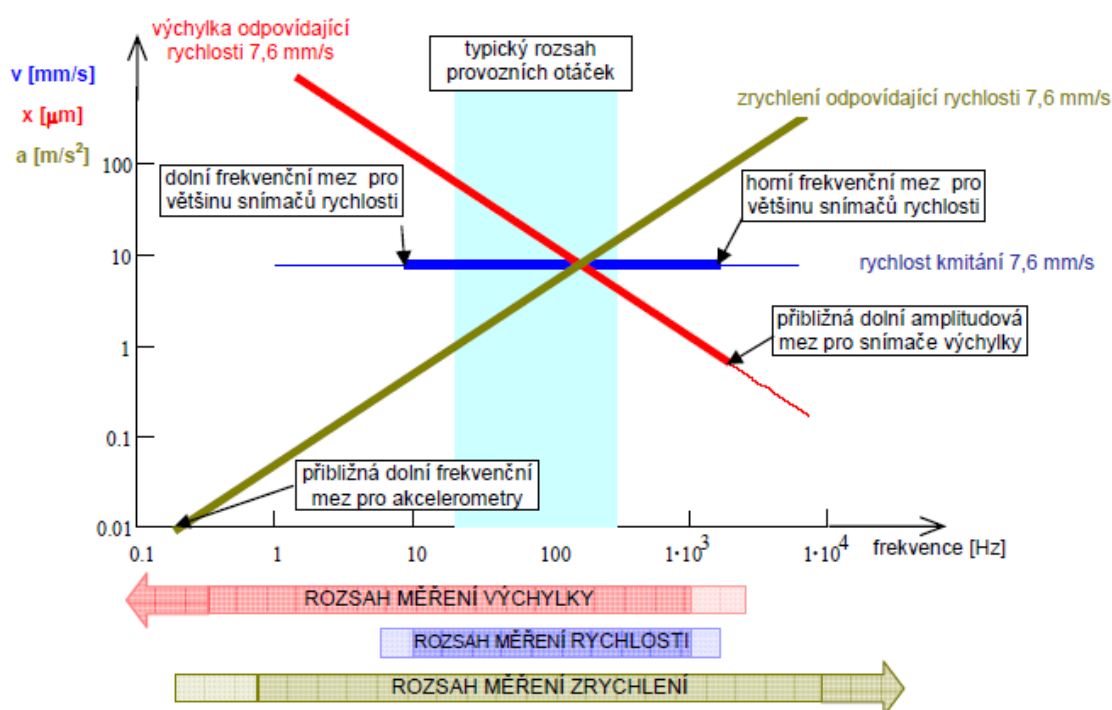
Je patrné, že rychlost předbíhá zrychlení o 90° a stejně tak výchylka předbíhá rychlost. Teoreticky by tak bylo možné získat z jednoho signálu derivací nebo integrací zbývající dvě veličiny. V praxi se však při měření vždy vyskytuje šum, který by byl derivací zesílen a způsobil by především u slabších signálů úplné překrytí původního záznamu, a tím i znehodnocení výsledků.[1]

Význam fáze však nespočívá pouze v popisu vztahu zmíněných veličin. V praxi měření fáze pomocí fázové značky na hřídeli napomáhá diagnostikovi ujasnit si vzájemný pohyb jednotlivých částí stroje. Toho se využívá při vyvažování, kdy můžeme posoudit možné ohnutí hřídele nebo nesouosost.

1.3 Vliv frekvenčního rozsahu na volbu měřené veličiny

Vyjma fázového rozdílu a amplitudy se měřené veličiny odlišují také použitelným frekvenčním rozsahem. Standardně dle normy je pro běžné případy analýzy vibrací definováno rozpětí 10 Hz - 1000 Hz. V tomto intervalu je preferována rychlost, pro menší hřídelové vibrace výchylka a pro celé spektrum a hlavně vyšší frekvence zrychlení, viz obr.1.4.

S volbou měřené veličiny souvisí samozřejmě i volba příslušného snímače. Pro rychlost a zrychlení se používají nejčastěji akcelerometry využívající piezoelektrického jevu. Indukční snímače s pohybujícím se magnetem indukujícím napětí v cínce slouží pro záznam rychlosti. Výchylku lze snímat například pomocí bezdotykové sondy na principu vířivých proudů.[1]



Obrázek 1.4: Frekvenční rozsah měření jednotlivých veličin[1]

Naměřené veličiny se posléze vyhodnocují podle vybraných metod vibrodiagnostiky. Mezi nejvýznamnější metody patří:

- Měření širokopásmových hodnot a jejich srovnání s příslušnými normami
- Časová analýza vibrací (u pomaloběžných strojů), a zjišťování příčin poruch
- Frekvenční analýza vibrací a zjišťování závad (nevývaha, špatné ustavení, rezonance, nesymetrie elektrického pole motoru, apod.)
- Provozní tvary kmitu a modální analýza
- Vyvažování stroje

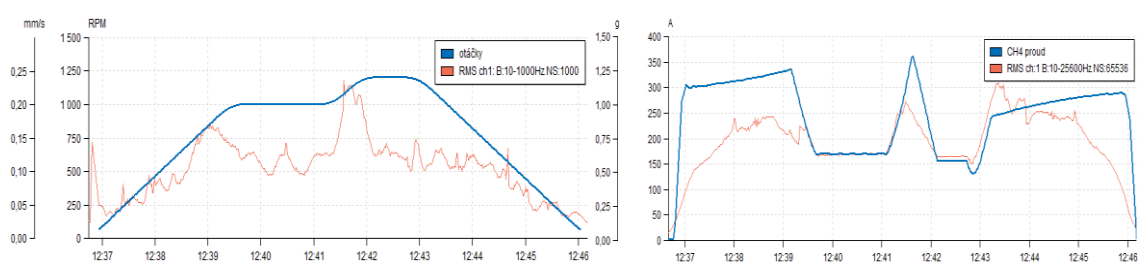
V této práci byla využita metoda měření širokopásmových hodnot vibrací a proudu a analýza ve frekvenční oblasti.

1.4 Použité metody

1.4.1 Měření širokopásmových hodnot vibrací a proudu

Obecně je rámci vibrodiagnostiky tato metoda nejčastěji využita k porovnání efektivních (RMS) hodnot rychlosti vibrací v rozsahu 10-1000 Hz s hodnotami dle normy ISO 10816-3. Na základě tohoto srovnání je stroj zařazen do jednoho ze 4 pásem, které ukazují na provozní stav stroje.[1]

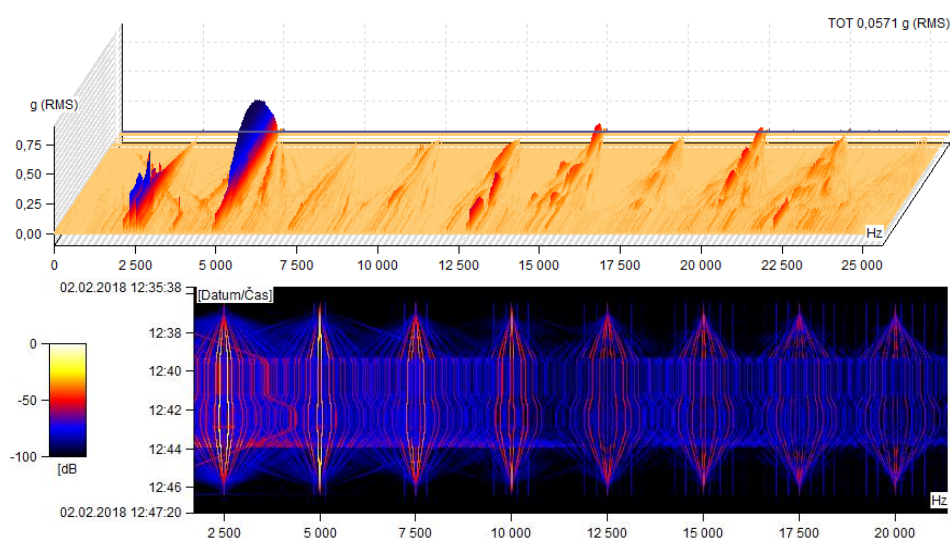
V našem měření byly tyto efektivní hodnoty vibrací použity zejména ke vzájemnému porovnání průběhů z čidel a k celkovému přehledu o časovém vývoji proudu, otáček a vibrací. Rychlost vibrací byla zaznamenávána v rozpětí 10-1000 Hz a zrychlení vibrací v pásmu 10-25600 Hz, viz obrázek 1.5.



Obrázek 1.5: Širokopásmové hodnoty vibrací, otáčky motoru a proud

1.4.2 Frekvenční analýza vibrací a proudu

Druhou metodou byla frekvenční analýza využívající rychlé Fourierovy transformace (FFT). Tato metoda promítá časový signál do frekvenční oblasti a ve vzniklém spektru je tak možné odhalit známé frekvence závad. Jde například o nevývahu, frekvenci vnitřního kroužku ložiska, zubovou frekvenci a další [1]. V našem případě sloužila především k zobrazení kaskádových diagramů a spektrografů vibrací a proudu (viz obrázek 1.6), případně k prokázání vlivu změny pulzní frekvence na amplitudy zrychlení vibrací.



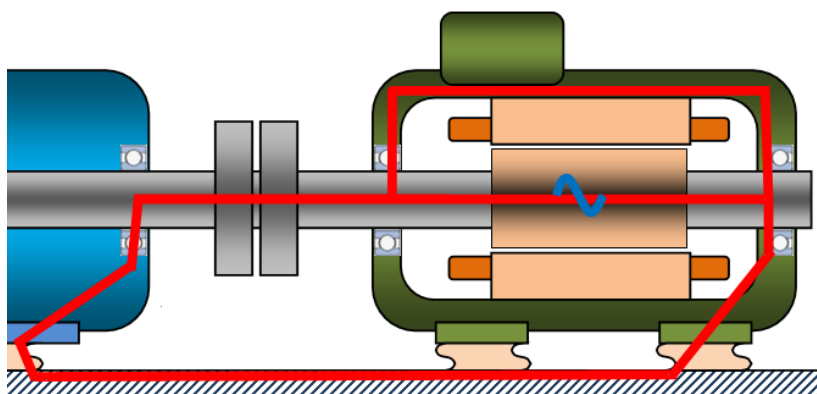
Obrázek 1.6: Ukázka kaskády zrychlení vibrací (nahore) a spektrografu proudu (dole)

2 Elektrodiagnostika

Tato metoda analyzuje elektrické veličiny a pomáhá vytvářet představu o dějích, které probíhají v elektrických strojích a mohou být příčinou vibrací a případně poškození ložisek, izolací vinutí a dalších částí strojů. V rámci této práce se zaměříme především na hřídelová napětí a parazitní ložiskové a kapacitní proudy.

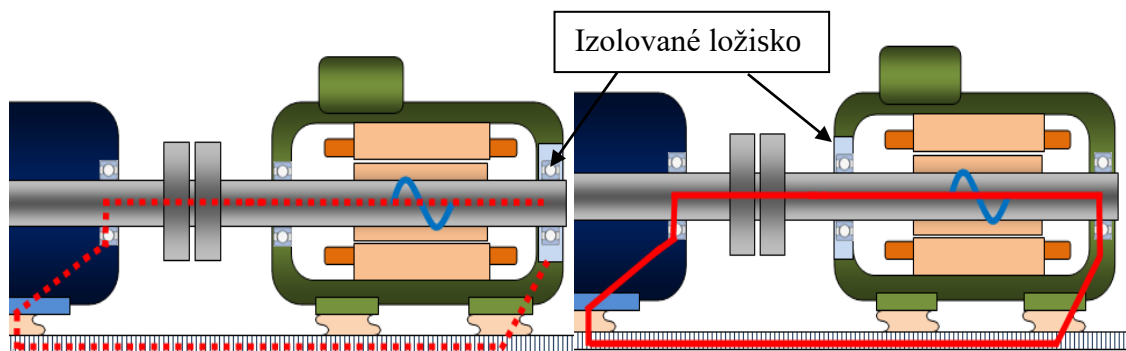
2.1 Hřídelová napětí a ložiskové proudy

Hřídelové napětí je výsledkem působení magnetického pole na hřídel, kde se díky mechanickým nepřesnostem nebo nesymetrickému napájení indukuje určité napětí mezi konci hřídele. Ložiskové proudy nevzniknou, dokud hřídelové napětí nepřekročí mezní hodnotu, závislou na průrazném napětí tukové či olejové vrstvy maziva v ložisku. Pokud je ložisko domazáváno nedostatečně nebo je hřídelové napětí příliš velké, vzniká vodivým spojením přes ložiska, kostru, spojku, případně poháněné zařízení cesta pro průchod parazitního ložiskového proudu, viz červeně na obrázku 2.1. Obvyklá hodnota hřídelového napětí, vyžadující provést odpovídající ochranné opatření proti parazitnímu proudu, je 0,3 V.[4]



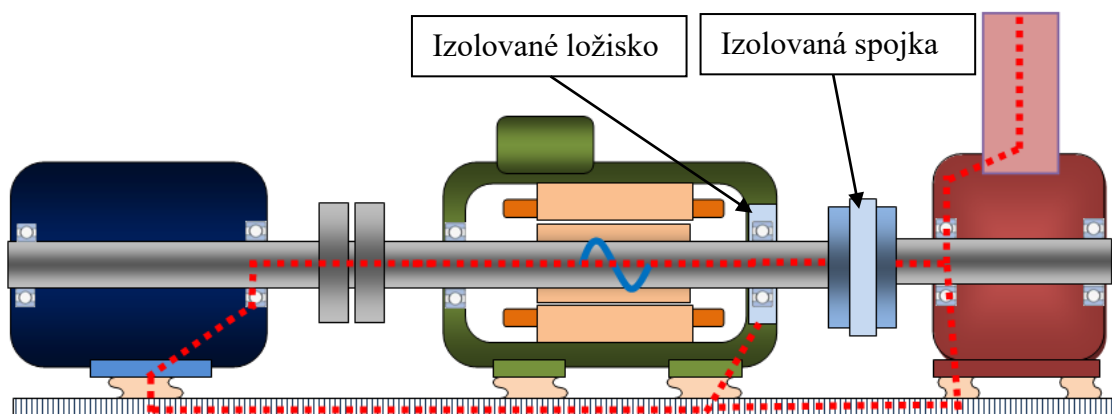
Obrázek 2.1: Cesta parazitního proudu přes ložiska [upraveno z 5]

Jedna z možností, jak ložisko ochránit proti průchodu proudu, je použití izolovaného ložiska, které si lze představit jako vypínač v obvodu. Je důležité si uvědomit, jak je soustrojí vodivě spojeno a zohlednit fakt, že se elektrický obvod může uzavřít i přes zem. Na levé části obrázku 2.2 vidíme správnou aplikaci izolovaného ložiska pro zařízení s jedním volným koncem hřídele na NDE (Non Drive End) straně, cesta přes ložisko není vodivě spojena, proud neprochází. Napravo pak můžeme sledovat proud procházející ložiskem. Izolované ložisko je umístěno nevhodně na DE (Drive End) straně a obvod je uzavřen přes poháněné zařízení. Proud tak poškozuje ložiska obou zařízení zároveň. Možností je samozřejmě izolovat obě ložiska motoru, avšak vzhledem k výše popsané alternativě lze, při zachování stejných výhod, ušetřit nemalé náklady na pořízení druhého izolovaného ložiska. [4]



Obrázek 2.2: Aplikace izolovaného ložiska na NDE a DE straně motoru[upraveno z 5]

Další často se vyskytující variantou je motor s více volnými konci, kde jedno izolované ložisko nestačí a je nutné izolovat i spojku na straně izolovaného ložiska. Tímto je znemožněno uzavření elektrického obvodu a tím průchodu proudu hřídelí do dalšího stroje, viz obrázek 2.3.



Obrázek 2.3: Umístění izolované spojky a ložiska u motoru se 2 volnými konci[upraveno z 5]

Další častou ochranou ložisek před proudem je uzemnění jednotlivých částí, například statoru s hřídelí uzemňovacím kartáčem. Proud tak teče cestou s menší impedancí, tedy přes kartáč a ložisko je částečně chráněno. V některých případech však i ochranná izolace může přispívat k průchodu proudu ložiskem, viz následující kapitola.[4]

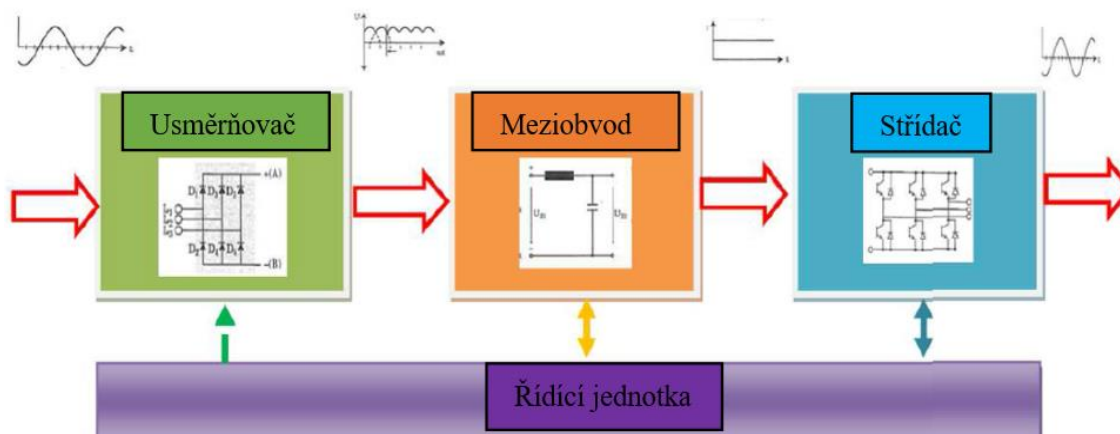
2.2 Kapacitní proudy

Při přímém napájení motorů ze sítě není nutné mít obavu ze vzniku kapacitních proudů. Situace se změní, pokud je motor připojen přes frekvenční měnič. V tomto případě je už vliv kapacitních proudů a souvisejících kapacitních vazeb nezanedbatelný. Důvod vyplývá z následujícího stručného popisu principu měniče.

2.2.1 Princip měniče

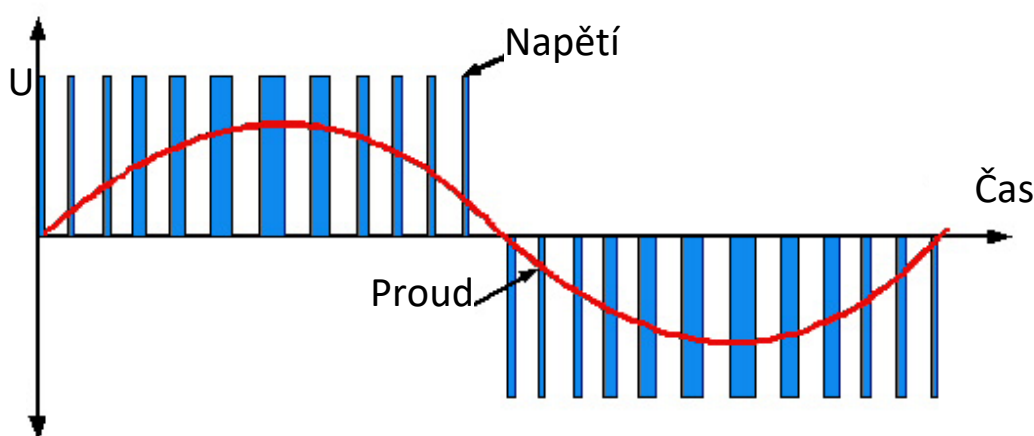
Měniče se začaly používat s nástupem výroby polovodičových součástek. Vzniklo více druhů podle typů motorů. Tato práce se zabývá střídavým měničem, který

se využívá u asynchronního motoru. Hlavní výhodou tohoto spojení je řízení výkonu a otáček. Do té doby se v průmyslových aplikacích používalo pouze přepínání hvězda/trojúhelník, a to zejména pro těžké rozběhy, u kroužkových motorů, u motorů s přepínatelným vinutím a dalších.



Obrázek 2.4: Hlavní části měniče[upraveno z 5]

Frekvenční měnič (schéma viz obrázek 2.4) se skládá z usměrňovače, kde se sinusový proud ze sítě usměrní. V meziobvodu se stále pulzující proud pomocí kondenzátorů a filtrů vyhladí a přechází do střídače. Střídač je poslední část měniče. Je složen z polovodičových prvků (v našem případě tranzistorů IGBT), kde jejich spínání o velké (pulzní) frekvenci generuje strmé obdélníkové pulsy a tak se modeluje požadovaný průběh proudu, který teče motorem, viz obrázek 2.5. Toto spínání je řízeno pulzní šířkovou modulací (PWM) z řídicí jednotky. Čím vyšší frekvence pulsů, tím přesnější a hladší křivka proudu.



Obrázek 2.5: Průběh napětí a proudu na výstupu měniče [6]

Negativním důsledkem zvyšování pulzní frekvence je změna chování izolací různých částí motoru. Pro nízkofrekvenční napájení (například 50 Hz ze sítě) je impedance jednotlivých izolací (kapacitních vazeb) dostatečná, avšak z její definice (viz rovnice (6)) plyne, že s rostoucí frekvencí odpor vůči střídavému proudu klesá, což má za následek průchod tzv. kapacitních proudů skrz tyto izolace.[5]

$$Z = \frac{1}{2\pi f C} \quad (6)$$

Jedná se zejména o tyto kapacitní vazby, viz obrázek 2.6:

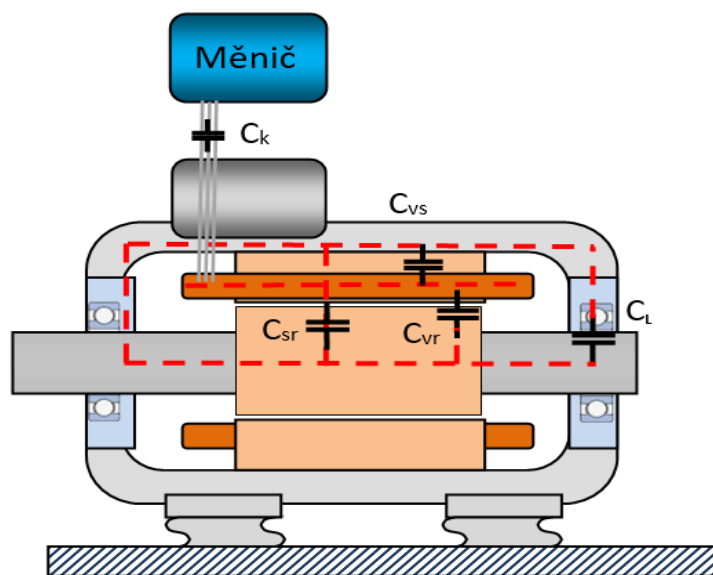
C_{vr} – kapacita mezi vinutím a rotorovým paketem

C_{vs} – kapacita mezi vinutím a statorovým paketem

C_{sr} – kapacita mezi statorovým a rotorovým paketem

C_k – kapacita kabelů

C_L – kapacita ložiska



Obrázek 2.6: Přehled hlavních kapacitních vazeb v motoru [upraveno z 5]

2.3 Vnější zdroje proudu

- Bludné proudy v okolí železnic
- Proudů při úderu blesku
- Zkratový proud před sepnutím ochrany
- Zavlečený proud – při svařování – přivaření valivých těles ke kroužkům
- Indukované napětí v kabelech (kabelové lávky)
- Vyrovnávání potenciálu mezi budovami
- Statická elektřina

Průchod proudů rotujícími částmi strojů způsobený nesymetrií, kapacitními vazbami, případně dalšími příčinami snižuje životnost a provozuschopnost zasažených ložisek, převodovek a dalších. Proto se tyto vlivy snažíme omezit a aplikovat taková opatření, která by poškození a zbytečným odstávkám zabránila.

2.4 Další typy měření

Kromě ložiskových proudů, které byly popisovány v dosavadním průběhu práce, se elektrodiagnostika za účelem ověření reálného stavu a funkčnosti zařízení zabývá mnoha dalšími činnostmi a testováním dalších parametrů a vlastností elektrických strojů. Jsou to například:

- Měření izolačního odporu
- Měření polarizačního indexu
- Step test
- Měření činného a jalového výkonu
- Testování kvality sítě
- Měření ztrátového činitele $\tan \delta$
- Diagnostika vinutí rázovou vlnou
- Souměrnost napětí
- Přechodové děje
- Kontrola buzení strojů

3 Diagnostický systém pro testování soustrojí motor-měnič-generátor

3.1 Seznámení se soustavou měnič-motor-generátor

Měření bylo prováděno v Laboratoři spínacích přístrojů, která je součástí vědecko-technického parku profesora Lista v Brně v blízkosti Elektrotechnické fakulty (FEKT). Laboratoř slouží jako tzv. zkratová zkušebna k vědeckým a výzkumným účelům. Hlavním prvkem je zkratový generátor vyrobený v závodě Siemens Drásov. Oproti běžným generátorům dodávajícím elektřinu do sítě, uvolňuje toto zařízení velké množství energie v krátkých intervalech (řadově milisekundy). Tímto se simulují rizikové situace, ke kterým by mohlo dojít při poruše na průmyslových elektroinstalacích. Následně je sledováno chování a reakce spínacích zařízení, která mají za úkol přerušení elektrického oblouku dosahujícího teploty až 30 000 °C a vypnutí zkratového proudu [7]. Při našem měření však sledujeme vztah mezi motorem a měničem, generátor je připojen s hřídelí motoru pouze pomocí spojky a nefunguje jako zátěž.



Obrázek 3.1: Soustrojí motor-generátor [8]

K testování byl použit asynchronní nízkonapěťový motor Siemens řady SIMOTICS N-compact z výrobního závodu v Norimberku, viz obrázek 3.1. Jedná se o šesti-pólový motor s kotvou nakrátko a osově výšce 400 milimetrů, speciálně přizpůsobený pro napájení z měniče řad SINAMICS nebo SIMOVERT. Přizpůsobení spočívá zejména v instalaci izolovaného ložiska na NDE straně motoru a zesílené izolaci vinutí. Motor má cizí chlazení (IC 416) v podobě externího ventilátoru poháněného nezávisle na hřídeli vlastním motorkem.[9]

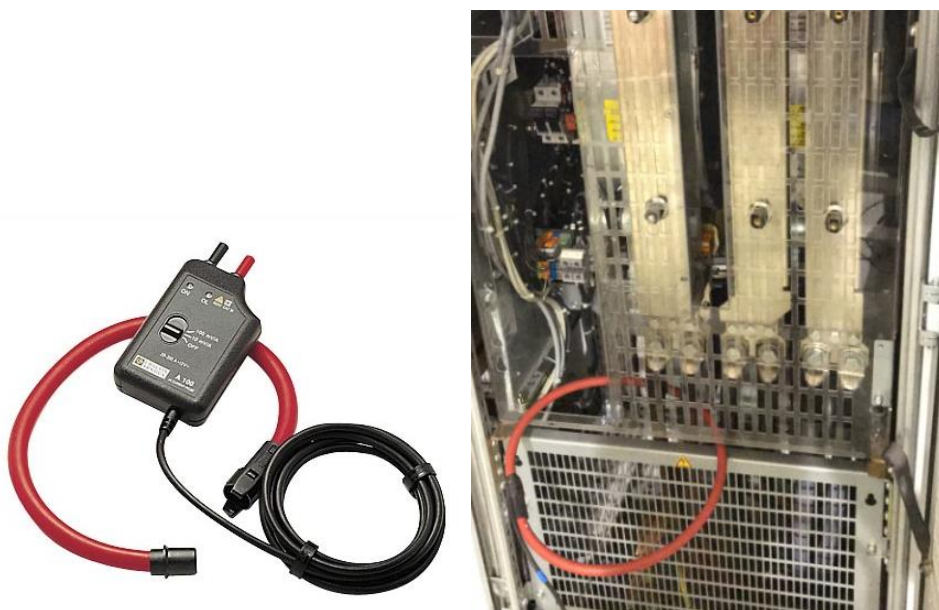
Napájení motoru zajišťuje nízkonapěťový čtyřkvadrantový frekvenční měnič řady SINAMICS S150 ve skříňovém provedení pro jednoosé pohony. Je určen pro vyso-

kovovýkonové aplikace v řádu stovek kW, dobře si poradí s nestabilitami v síti a při brzd-
ných cyklech dokáže vracet velké množství energie zpět do sítě. Konektivita je zajištěna
rozhraním Profinet a Profibus. [10]

Na uvedené soustavě bylo prováděno měření proudu, vibrací a otáček.

3.2 Měření proudu

Proud byl měřen jednofázově pomocí pružných převodníků proudu AmpFLEX na
principu Rogowského cívky (obrázek 3.2). Výstup byl připojen do analyzátoru Adash
VA4 Pro, viz dále.



Obrázek 3.2: Převodník proudu [11] a měření jedné fáze proudu v měniči

Převodník je schopen měřit v rozsahu 0,5 A – 200 A s převodním poměrem 10 mV/1 A a 0,5 A – 2 kA s poměrem 1 mV/ 1 A. Díky velkému kmitočtovému rozsahu 10 Hz – 20 kHz je vhodný pro průmyslové aplikace. Napájení lze zajistit přes USB port a odolnost zajišťuje krytí IP 65. [11]

3.3 Měření vibrací

Vibrace byly měřeny pomocí akcelerometrů od firmy CTC s maximální citlivostí 500 mV/g. Čidla (obrázek 3.3) byla použita při horizontálním a vertikálním měření vib-
rací motoru a vertikálním měření vibrací generátoru. Ve všech případech co nejblíže
ložisku, jako hlavnímu zdroji vibrací. Více specifikací akcelerometrů viz přílohy.



Obrázek 3.3: Čidla vibrací [Příloha 2]

3.3.1 Uchycení čidel vibrací

- Horizontální uchycení čidel na motoru



Obrázek 3.4: Horizontální uchycení čidel na motoru

Na obr.3.5 je zachycen akcelerometr, který je přišroubován k polohovatelnému držáku, který je přichycen k žebrům motoru. Vpravo je k akcelerometru připojen černý kabel z analyzátoru.

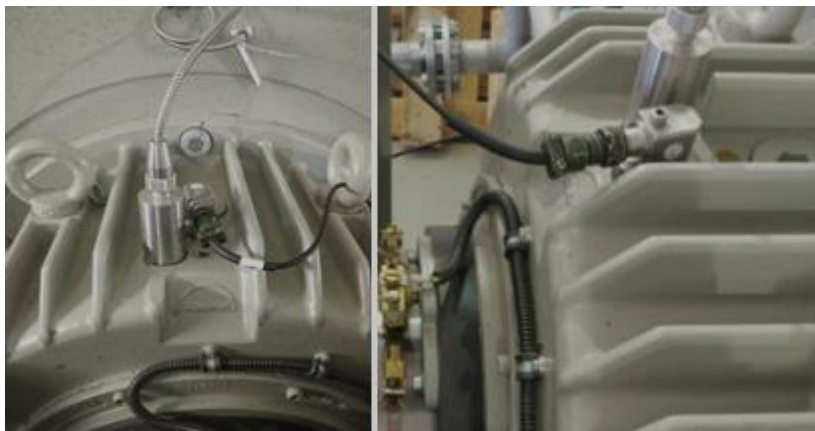
- Vertikální uchycení čidel na motoru



Obrázek 3.5: Vertikální uchycení čidel na motoru

Analogicky je čidlo vibrací připraveno ve vertikálním směru.

- Vertikální uchycení čidla na generátoru

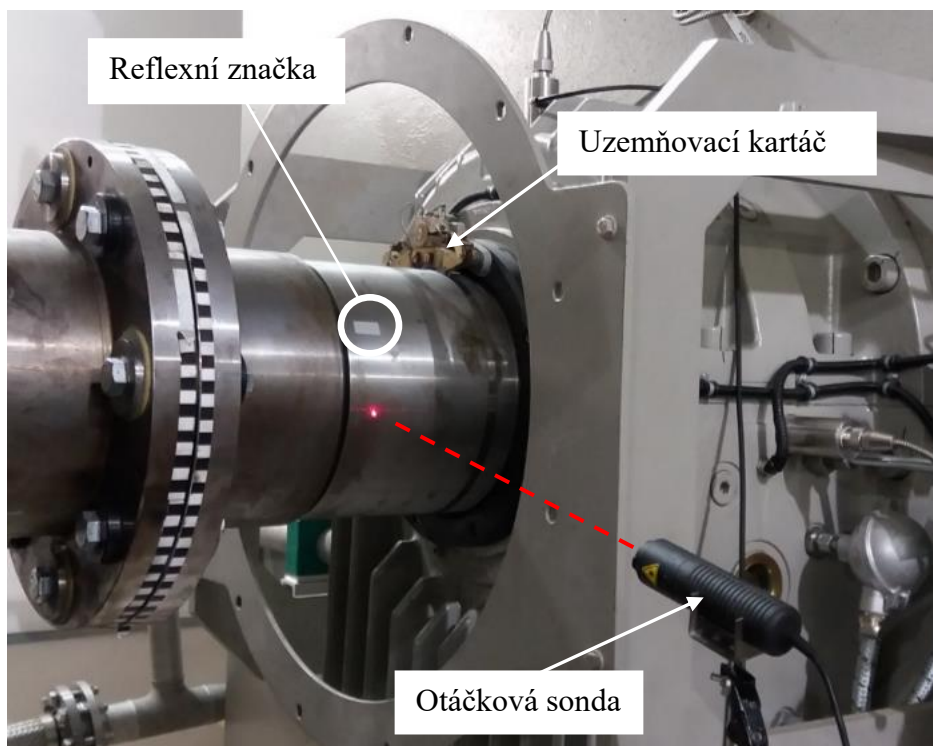


Obrázek 3.6: Vertikální uchycení čidla na generátoru

Pomocí silného magnetu je připojeno čidlo na generátoru. Na obrázku 3.6 je rovněž zřetelná stříbrná kontrolní sonda, měřící vibrace na ložisku generátoru v reálném čase.

3.4 Měření otáček

Pro korektní zpracování měření bylo třeba měřit také otáčky na hřídeli. Bylo by možné získat otáčky např. i z FFT spektra, ale použití laserové sondy v našem případě představuje nezávislý a kvalitnější způsob zachycení otáček, viz obrázek 3.7. Princip spočívá v nalepení reflexní značky na hřídel, která při každé otáčce reflektuje vysílaný signál zpět do sondy, to se projeví skokově na napětí a otáčka je tak zaznamenána v analyzátoru.[12]



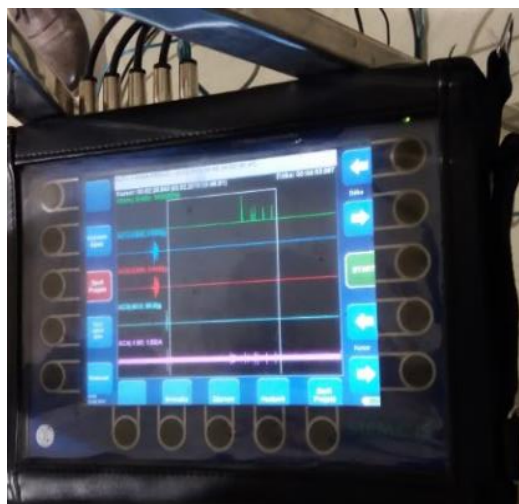
Obrázek 3.7: Sonda pro měření otáček a uzemňovací kartáč na ložisku generátoru

V předchozích podkapitolách byla pozornost zaměřena na různé typy čidel použité při měření požadovaných veličin. V další části textu se zaměříme na nastavení měřicího přístroje a zpracování těchto surových dat za použití specializovaného softwaru.

3.5 Zpracování měření

3.5.1 Datakolektor ADASH VA4 Pro

Adash VA4 Pro (obrázek 3.8) je profesionální, univerzální nástroj, který slouží jako sběrač dat, dále k nahrávání a poslechu signálu, při vyvažování strojů a také při analýze měření a dalších servisních činnostech diagnostiků. Disponuje čtyřmi samostatnými vstupními kanály s maximálním frekvenčním rozsahem až 90 kHz. Volitelně lze připojit i tříosý snímač (v našem měření jsme používali jednoosé snímače). Obsahuje databázi ložisek a normu ISO 10816-3 pro vyhodnocení přípustných hodnot vibrací z až 20 hodin nahrávání. [13]



Obrázek 3.8: Adash VA4 Pro

3.5.2 Virtuální analyzátor a nastavení čidel

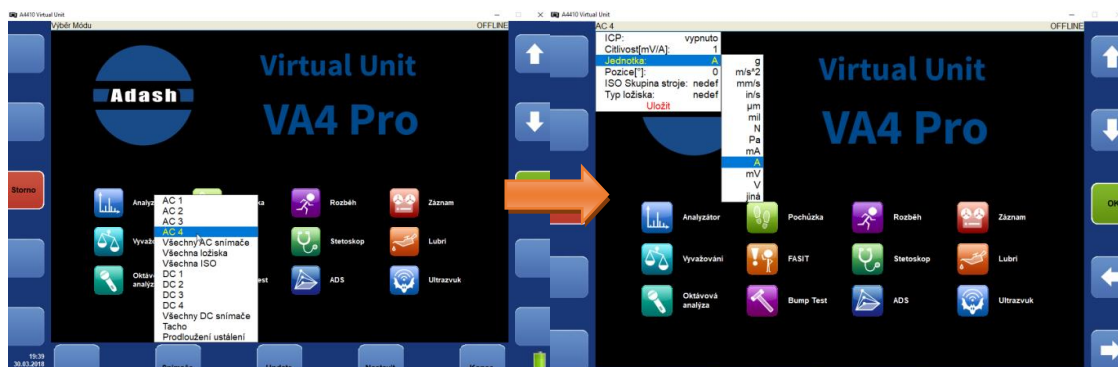
Firma Adash poskytuje pro výše popsaný datakolektor VA4 Pro virtuální jednotku, kterou si lze stáhnout a nainstalovat na PC. Díky shodnému prostředí a ovládání si tak lze jednoduše předpřipravit i zanalyzovat stažená měření na PC bez jakékoliv dodatečné úpravy dat. Tohoto bylo využito při popisu nastavení přístroje v následující části textu.

Před samotným spuštěním měření bylo třeba provést základní nastavení analyzátoru a citlivosti čidel. Toto nastavení bylo aplikováno pro střídavé kanály AC1-AC4, viz obrázek 3.9. Status zapnuto u zkratky ICP signalizuje zapnuté napájení příslušného kanálu. Při prvním měření kanály AC1-AC3 zaznamenávaly vibrace. Citlivost byla nastavena na 100 mV/g.



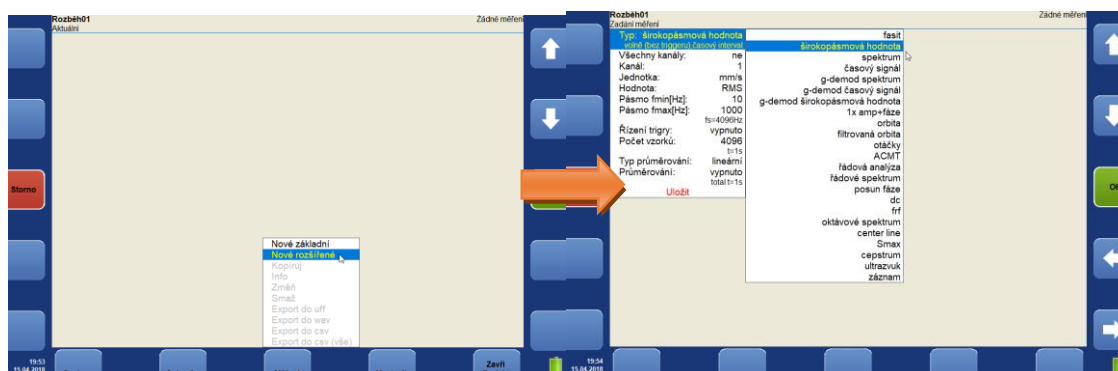
Obrázek 3.9: Nastavení kanálů pro měření vibrací

Kanál AC4 byl určen pro záznam měření proudu jedné fáze na výstupu z frekvenčního měniče. ICP zde bylo nastaveno na vypnuto a citlivost 1 mV/1 A, viz obrázek 3.10. V druhém měření už byly na všech čtyřech kanálech měřeny pouze vibrace.



Obrázek 3.10: Nastavení kanálu pro měření proudu

Po konfiguraci kanálů byl vytvořen nový projekt a v něm vytvořena jednotlivá měření pro sledování časových průběhů. Jednalo se o širokopásmové RMS hodnoty rychlosti a zrychlení, záznam spekter rychlosti a zrychlení a také průběh otáček. Takto nastavená měření pro analýzu vibrací byla použita pro kanály CH1-CH3. Kanál CH4 byl použit pro analýzu proudu. Důležitým prvkem během nastavování byl počet vzorků, který se odvíjel od šířky frekvenčního pásma, ve kterém jsme měřili. Rychlost byla měřena v běžném pásmu 10-1000 Hz, které je dáno i normou pro hodnocení vibrací. Zrychlení bylo zaznamenáváno v širším rozsahu a to až 25600 Hz, což odpovídá obrázku 1.4. Počtem vzorků jsme posléze definovali rozlišení měření tak, abychom zachytili přechodové děje. Délka časového vzorku byla stanovena na 1 sekundu. Z tohoto důvodu bylo nutné zvolit vhodný počet čar pro zvolenou šířku pásma. Tímto jsme ve spektrech docílili rozlišení 1 Hz při délce časového vzorku 1 sekunda, viz obrázek 3.11.

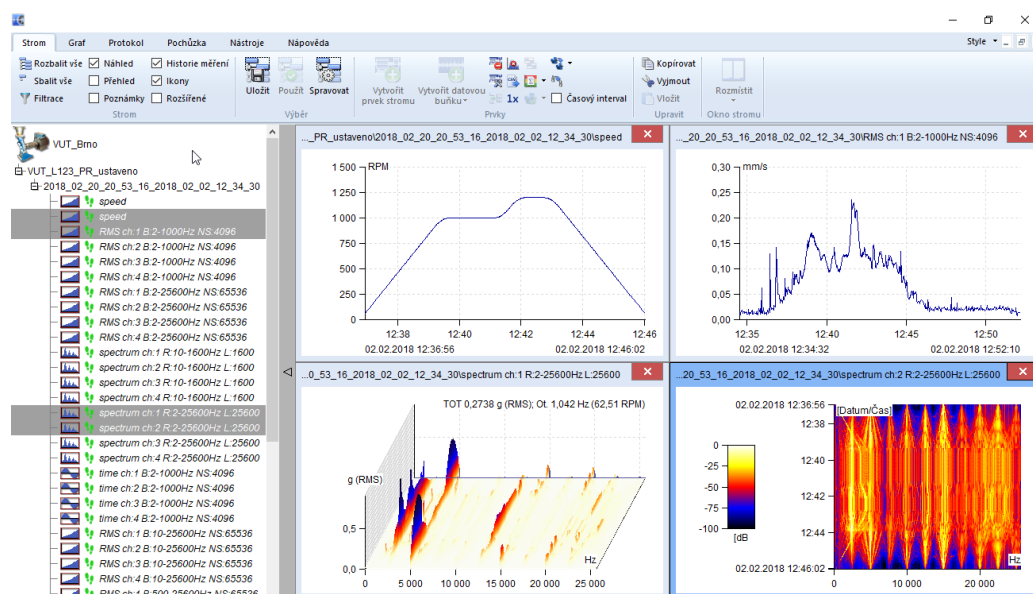


Obrázek 3.11: Přidávání měření RMS hodnot, spekter a otáček

Po konfiguraci čidel, založení projektu a nastavení požadovaných veličin pro jednotlivé kanály bylo měření připraveno a bylo možné je spustit. Data byla nejprve nahrána do analyzátoru, posléze přepokopována do virtuální jednotky v PC a nakonec převedena do softwaru DDS pro konečné zpracování a vizualizaci.

3.5.3 DDS (Digital Diagnostics System)

Analýzu a vyhodnocení měření bylo možné realizovat přímo v analyzátoru nebo ve virtuální jednotce na PC. Adash má ovšem k dispozici výkonnější a uživatelsky příjemnější nástroj označovaný zkratkou DDS, viz obrázek 3.12. Slouží k jednoduchému vyhodnocení více pochůzek z různých lokalit. Obsahuje velké množství funkcí pro komplexní zpracování dat, vykreslení grafů, zobrazení kurzorů, zoom, ořez měření a další nástroje. Převod měření z virtuální jednotky do DDS byl proveden s pomocí školitele, který vlastní plnou verzi, jelikož freeware verze programu DDS převod dat mezi programy neumožňuje.



Obrázek 3.12: Ukázka prostředí DDS

V dosavadním průběhu jsme se věnovali popisu a nastavení hardwaru a softwaru, který byl použit při měření. V následující kapitole bude uvedeno, které jevy a závislosti byly při měřeních sledovány.

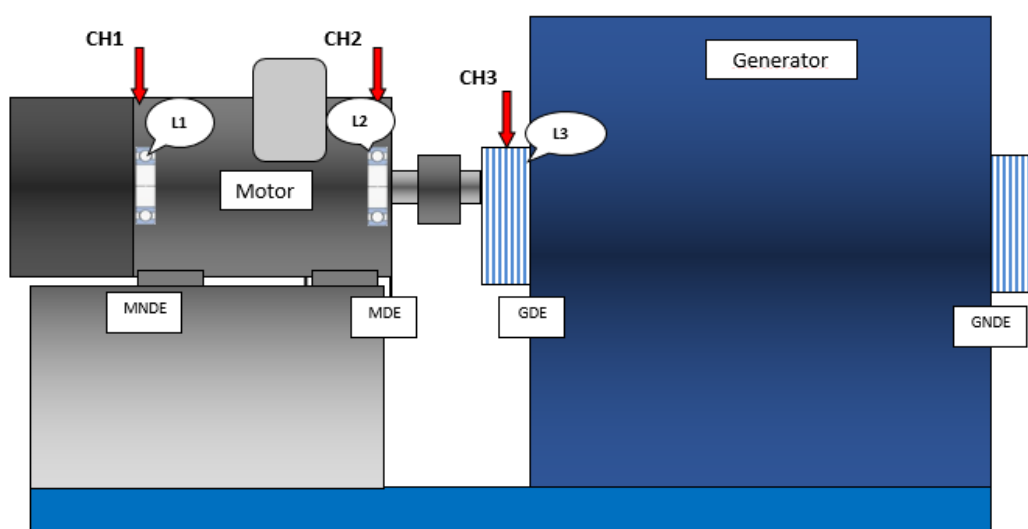
4 Metodika měření

Měření bylo rozděleno na dvě části.

4.1 Porovnání proudu a vibrací

V první části jsme se zajímali o podobnost mezi amplitudami pulzní frekvence v proudu a amplitudami rychlosti a vysokofrekvenčních složek zrychlení vibrací v ložiscích. Tato podobnost by potvrzovala působení proudu v ložiscích. Jednalo se tedy o porovnání vlivu frekvenčního měniče a pulzní frekvence na mechanické a elektrické veličiny. Zároveň byla sledována účinnost opatření proti ložiskovým proudům u motoru i generátoru.

Zapojení čidel bylo provedeno podle následujícího schématu.



Obrázek 4.1: Schéma zapojení čidel při 1. měření

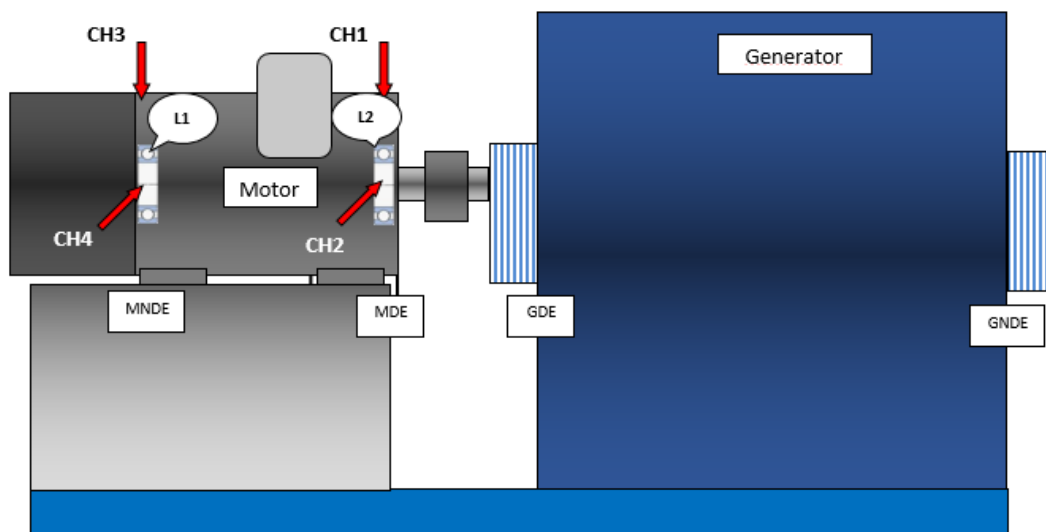
Senzory měřící vibrace byly na soustavě motor-generátor umístěny podle následujícího schématu, tedy na NDE a DE straně motoru a DE straně generátoru ve vertikálním směru (CH1-CH3). Proud byl zaznamenáván na kanálu 4 (CH4).

4.2 Vliv změny pulzní frekvence na vibrace

V druhé části jsme zkoumali vliv změny nastavení frekvence pulzní šířkové modulace na amplitudu rychlosti a vysokofrekvenčního zrychlení při rozběhu soustrojí. V tomto případě proud nebyl zaznamenáván.

Měření bylo podporováno i firmou Siemens, která měla zájem o výsledky těchto pokusů s ohledem na servis a údržbu pohonů podobných výkonů. Volba frekvence PWM nebyla u použitého měniče Sinamics S150 nahodilá. V nastavení měniče k tomu slouží dva parametry, jejichž nastavením lze dosáhnout hodnot 0,625; 1,25; 2,5; 5; 10 kHz. Za dostatečné byly považovány 3 různé hodnoty a s ohledem na vyvarování se poruchy byly vybrány tři testovací frekvence: 1,25; 2,5 a 5 kHz.

Vibrační čidla byla zapojena podle následujícího schématu.



Obrázek 4.2: Schéma zapojení čidel při 2. měření

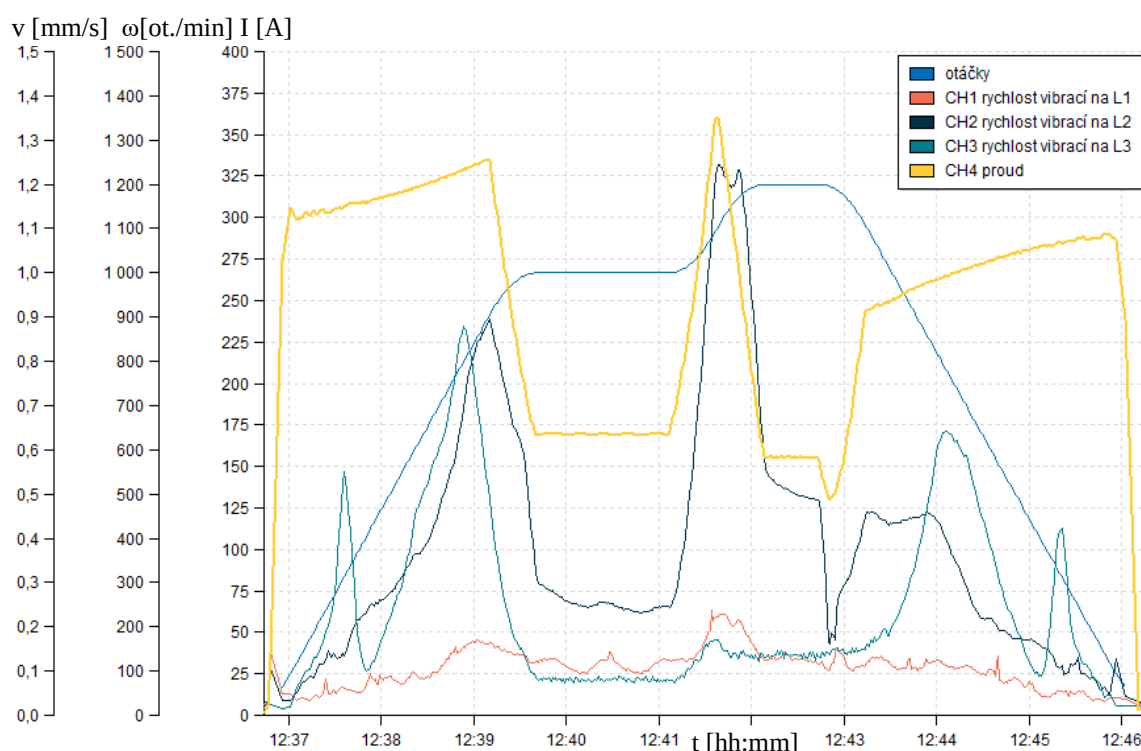
Hlavní záměrem bylo zdokumentovat měření, které ještě nebylo na výkonově srovnatelné soustavě motor – frekvenční měnič od výrobce Siemens v ČR realizováno, a s ohledem na výsledky navrhnout další postup. Cílem tedy bylo popsat a zaznamenat průběh měření, analyzovat jej a poskytnout tak základ pro další výzkum.

5 Realizace měření

Pro správnou funkci generátoru bylo nejprve nutné 15-20 min zahřívát olej v kluzném ložisku generátoru.

- Při prvním měření byl motor po rampě roztočen na 1000 ot/min a následně byly otáčky zvýšeny na 1200 ot/min. Nakonec byl motor generátoricky zbrzděn po rampě do zastavení.
- V druhém případě se motor nechal rozjet na jmenovité otáčky 1000 ot/min, několik minut tyto otáčky udržoval, poté byl opět po rampě zastaven. Po změně pulzní frekvence změnou parametru v měniči se tento postup opakoval.

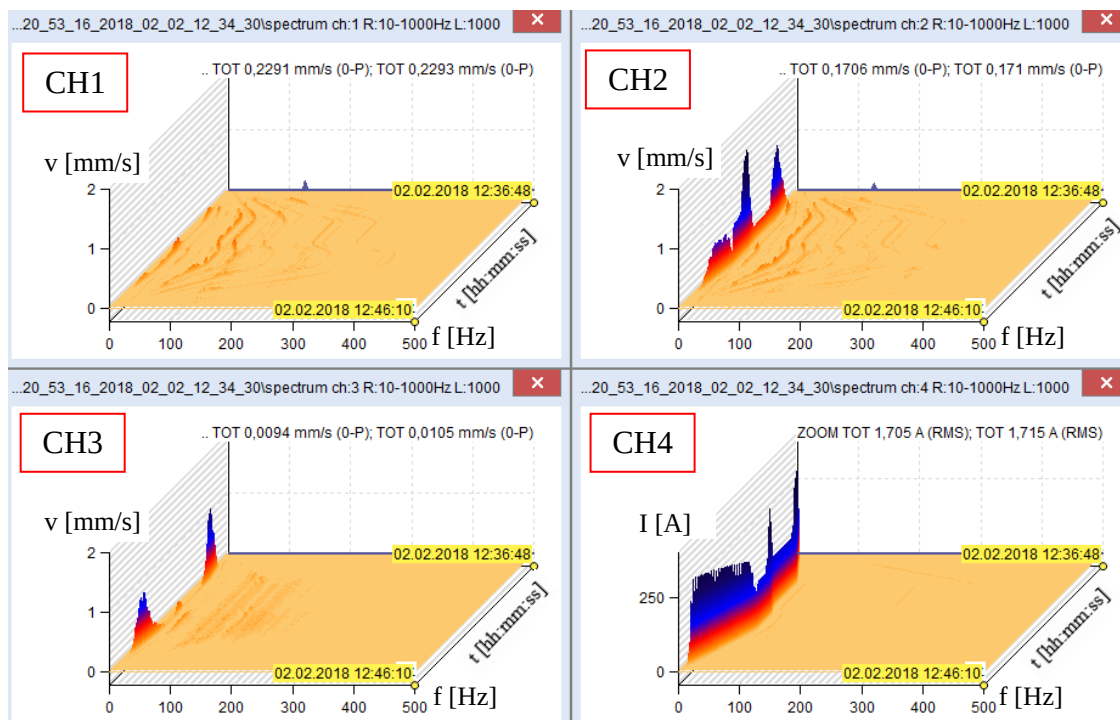
5.1 Porovnání pulzní frekvence v mechanických vibracích a v napájecím proudu



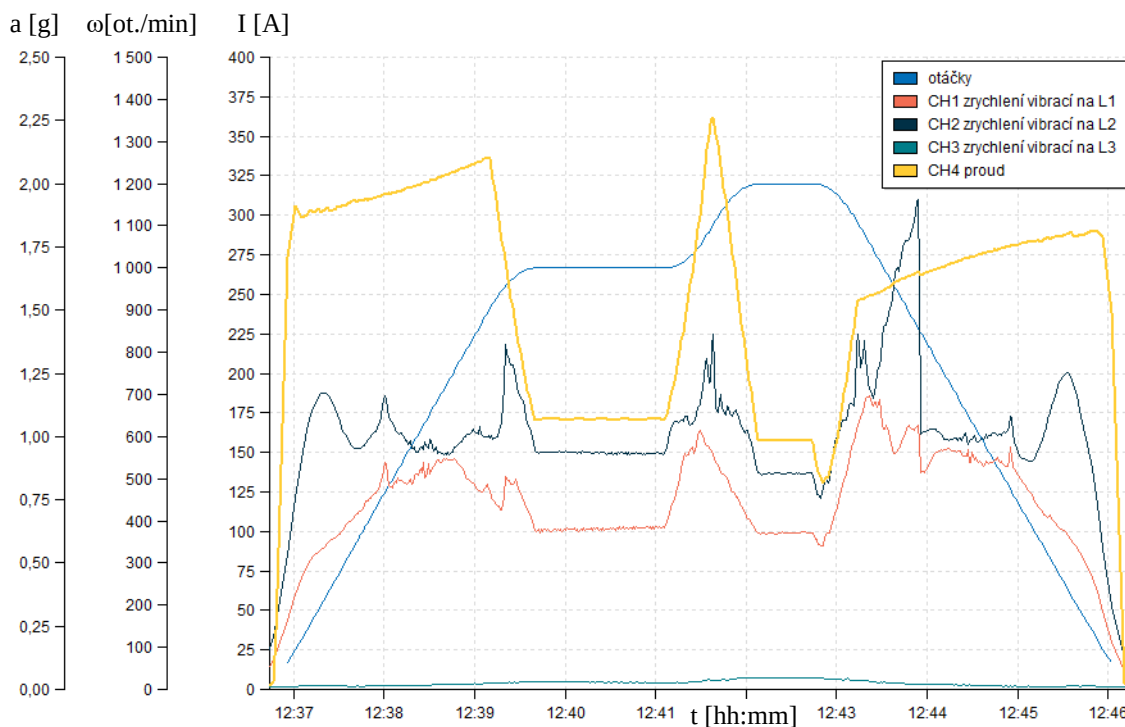
Obrázek 5.1: Srovnání otáček, RMS rychlostí a proudu

Na obrázku 5.1 je možné pozorovat vztah mezi rostoucími otáčkami a proudem. Při rozběhu rostou otáčky, je potřeba velký moment, motorem protéká velký proud. Při konstantních otáčkách už není třeba tolik proudu pro udržení rychlosti motoru, a tak proud klesá. Situace se opakuje při zrychlení na 1200 otáček a následně při brždění motoru, kdy opět spotřeba proudu roste. Nicméně v nízkofrekvenčních průbězích rychlosti vibrací toto postupné kolísání proudu se změnou vibrací tolik nekoresponduje.

Ve spektru rychlosti na obrázku 5.2 se na kanálech CH1-CH3 projevuje otáčková frekvence a její násobky. Podobnost mezi proudem a vibracemi lze hledat pouze ve změně frekvence otáček v závislosti na změně frekvence napájecího proudu, jehož průběh je zobrazen na čtvrtém kanálu (CH4).

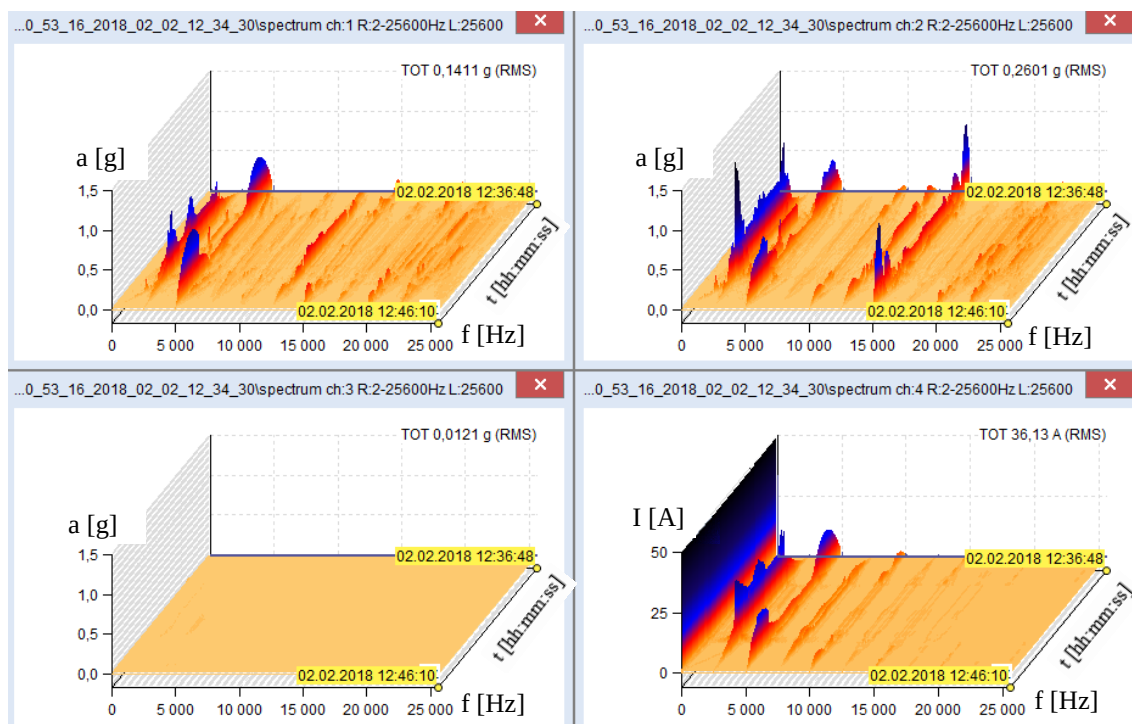


Obrázek 5.2: Srovnání kaskád RMS rychlostí a kaskády proudu



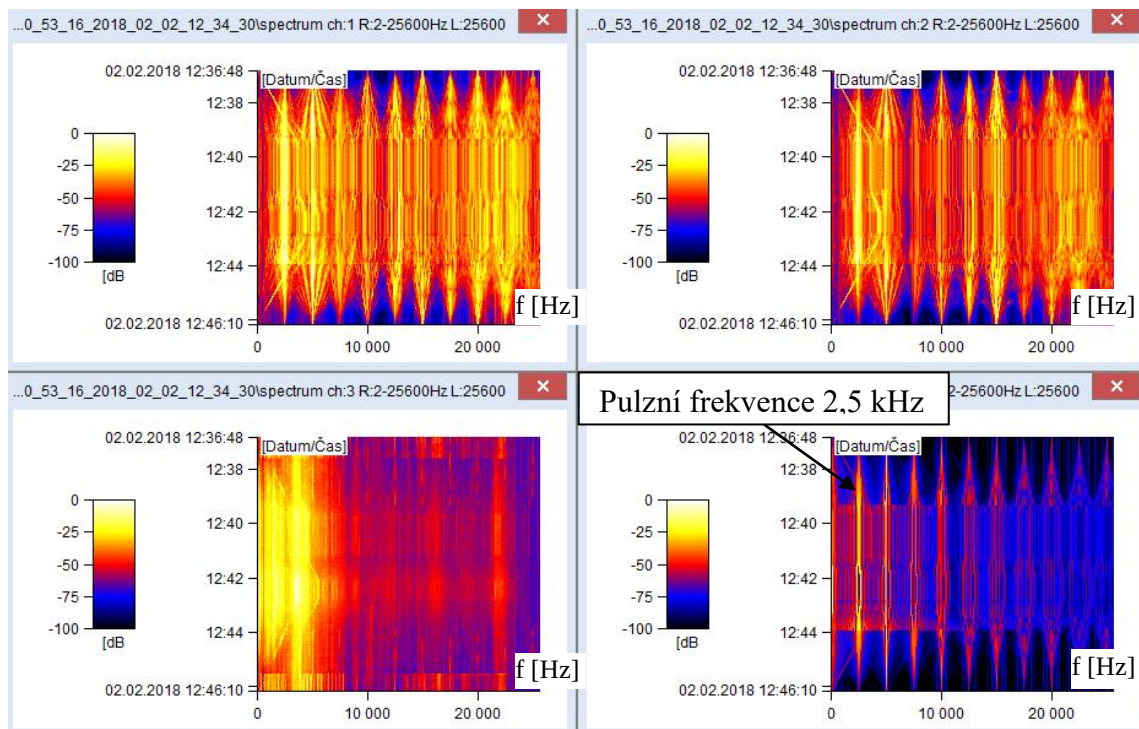
Obrázek 5.3: Srovnání otáček, RMS zrychlení a proudu

U záznamu RMS zrychlení (obrázek 5.3), které bylo provedeno v rozsahu 2-25600 Hz, už je vztah proudu a průběhů zrychlení významnější. Kanály CH1 a CH2 kopírují přesněji průběh proudu (CH4) než tomu bylo v případě rychlostí vibrací. Pouze na kanálu 3 (CH3), tedy na ložisku generátoru odděleném izolovanou spojkou a uzemněné kartáčem, jsou zachyceny nepatrné hodnoty zrychlení vibrací, které se během chodu motoru výrazně neměnily.



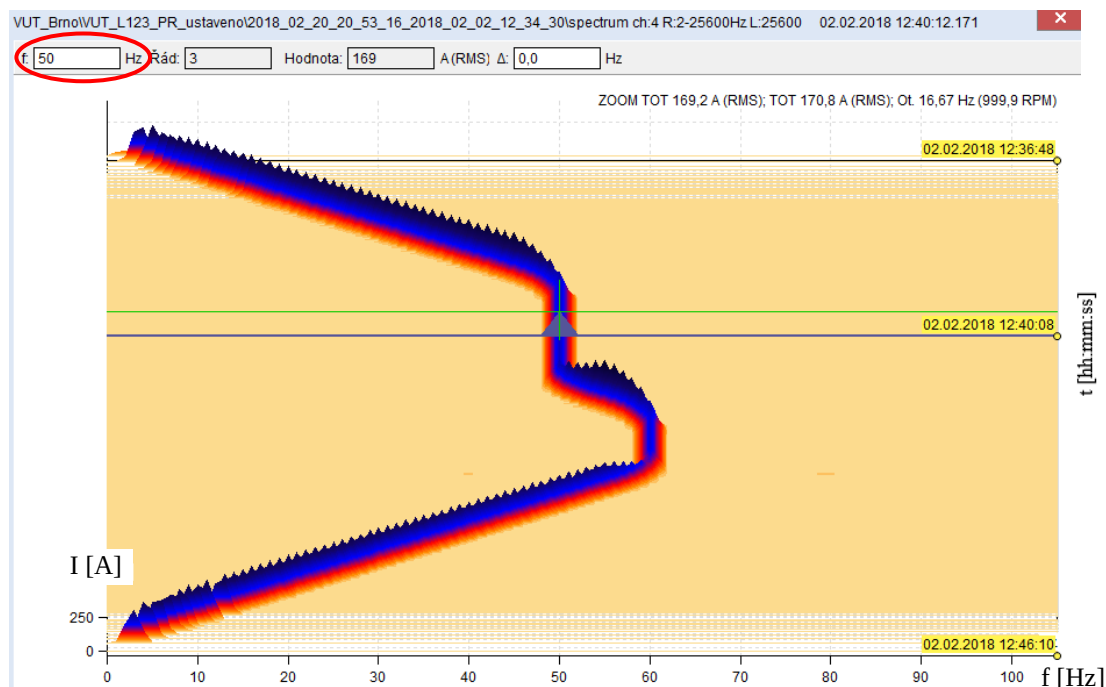
Obrázek 5.4: Srovnání kaskád RMS zrychlení a proudu

Na obr. 5.4 jsou viditelné harmonické násobky pulzní frekvence proudu ve vibracích. Na kanálu 3 (CH3) se tyto násobky frekvence díky dobře izolované spojnici a izolovanému kluznému ložisku nevyskytují. V kaskádě proudu (CH4) bylo třeba pro zobrazení násobků pulzních frekvencí přizpůsobit osu y a oříznout tak nejvýraznější amplitudu, která přísluší frekvenci napájecího proudu z měniče.



Obrázek 5.5: Srovnání spektrogramů RMS zrychlení a proudu

Názornější analogie mezi harmonickými frekvencemi proudu a vibracemi je patrná ze spektrografů, které zobrazují stejné informace jako kaskádový diagram, ovšem pouze s pomocí frekvenční a časové osy. Amplitudy jsou zde vyjádřeny v decibelové stupnici (obrázek 5.5). Na kanálu 4 (CH4) určenému pro proud je možné pozorovat pulzní frekvenci 2,5 kHz a její násobky 5; 7,5; 10; 12,5 kHz apod. i s postranními pásmy. Na stejných frekvencích se projevují i vibrace na kanálech 1 a 2 (CH1 a CH2). Jedná se o jasný důkaz vztahu mezi vibracemi a proudem a lze tedy konstatovat, že zmíněnými ložisky L1 a L2 prochází proud.



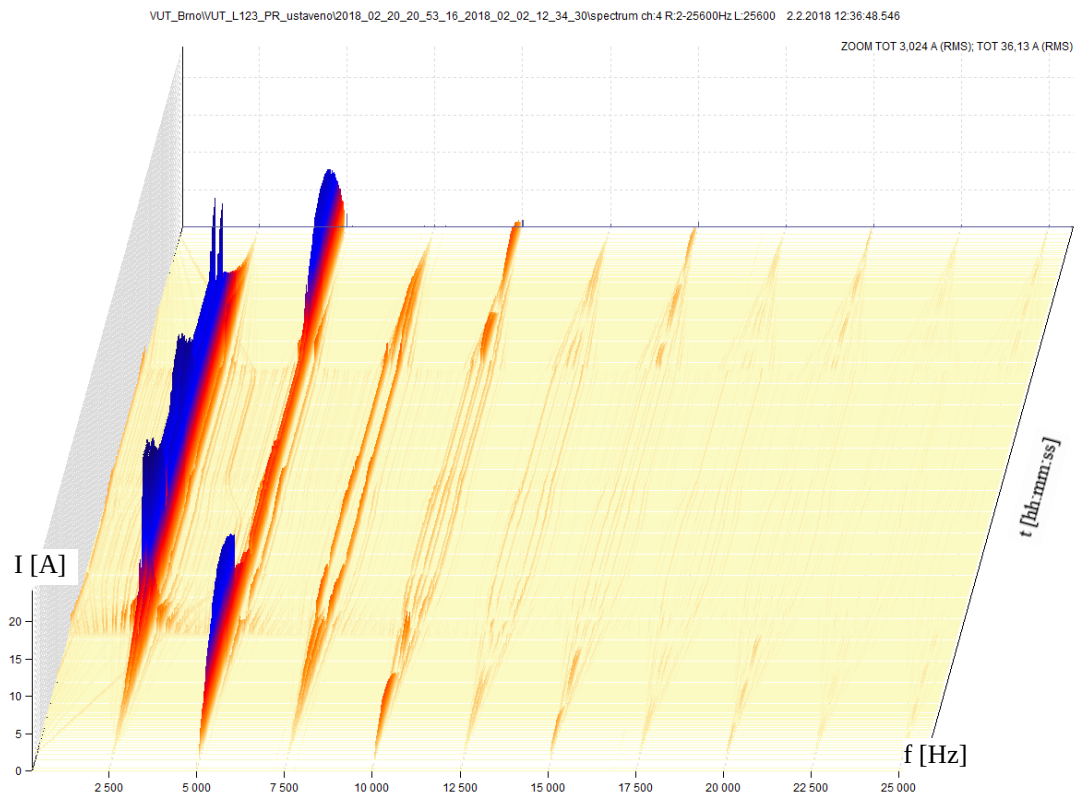
Obrázek 5.6: Napájecí frekvence proudu

Obrázek 5.6 ilustruje průběh napájecí frekvence proudu. Jedná se o detail napájecí frekvence proudu, která byla oříznuta na obrázku 5.4. Na ose x je rozsah nastaven do 100 Hz, tudíž násobky pulzní frekvence v řádu kilohertz zde nejsou zachyceny. Konstantní otáčky jsou na 50 Hz, viz zobrazený kurzor. To odpovídá u šestipólového stroje 1000 ot./min, což souhlasí s nastavením měření, viz kontrolní výpočet pomocí rovnice (7).

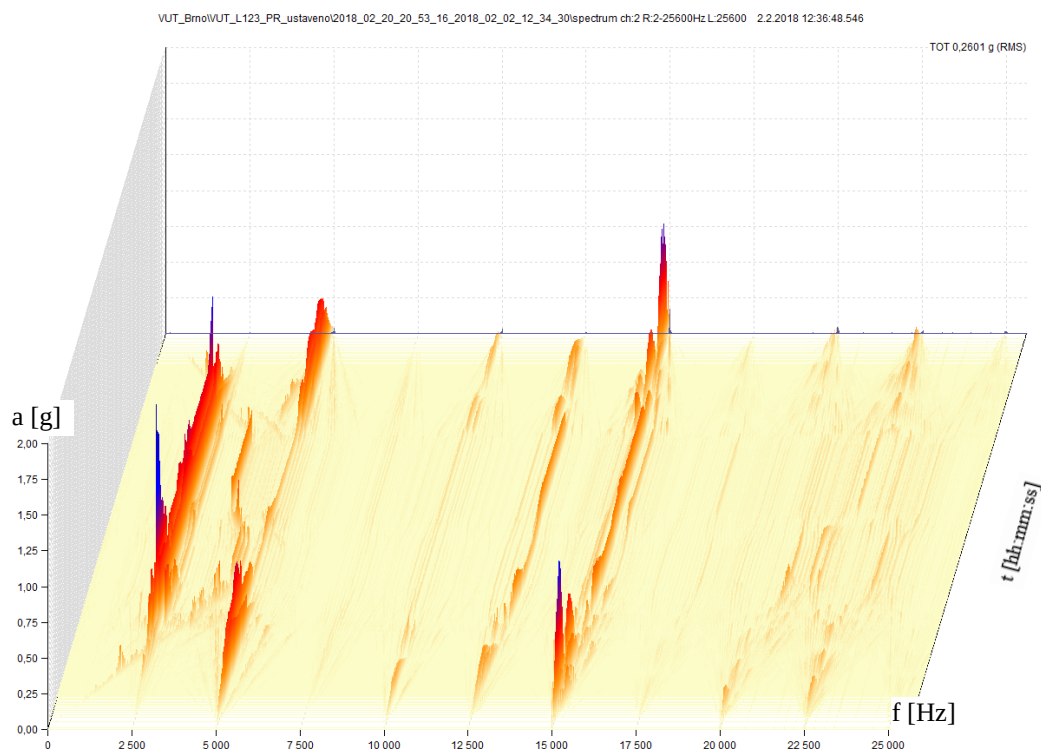
$$n_s = \frac{60f}{p} \quad (7)$$

Synchronní otáčky n_s jsou 1000 ot./min a počet pólových dvojic p je 3:

$$1000 = \frac{60f}{3} \Rightarrow f = \frac{3000}{60} = 50 \text{ Hz}$$



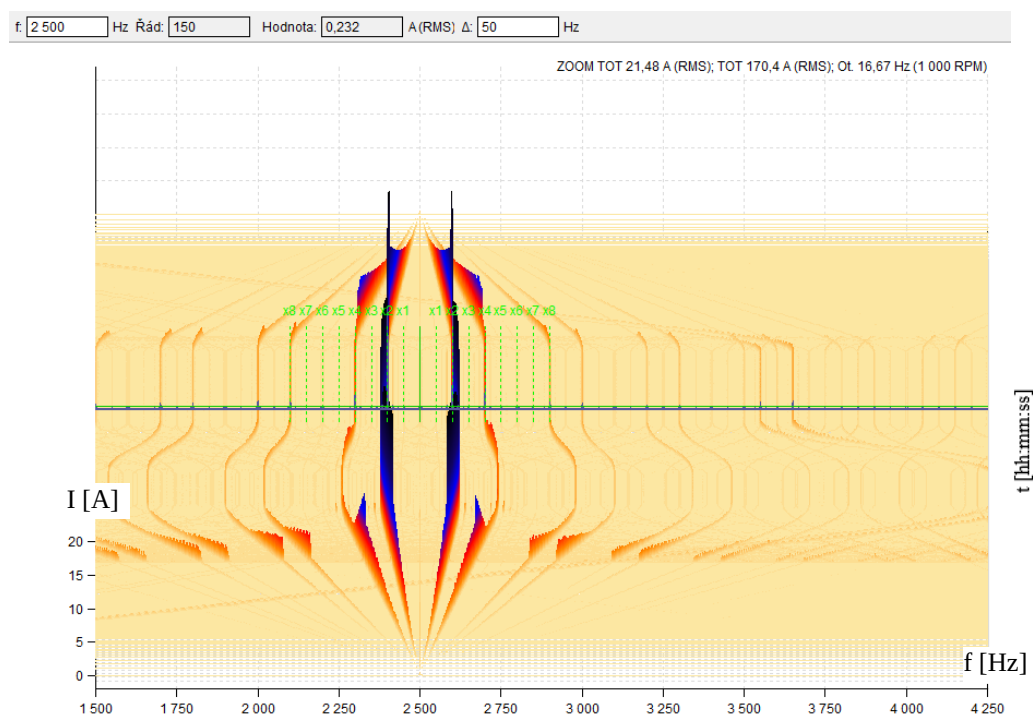
Obrázek 5.7: Detail kaskády proudu



Obrázek 5.8: Detail kaskády zrychlení vibrací ložiska L2

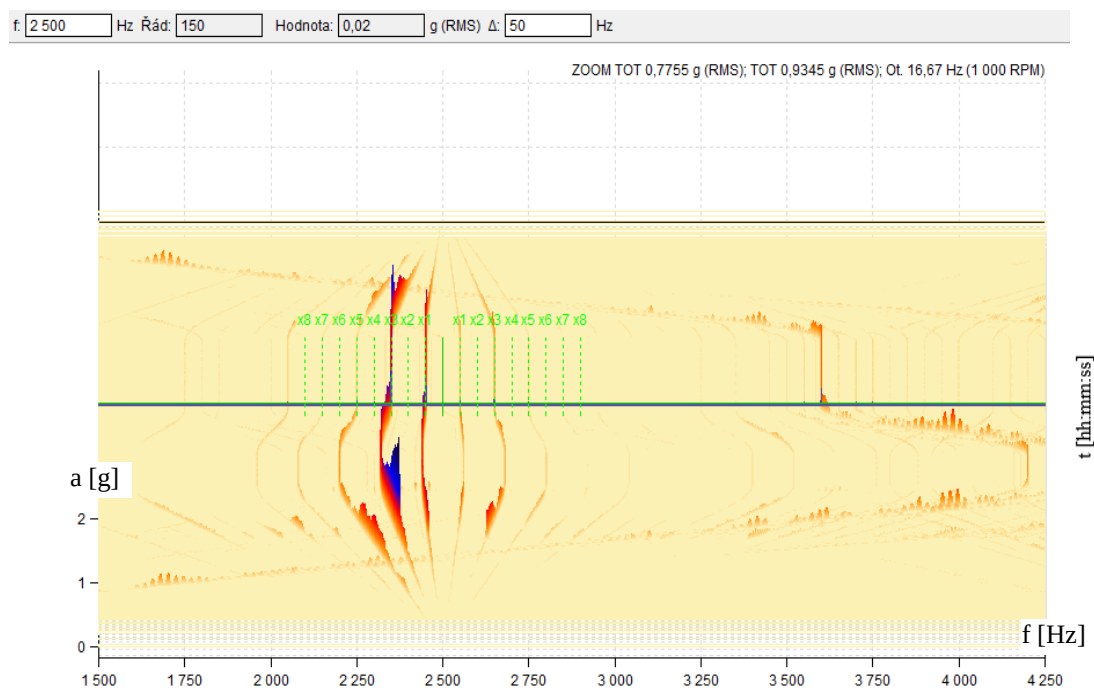
Při porovnání kaskád proudu a vibrací ložiska L2 (Obrázek 5.7 a Obrázek 5.8) si lze povšimnout paralely mezi průběhy na frekvenci 2,5 kHz a jejím násobku 5 kHz. Při rozběhu a brždění motoru je u vibrací i proudu největší amplituda na 5 kHz, kdežto v ustáleném stavu dominuje pulzní frekvence 2,5 kHz. Na obr 5.8 při 15 kHz se objevu-

je výrazná amplituda vibrací na začátku a na konci měření, což by mohlo mít souvislost s faktem, že motor je šestipólový a pulzní frekvence měniče je 2,5 kHz (2,5 kHz * 6 = 15 kHz).



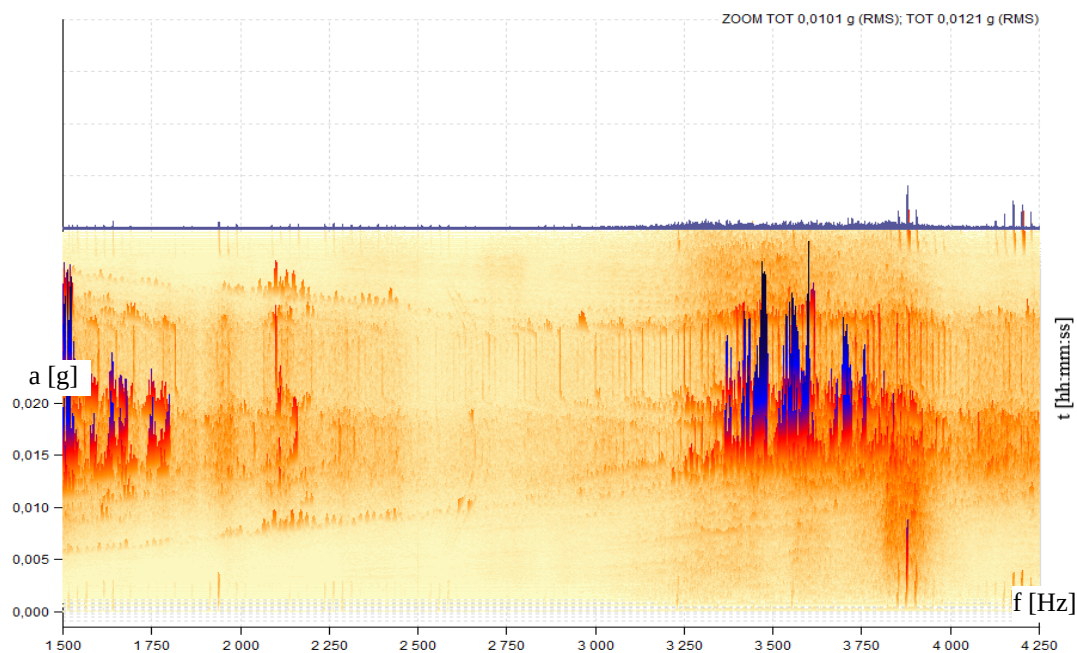
Obrázek 5.9: Detail postranních pásem proudu

Dalším důkazem o souvislosti mezi procházejícím elektrickým proudem a vyvolanými vibracemi je podobnost postranních pásem. V detailu postranních pásem proudu (obrázek 5.9) jsme si nastavili kurzor x1 na rozteč 50 Hz, tedy hodnotu napájecí frekvence. První dvě postranní pásma (kurzory x2 a x4) jsou od sebe vzdálena 100 Hz.



Obrázek 5.10: Detail postranních pásem u vibrací

U vibrací (obrázek 5.10) začínají postranní pásma na 50 Hz – kurzor x1 a další postranní pásmo je na 150 Hz, tedy rozteč mezi pásmy je stejná jako u postranních pásem proudu. Skutečnost, proč je 1. postranní pásmo u vibrací vzdálené 50 Hz a u proudu 100 Hz od nastavené pulzní frekvence, je zatím předmětem výzkumu. Při srovnání s kaskádou u ložiska generátoru žádný podobný vzorec v oblasti 2,5 kHz nenacházíme, viz obr. 5.11.



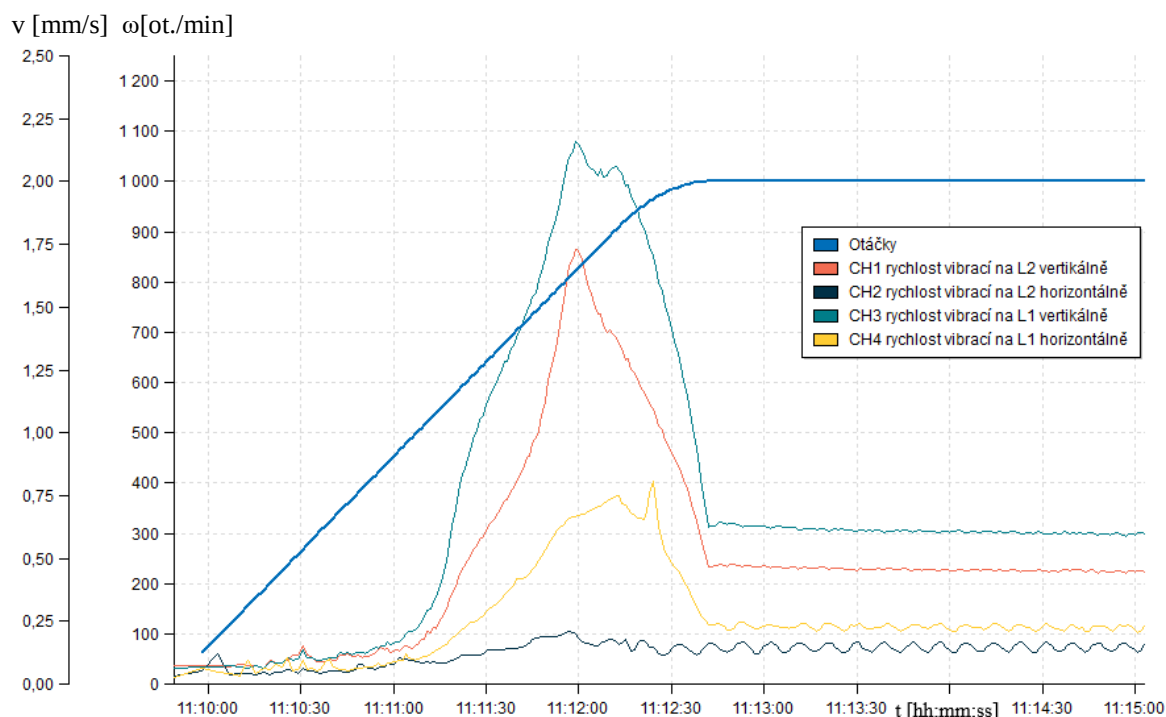
Obrázek 5.11: Detail kaskády u generátoru

5.2 Měření vibrací motoru v závislosti na velikosti pulzní frekvence

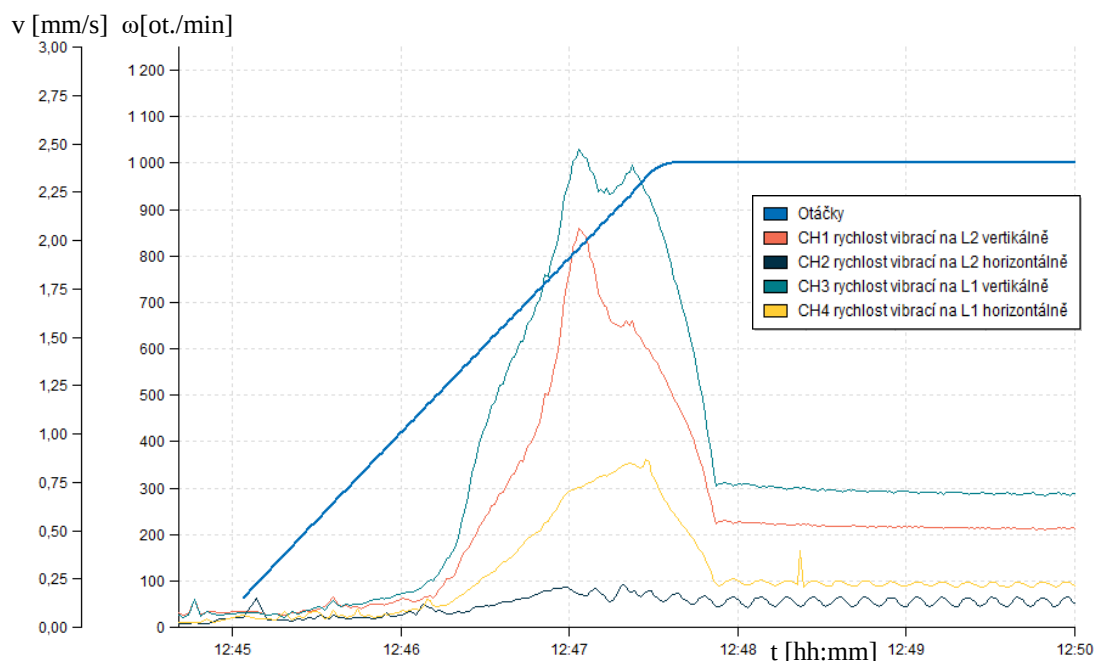
Jak bylo uvedeno již v kapitole 4, během tohoto měření jsme zaznamenávali pouze vibrace a to na NDE a DE straně motoru, vždy v horizontálním a vertikálním směru při různých hodnotách nastavení pulzních frekvencí měniče. Na NDE straně motoru je instalováno izolované ložisko.

5.2.1 Závislost rychlosti vibrací na změně pulzní frekvence

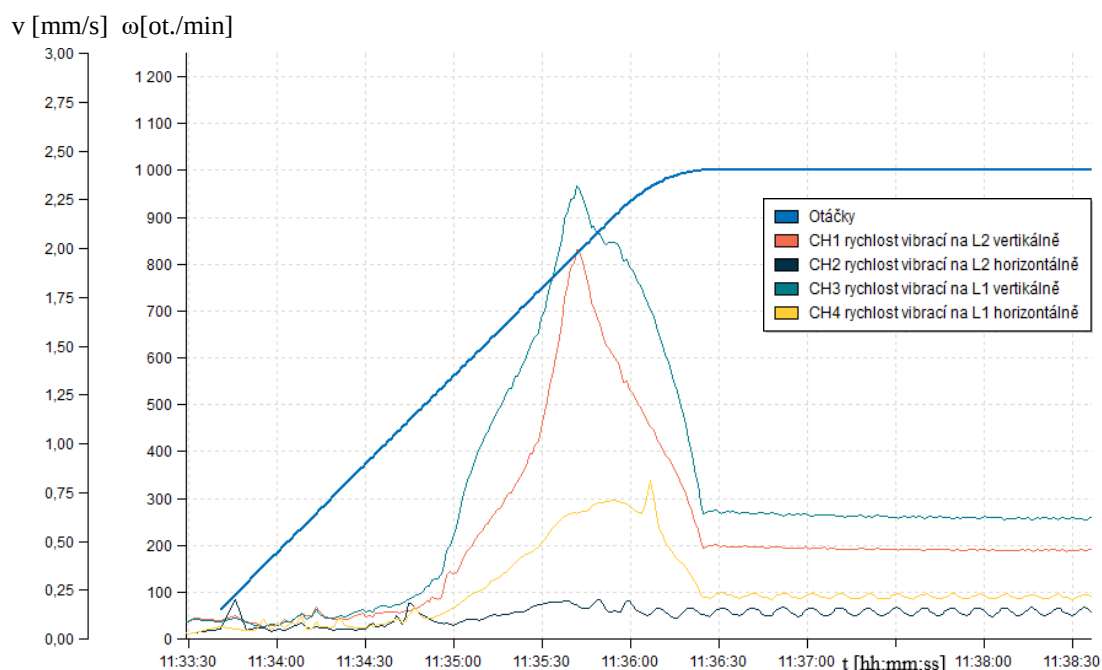
Z obrázků 5.12 až 5.14 vyplývá, že největší amplitudy rychlosti vibrací zachytila čidla ve vertikálním směru (CH1 a CH3), konkrétně největší byla na kanálu 3 na NDE straně motoru. Při porovnání amplitud mezi třemi pulzními frekvencemi se však tyto amplitudy vzájemně příliš neliší, rozdíl je do 15 %. Po přechodu do konstantní oblasti otáček (přibližně od 11:12:45 na obr.5.12) jsou hodnoty vibrací srovnatelné při všech pulzních frekvencích.



Obrázek 5.12: 1,25 kHz; Průběh RMS rychlostí a otáček při rozběhu

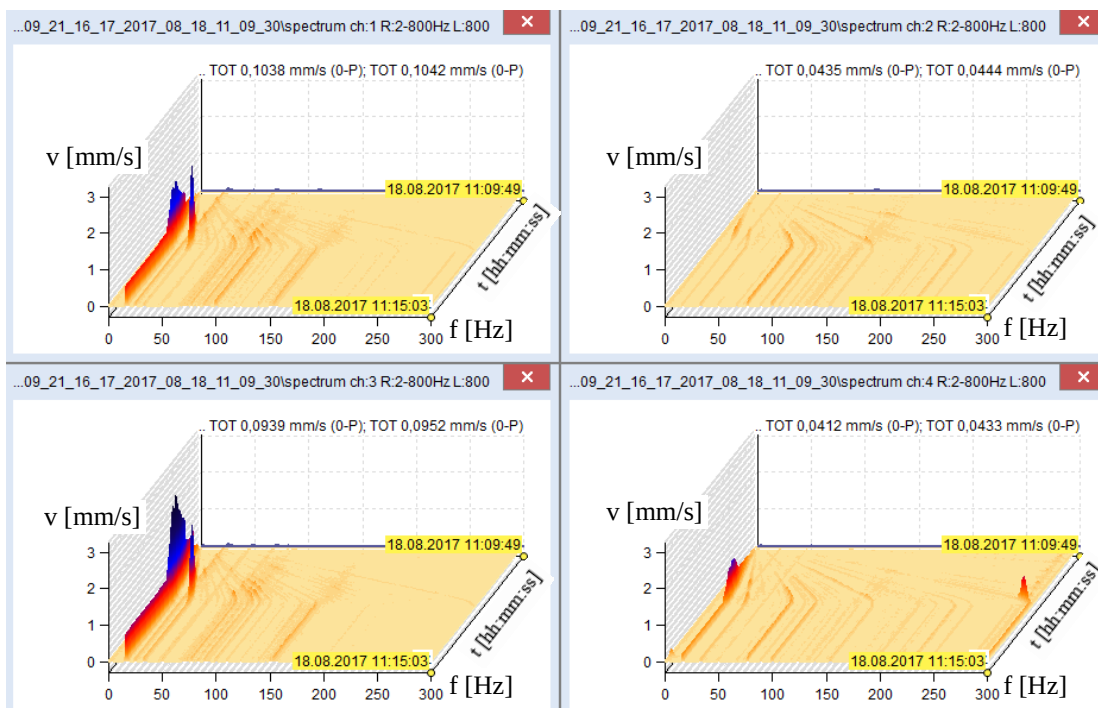


Obrázek 5.13: 2,5 kHz; Průběh RMS rychlostí a otáček při rozběhu

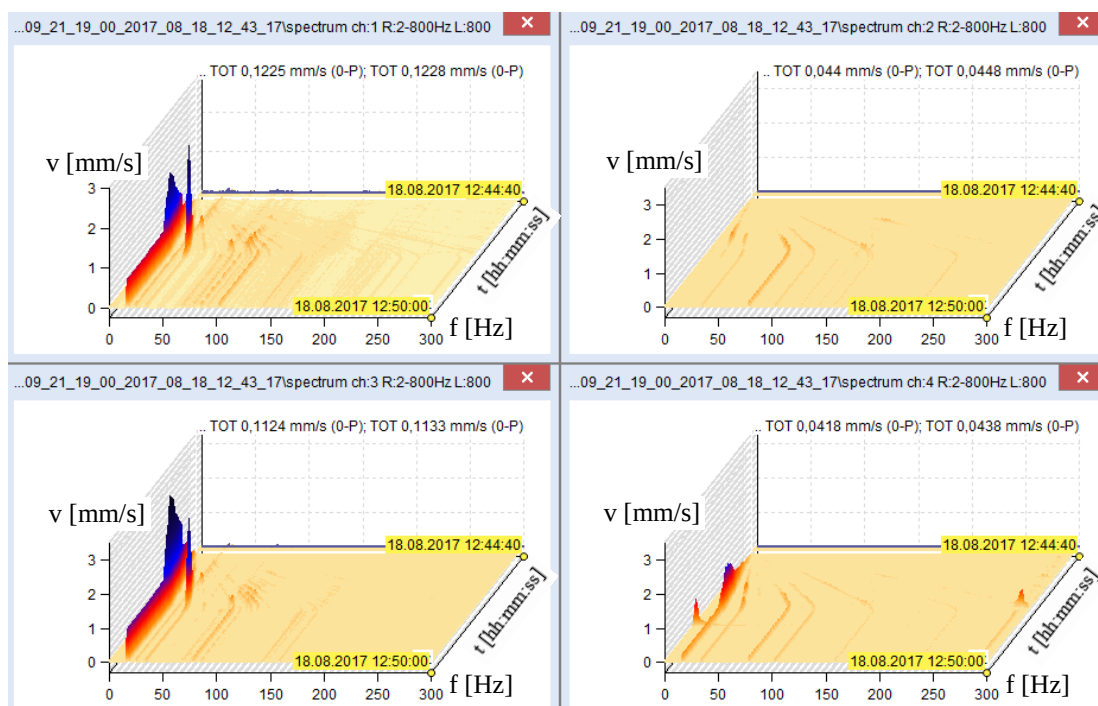


Obrázek 5.14: 5 kHz; Průběh RMS rychlostí a otáček při rozběhu

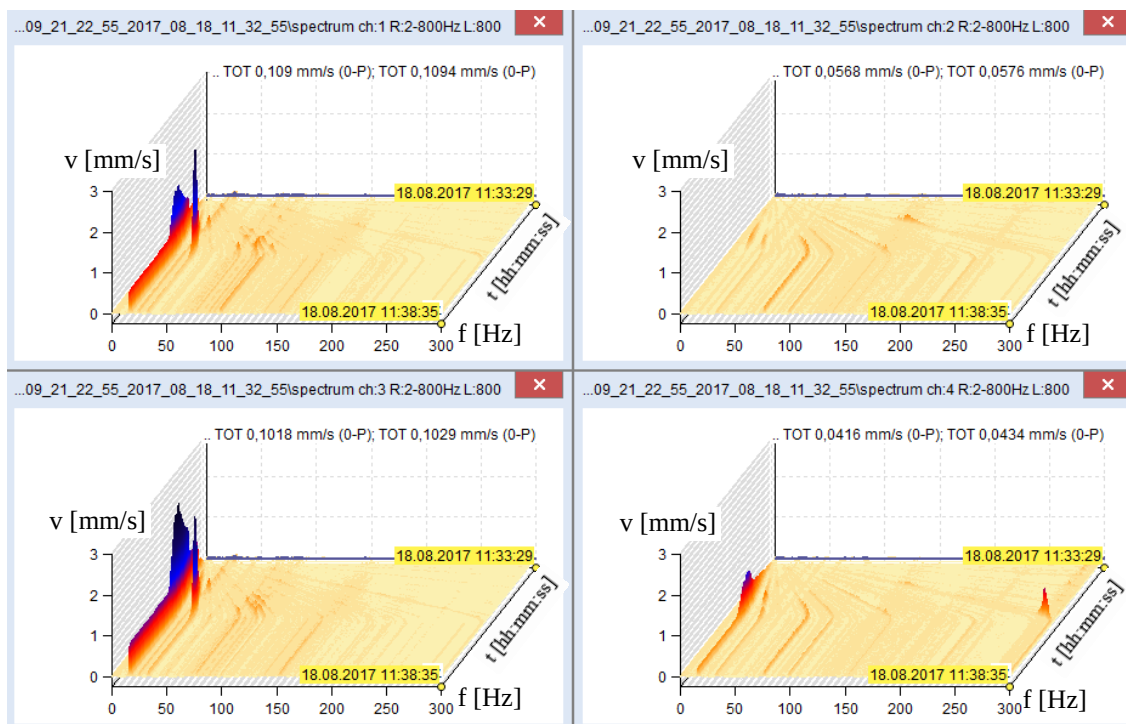
Obrázky 5.15 – 5.17 zobrazují kaskádové zobrazení rychlostí vibrací z čidel pro jednotlivě nastavené pulzní frekvence. Dominantní frekvencí je otáčková frekvence, zbylé mají téměř zanedbatelnou velikost. Ve spektrech rychlostí se potvrdilo, že rychlosti vibrací se v našem měření na horizontálních čidlech (kanály CH2 a CH4) v porovnání s vertikálními téměř neprojeví. Změna pulzní frekvence tedy v rozmezí 0-300 Hz neměla prakticky žádný vliv na spektra rychlostí vibrací.



Obrázek 5.15: 1,25 kHz; Kaskády RMS rychlostí ze všech čidel



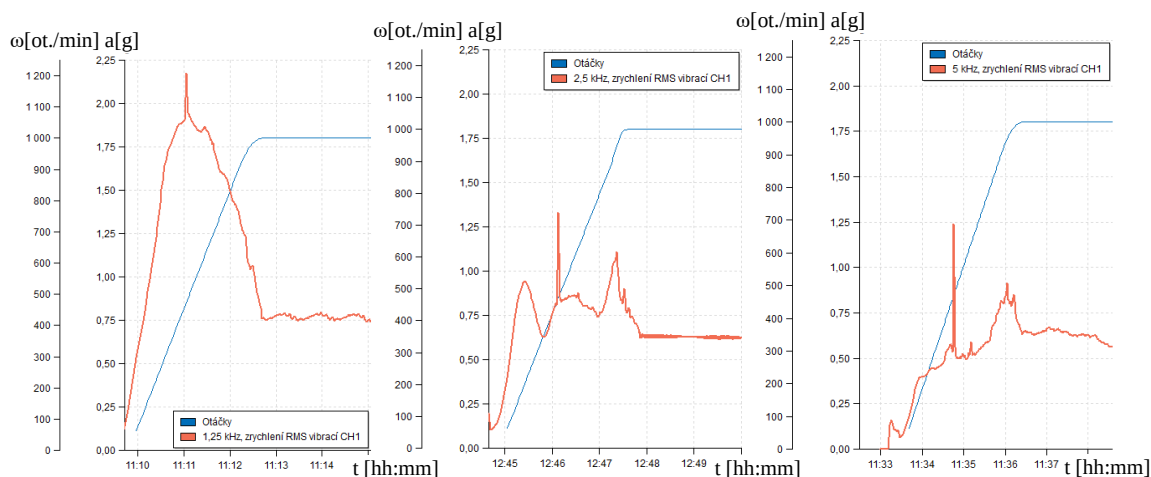
Obrázek 5.16: 2,5 kHz; Kaskády RMS rychlostí ze všech čidel



Obrázek 5.17: 5 kHz; Kaskády RMS rychlostí ze všech čidel

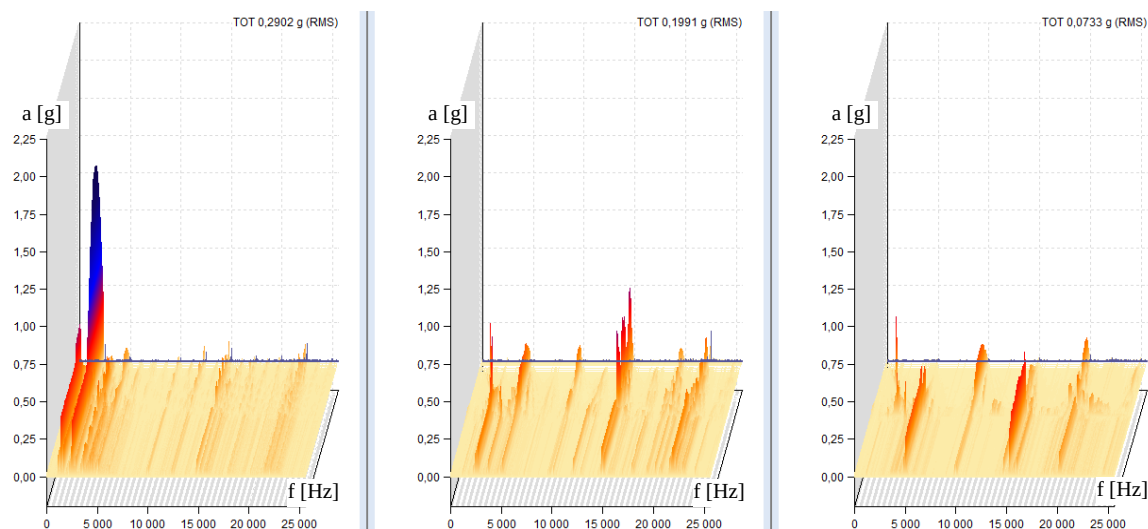
5.2.2 Závislost zrychlení vibrací na změně pulzní frekvence

Oproti rychlosti je ve zrychlení vibrací vliv změny pulzní frekvence již patrný. Zatímco u rychlosti byl na všech kanálech pozorován podobný charakter vibrací, u zrychlení jsou jednotlivé průběhy při rozběhu motoru velmi odlišné a ovlivněné nastavenou pulzní frekvencí. Proto byl zvolen odlišný způsob prezentace výsledků měření než u předchozího hodnocení závislosti rychlosti vibrací na změně pulzní frekvence. Pozornost byla zaměřena na individuální vývoj vibrací u jednotlivých čidel s ohledem na změnu pulzní frekvence. Na následujících obrázcích je pro každé čidlo samostatně (CH1-CH4) zachycen časový průběh zrychlení vibrací pro různě nastavenou pulzní frekvenci, viz legendy v obrázku 5.18, a tyto průběhy jsou na obrázku 5.19 doplněny příslušnými frekvenčními spektry.

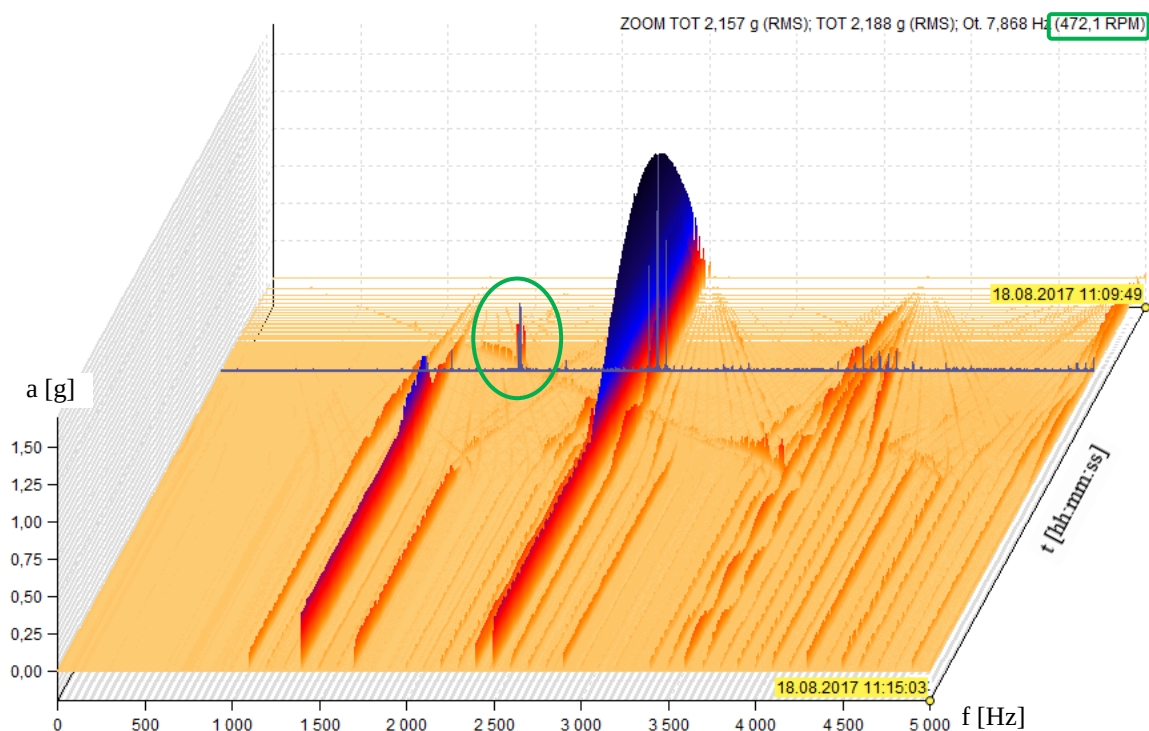


Obrázek 5.18: CH1; Průběhy zrychlení RMS vibrací a otáček při rozběhu

Obrázek 5.18 zachycuje průběhy vibrací z vertikálního čidla na DE straně motoru. Nejvyšší hodnoty zrychlení vibrací, přibližně 2,2 g, je dosaženo při frekvenci 1,25 kHz. Při 2,5 kHz je maximum 1,3 g a u 5 kHz cca 1,25 g. Společnou vlastností amplitud u tohoto čidla je, že ve všech měřeních jsou amplitudy ve formě špiček – peaků. Toto je detailněji vysvětleno níže. Z kaskád zrychlení vibrací na obrázku 5.19 je zřejmé, že se vibrace projevují zejména na násobcích jednotlivých pulzních frekvencí, což zvyšuje riziko vzniku nežádoucích kapacitních proudů.



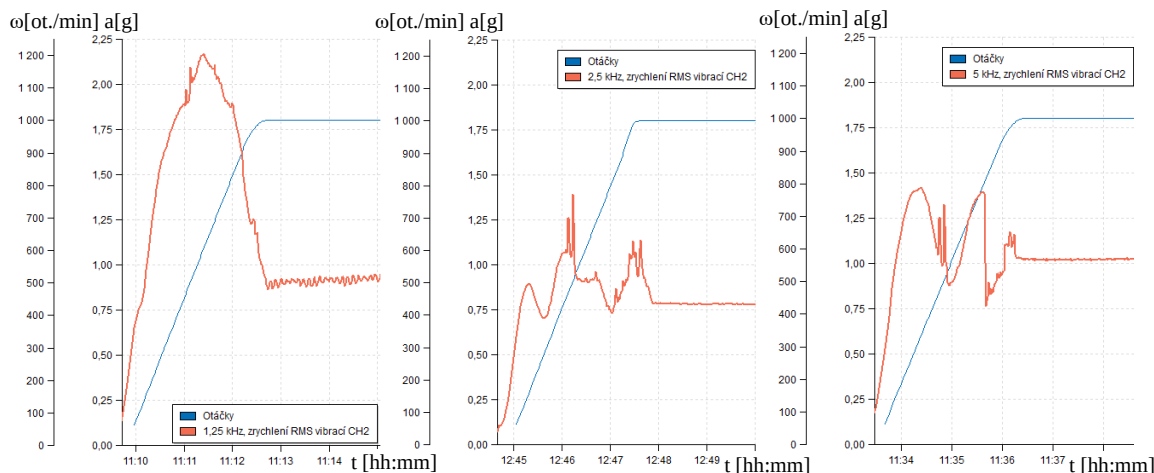
Obrázek 5.19: CH1; Kaskády zrychlení vibrací



Obrázek 5.20: CH1; 1,25 kHz; Detail kaskády zrychlení vibrací

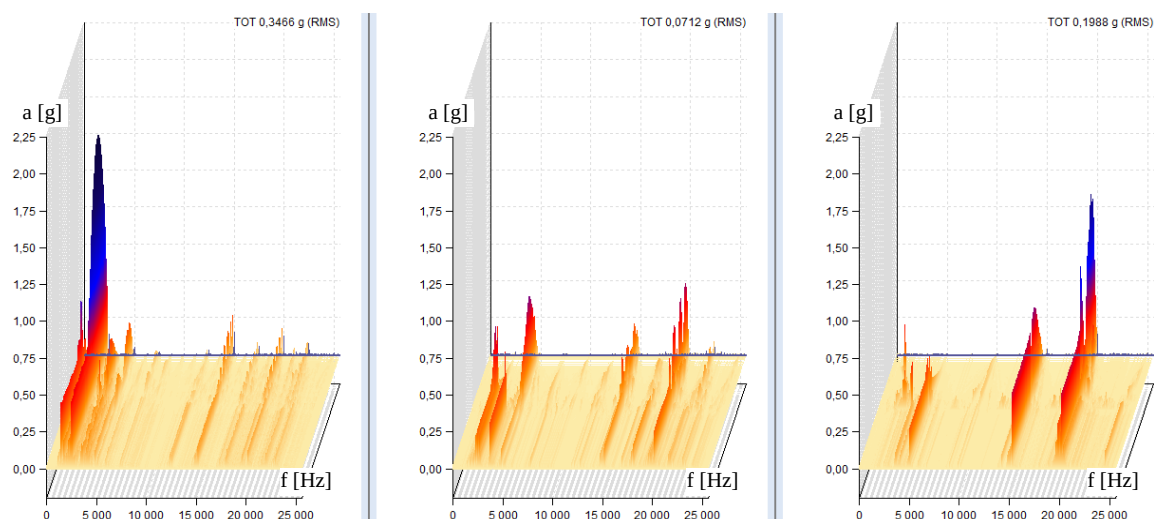
Na obrázku 5.20 je patrné největší zrychlení vibrací v pásmu 2,5 kHz, tedy na dvojnásobku pulzní frekvence. Tmavě modrý kurzor je nastaven na okamžik přibližně 11:11, kdy byl zachycen na obr. 5.18 maximální peak. Zde je tento peak zeleně zvýrazněn na frekvenci 1712 Hz, při otáčkách motoru 472 ot./min, viz údaj na obrázku vpravo

nahoře. Objevuje se i u ostatních měření vždy při uvedených otáčkách na všech kanálech, ale pouze na kanálech CH1 a CH4 představuje zároveň amplitudu zrychlení vibrací. Jedná se pravděpodobně o rezonanci některé z komponent soustrojí, jelikož je součástí násobku otáčkové frekvence, která zasahuje až mezi harmonické násobky pulzní frekvence měniče.



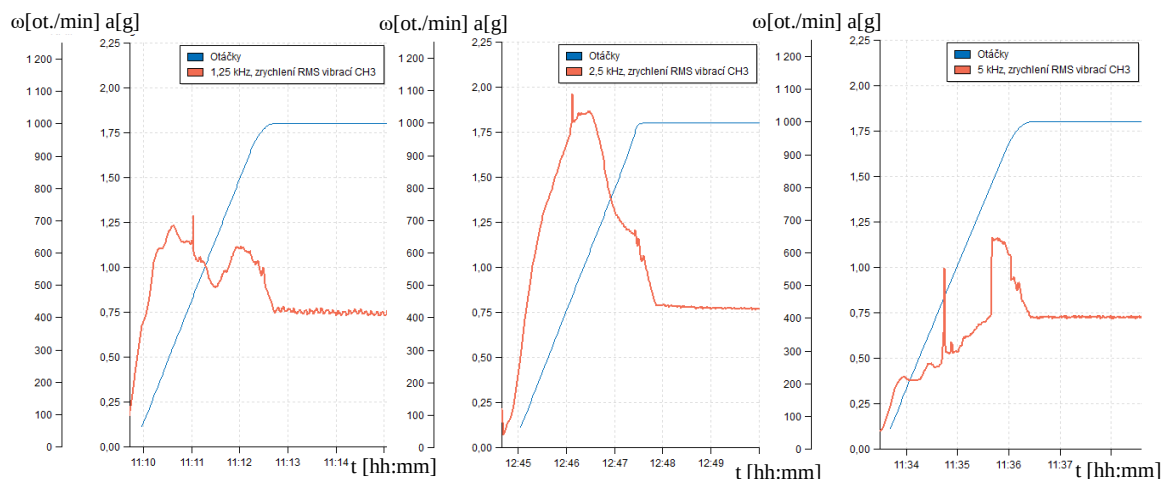
Obrázek 5.21: CH2; Průběhy zrychlení RMS vibrací a otáček při rozběhu

Druhé čidlo připojené na kanál CH2 měří vibrace v horizontálním směru na DE straně motoru. Opakuje se situace jako u prvního čidla, tedy největší zrychlení vibrací, cca 2,2 g, je zaznamenáno při pulzní frekvenci 1,25 kHz (obrázek 5.21). Trend klesajících amplitud zrychlení s rostoucí pulzní frekvencí se však u tohoto čidla nepotvrdil. Při 5 kHz je amplituda 1,4 g, zatímco u 2,5 kHz bez peaku pouze cca 1,1 g a tomu odpovídají i spektra, viz obrázek 5.22.



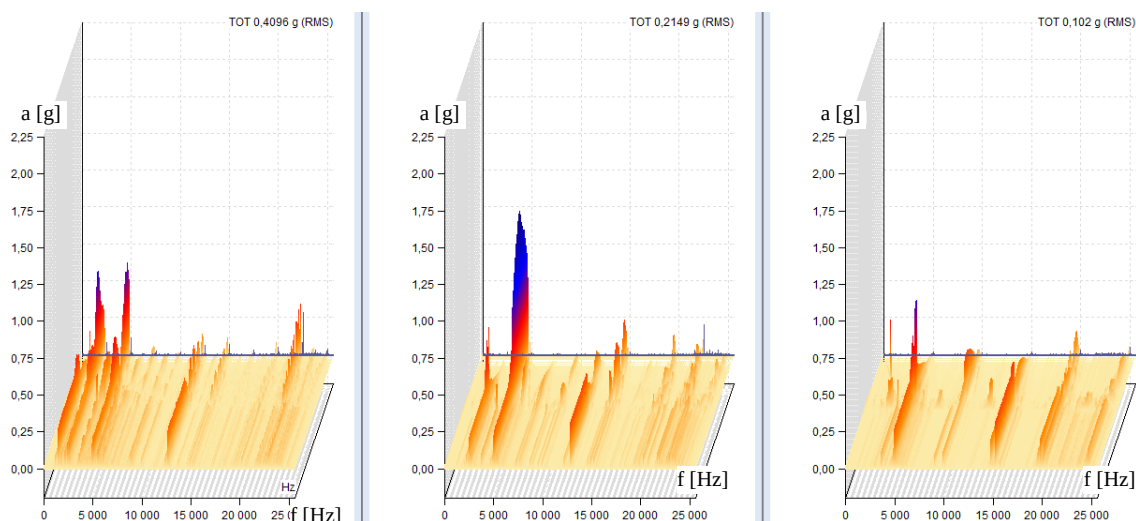
Obrázek 5.22: CH2; Kaskady zrychlení vibrací

Průběhy z kanálu CH3 (obrázek 5.23), který zaznamenává vibrace z horizontálního čidla na straně ventilátoru motoru (NDE), nekorespondují s doposud popsanými průběhy. Maximum zrychlení vibrací, přibližně 1,9 g můžeme pozorovat při pulzní frekvenci 2,5 kHz. Následuje 1,25 g u 1,25 kHz a 1,15 g u 5 kHz.



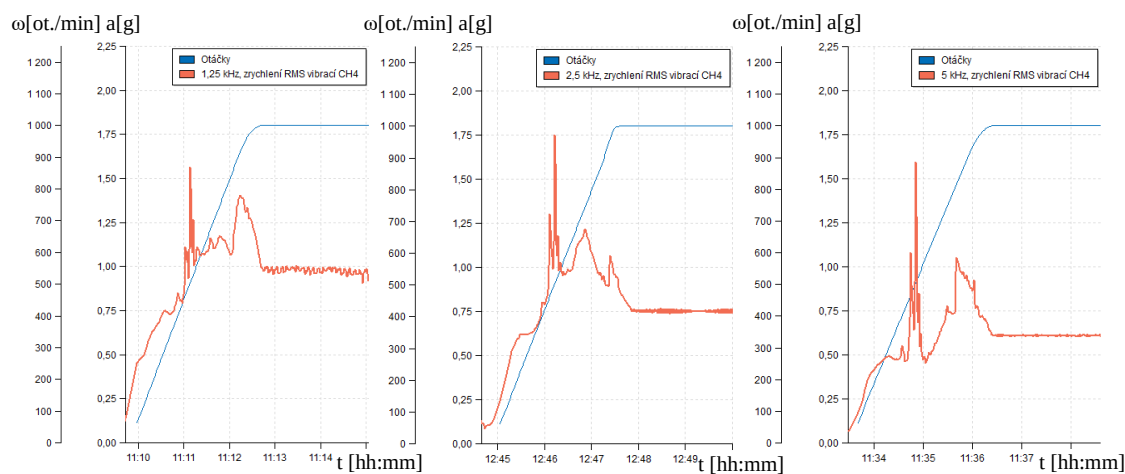
Obrázek 5.23: CH3; Průběhy zrychlení RMS vibrací a otáček při rozběhu

Kaskády zrychlení vibrací na obrázku 5.24 poskytují opět náhled na frekvenční spektrum zrychlení vibrací s předpokládanými amplitudami na násobcích pulzních frekvencí.

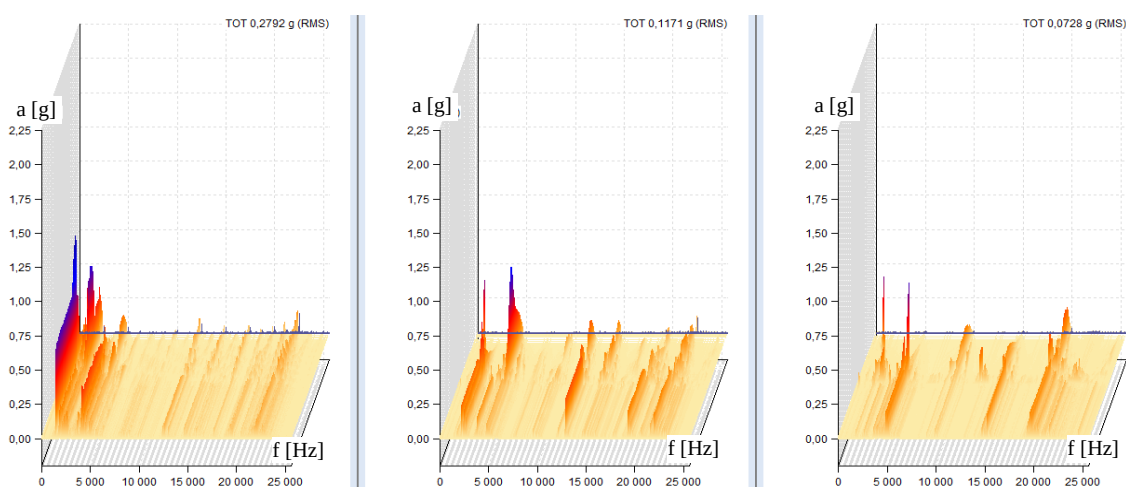


Obrázek 5.24: CH3; Kaskády zrychlení vibrací

U posledního čidla, měřícího v horizontálním směru na straně ventilátoru (obrázek 5.25), se opět výrazně projevuje peak popsany pod obrázkem 5.20. Pokud bychom jej zanedbali, amplitudy zrychlení vibrací budou klesat s nárůstem pulzní frekvence tak, jako u prvního čidla. Avšak klesat budou nejen amplitudy, ale i ustálené průběhy zrychlení vibrací při konstantních otáčkách motoru, viz obrázek 5.25. S rostoucí pulzní frekvencí klesá ustálená hodnota vibrací z 1 g na přibližně 0,6 g. Zrychlení vibrací ve frekvenčním spektru je patrné na obrázku 5.26.

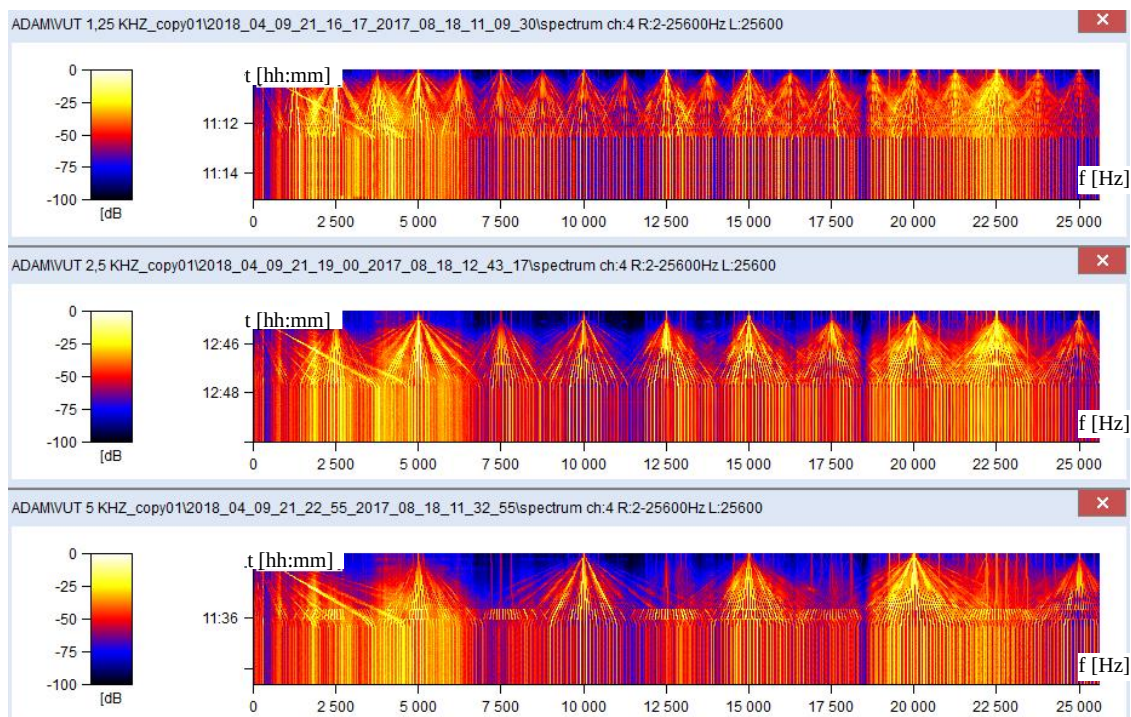


Obrázek 5.25: CH4; Průběhy zrychlení RMS vibrací a otáček při rozběhu



Obrázek 5.26: CH4; Kaskády zrychlení vibrací

Lze konstatovat, že změna pulzní frekvence má jednoznačný vliv na frekvenční spektrum zrychlení vibrací. Plyne to zejména ze spektrografů vibrací, viz obrázek 5.27, a rovněž z průběhů kaskád, kde se s rostoucí pulzní frekvencí objevují vibrace na vyšších harmonických frekvencích. Pro ilustraci byl vybrán spektrograf zrychlení vibrací z čidla 4.



Obrázek 5.27: CH4; Spektrografy zrychlení vibrací pro pulzní frekvence 1,25, 2,5 a 5 kHz

Z výše uvedených průběhů zrychlení vibrací však nelze vyvodit jednoznačný závěr pro amplitudy. Amplitudy zrychlení vibrací se při změně pulzní frekvence mění, ale ve srovnání s amplitudami rychlostí vibrací u každého čidla odlišně a není jednoduché najít opakující se trend. U dvou čidel (CH1 a CH4) se s rostoucí pulzní frekvencí hodnoty zrychlení vibrací snižovaly, avšak u zbylých se toto nepotvrdilo. Ke zpřesnění výsledků by mohlo pomoci opakování měření, případně nastavení více pulzních frekvencí na měniči.

6 Vyhodnocení měření

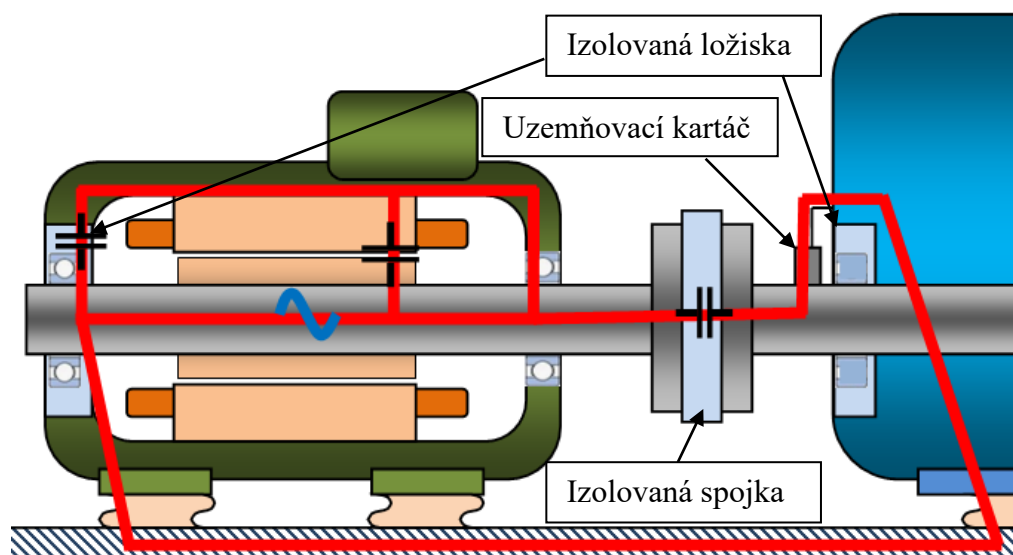
6.1 Vyhodnocení prvního měření a návrh opatření

V prvním měření byl porovnáván projev pulzní frekvence měniče ve spektru proudu a ve spektru vibrací motoru i generátoru.

Ve spektru rychlosti vibrací a proudu do 500 Hz nebyl vliv pulzní frekvence patrný. Byla pozorována pouze napájecí frekvence proudu. Ve spektrech vibrací byly zaznamenány jen frekvence závislé na otáčkách motoru. Při zvětšení frekvenčního rozsahu do 25 600 Hz již bylo možné pulzní frekvenci a její násobky ve spektru proudu snadno identifikovat. V tomto rozsahu bylo následně hodnoceno i zrychlení vibrací.

Na základě vzájemné podobnosti spekter proudu a zrychlení vibrací z ložisek motoru je možné usuzovat, že jimi prochází kapacitní ložiskové proudy. Svědčí o tom spektrografie, srovnání detailních spekter zrychlení vibrací a proudu na obrázcích 5.7 a 5.8 a také shodné rozpětí postranních pásem na obrázcích 5.9 a 5.10. Ložisko generátoru bylo na základě výsledků ze spekter před proudem ochráněno.

Opatření v podobě izolovaného ložiska na straně ventilátoru motoru se ukázalo být neúčinné pro vysoké frekvence. Jedná se zde pravděpodobně o kapacitní proudy vyskytující se u soustav napájených z měniče, viz kap. 2.2. Na kluzném ložisku generátoru, které bylo chráněno ještě uzemňovacím kartáčem (obrázek 3.7) a izolovanou spojkou, se však přítomnost kapacitního proudu nepotvrdila, viz schéma testovací soustavy s červeně vyznačenou cestou kapacitního proudu (obrázek 6.1). Značky kondenzátorů na tomto obrázku symbolizují obdobné chování izolací při průchodu vysokofrekvenčního kapacitního proudu.



Obrázek 6.1: Schéma testované soustavy s opatřeními proti ložiskovému proudu

Opatření, která by vzniku nebo průchodu ložiskových proudů zabránila, existuje několik:

- instalace izolovaného ložiska s velkou impedancí
- aplikace uzemňovacího kartáče k hřídeli
- použití filtrů na vstupu i výstupu měniče + motorová tlumivka
- instalace hybridního ložiska
- použití vhodných symetrických stíněných kabelů
- důkladné pospojování neživých částí soustavy
- důraz na odstranění mechanických nesymetrií již při konstrukci stroje

Žádné z nich však neposkytuje absolutní ochranu za všech okolností. Na základě výsledků našeho měření lze konstatovat, že nejbezpečnější se jeví použití kombinace několika opatření s přihlédnutím k dané soustavě. Významnou roli, kterou je třeba zohlednit, hrají také časové a ekonomické faktory a stanovisko osob zodpovědných za údržbu zařízení.

Ložisko vystavené působení proudu ztrácí svoje mazací vlastnosti. Proud se může podílet na degradaci maziva tím, že jej rozkládá a mazivo oxiduje. Ložiska jsou pak hůře mazána, teplota v ložisku se zvyšuje. Mazivo přestává vázat olejovou složku v pojivu (mýdle). Dráha ložiska a valivé elementy jsou vlivem vysokofrekvenčních proudů poškozeny tak, že životnost ložisek je výrazně snížena, případně může dojít i k velmi rychlé změně funkčnosti ložisek a k jejich havárii.

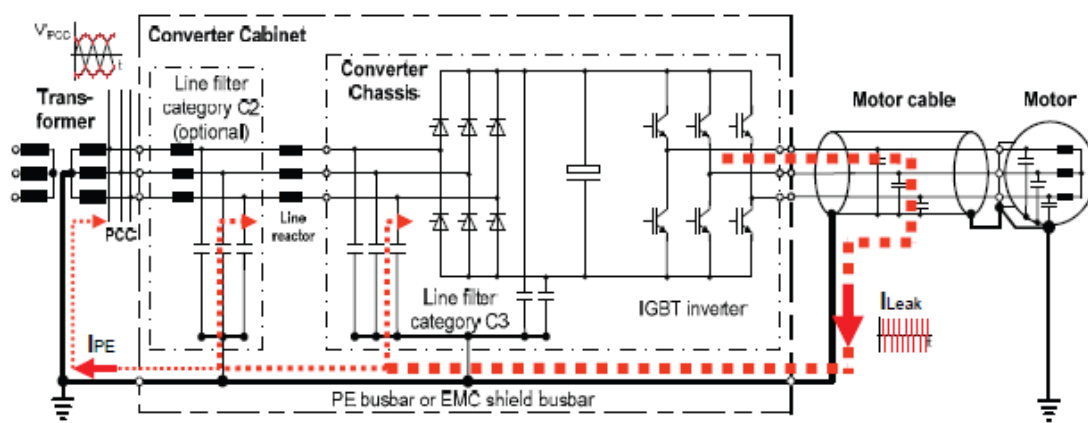
V následujících podkapitolách budou navržena řešení, která by měla požadovanou životnost ložisek zvýšit. Výhody a omezení instalace izolovaného ložiska byly již popsány v dosavadním průběhu práce.

6.1.1 Aplikace uzemňovacího kartáče

Částečným řešením by mohla být instalace uzemňovacího kartáče na DE straně motoru, čímž by se vyrovnal potenciál mezi rotorem a statorem a DE ložisko by bylo chráněno. Zároveň se jedná o relativně levné a rychlé řešení, což bývá často rozhodující faktor. Nevýhodou je postupné opotřebení kartáče a nutná údržba. Přes NDE ložisko by navíc stále mohl téct kapacitní proud.

6.1.2 Použití filtrů na vstupu měniče

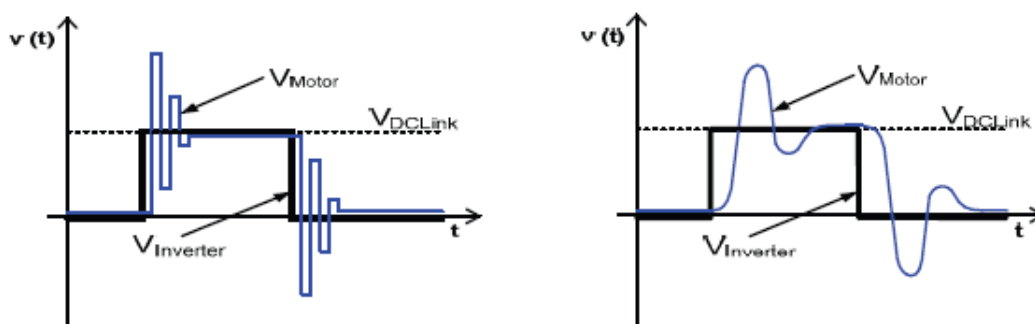
Filtry na vstupu měniče (Line filters) slouží k odstranění vysokofrekvenčního rušení, které vzniká ve střídači. Rychlým spínáním IGBT tranzistorů se generují strmé napěťové pulzy a výsledné proudové špičky prochází přes kapacity kabelů a zemnění zpět do měniče. Na obrázku 6.2 je červeně vyznačen průchod proudu a rovněž filtry, které se snaží minimalizovat jeho vliv na napájecí síť a omezit jeho šíření do okolí. [14]



Obrázek 6.2: Rušení vznikající v měniči a vliv filtrů [14]

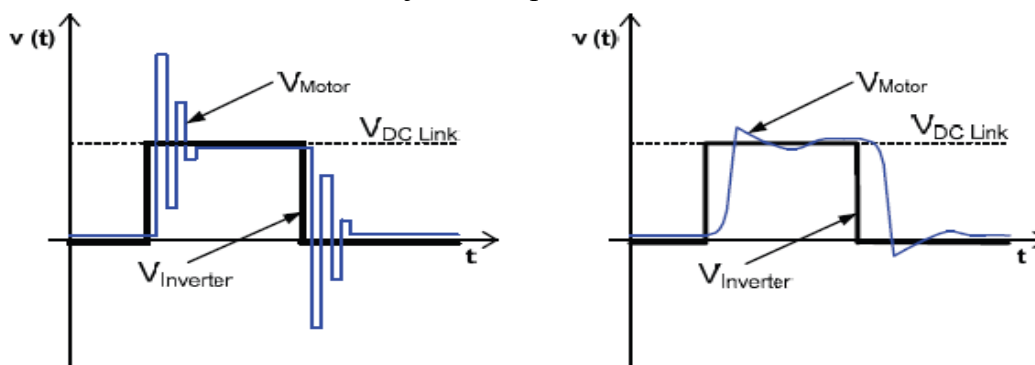
6.1.3 Použití motorové tlumivky a filtrů na výstupu měniče

Motorová tlumivka omezuje kapacitní proudy v případě použití dlouhých kabelů a filtruje rušení v podobě ostrých napěťových pulzů přicházejících z měniče na svorky motoru. Je vhodné ji umístit co nejbližší výstupu měniče. Vliv tlumivky na napěťové pulzy je patrný z obrázku 6.3. [14]



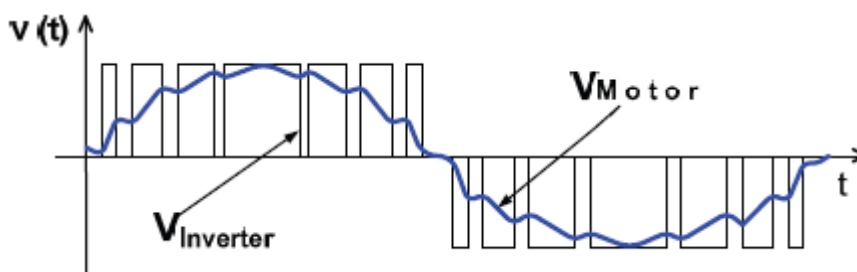
Obrázek 6.3: Napětí na výstupu měniče bez tlumivky (vlevo) s tlumivkou (vpravo) [14]

Du/dt filtr funguje na podobném principu jako motorová tlumivka. Navíc využívá diodového můstku, který je připojen na stejnosměrný meziobvod měniče, a ořezává tak napěťové špičky přibližně na úroveň napětí meziobvodu, viz obrázek 6.4. Omezením je však nastavení maximálně dvojnásobku pulzní frekvence. [14]



Obrázek 6.4: Napětí na výstupu měniče bez du/dt filtru (vlevo) s du/dt filtrem (vpravo) [14]

Sinusový filtr pracuje na principu dolnoproustního LC filtru, který zabraňuje průchodu vyšších frekvencí. Jedná se o nejsofistikovanější a také nejdražší nástroj pro filtraci napěťových špiček z měniče. Výsledné napětí obsahuje málo harmonických a má téměř sinusový charakter jako při napájení ze sítě, viz obrázek 6.5. [14]



Obrázek 6.5: Napětí na výstupu měniče se sinusovým filtrem [14]

6.1.4 Hybridní ložisko

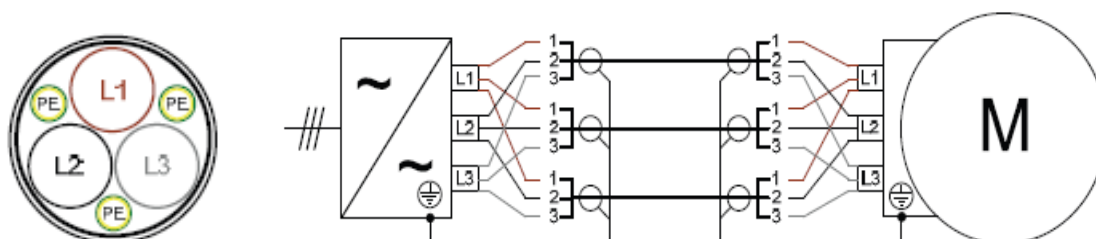
Hybridní ložisko (obrázek 6.6) se skládá z ocelových kroužků, klece a valivých těles z nitridu křemíku. Tato keramická sloučenina má výborné elektroizolační vlastnosti, díky kterým je ložisko chráněno proti poškození ložiskovými proudy. Dalším benefitem je nízký součinitel tepelné roztažnosti, což znamená menší citlivost na teplotní změny. Nitrid křemíku je také přibližně o polovinu lehčí a zároveň pevnější než ocel, tudíž klec není při rozběhách valivými tělesy tak namáhána. Nízký koeficient tření zajišťuje menší opotřebení a delší životnost v porovnání s konvenčními ocelovými ložisky. [15]



Obrázek 6.6: Hybridní ložisko s keramickými valivými tělesy [15]

6.1.5 Použití vhodných symetrických stíněných kabelů

U měničů s vyšším výkonem je často proud do motoru veden paralelními kabely. Je důležité dbát na použití stíněných kabelů a na symetrické rozdělení vodičů jednotlivých fází i ochranných PE vodičů v kabelech za účelem minimalizace šíření magnetického pole do okolí, viz příklad tří paralelních kabelů na obrázku 6.7. [14]



Obrázek 6.7: Průřez a symetrické rozdělení jednotlivých vodičů v kabelech [14]

6.1.6 Důkladné pospojování neživých částí soustavy

Důkladné propojení neživých částí a jejich uzemnění je důležité pro vyrovnaní potenciálu mezi jednotlivými částmi soustrojí, například mezi transformátorem, měničem, motorem, převodovkou a poháněným zařízením. Bohužel se v průmyslu tato opatření spolu s prevencí často zanedbávají a nedostatky se projeví až při vyšetřování vzniklých potíží. Snahou je zamezení vzniku vyrovnávacích proudů mezi jednotlivými zařízeními a zajištění bezpečnosti při poruše. Pro vysokofrekvenční aplikace jsou vhodné pružné propojky (obrázek 6.8), které vykazují při vysokých frekvencích nižší impedanci. [14]



Obrázek 6.8: Pružné vodivé propojky [14]

6.1.7 Důraz na odstranění mechanických nesymetrií již při konstrukci stroje

Jak již bylo uvedeno v druhé kapitole mechanické nesymetrie mají za následek vznik hřídelových napětí mezi konci hřídele. Při překročení určité hodnoty napětí mohou vznikat ložiskové proudy. V porovnání s výrobou motorů v minulém století se technologie v posledních desetiletích výrazně posunuly kupředu. Vývoj počítačů a automatizace výrobních procesů umožnily přesnější a kvalitnější produkci točivých strojů s požadovanými tolerancemi. Přesto materiálové a konstrukční faktory zůstávají stále jednou z oblastí, kde jsou inovace a investice velmi potřebné.

6.2 Vyhodnocení druhého měření

Při druhém měření bylo zkoumáno, jaký vliv má změna pulzní frekvence na vibrace asynchronního motoru, proud nebyl zaznamenáván.

Ukázalo se, že změna pulzní frekvence se neprojeví příliš výrazně u rychlosti vibrací. Při měnění se pulzní frekvenci zůstal charakter rychlostí vibrací stejný. Největších amplitud rychlosti bylo ve všech případech dosaženo na vertikálním čidle (CH3). Naopak nejmenší hodnoty zachytilo horizontální čidlo na kanálu CH2. Pořadí čidel s ohledem na amplitudu se při různých pulzních frekvencích nezměnilo. Je to způsobeno tím, že se rychlost projevuje ve frekvenčním spektru v řádech stovek Hz, kde se projevují především mechanické vlivy, jako je zbytková nevývaha, usazení, ohnutý rotor apod. Pulzní frekvence jsou obvykle v řádu kHz. Tento výsledek potvrzoval závěry prvního měření.

Pro posouzení vlivu pulzních frekvencí na zrychlení vibrací bylo třeba frekvenční pásmo s ohledem na možnosti měřícího zařízení rozšířit do 25 600 Hz. Frekvenční charakter zrychlení vibrací se při různých pulzních frekvencích výrazně měnil. Vibrace se projevovaly na dané pulzní frekvenci a jejích odpovídajících násobcích, viz spektrografy na obrázku 5.27.

Z provedeného měření však nevyplývá jednoznačný závěr pro amplitudy. Chovají se nepředvídatelně a to i ve srovnání mezi jednotlivými čidly při stejné pulzní frekvenci. Výsledné maximální hodnoty vibrací z čidel byly částečně ovlivněny i peakem - špičkou mechanického původu, zachyceného na spektru na obrázku 5.20. Ve dvou případech (CH1 a CH4) byla prokázána klesající amplituda zrychlení vibrací při rostoucí pulzní frekvenci. Zbylá čidla však tento trend nepotvrdila.

Pro zpřesnění výsledků a vyvarování se nahodilých jevů by bylo vhodné provést zejména opakované měření, nastavit více pulzních frekvencí a zaznamenávat napájecí proud z měniče.

Závěr

První dvě kapitoly této práce se zabývaly problematikou a základními principy a metodami vibrodiagnostiky a elektrodiagnostiky. V další části pak proběhlo stručné seznámení s testovanou soustavou měnič-motor-generátor. Následovala charakteristika jednotlivých měřicích nástrojů a způsob jejich použití od záznamu, nastavení, až ke zpracování dat a popis měřicích čidel. Dále bylo popsáno měření, provedeno vyhodnocení a návrh opatření. Vlastní měření bylo rozděleno na dvě části.

V jedné části proběhlo měření zkoumající podobnost frekvenčních spekter vibrací a proudu u motoru napájeného z frekvenčního měniče a generátoru připojeného izolovanou spojkou. Stejný charakter spekter zrychlení vibrací a proudu prokázal, že ložisky motoru prochází kapacitní proud. V generátoru díky izolované spojce a uzemňovacímu kartáči tato podobnost spekter pozorována nebyla. S ohledem na tento výsledek byla navržena opatření, která by měla výskyt kapacitních proudů omezit a prodloužit tak životnost ložisek.

Druhé měření se soustředilo na porovnání vibrací motoru v závislosti na změně pulzní frekvence měniče. Podnět iniciovala firma Siemens, která měla zájem o výsledky měření za účelem jejich využití v servisní činnosti. Ve spektrech zrychlení vibrací se tato změna jednoznačně projevila na frekvencích odpovídajících nastavené pulzní frekvenci a jejích násobcích. Vliv změny pulzní frekvence na amplitudy zrychlení vibrací byl nejednoznačný, z výsledků se nepodařilo prokázat jasný trend chování amplitud. Proto bylo doporučeno opakované měření s více pulzními frekvencemi a se záznamem proudu.

S ohledem na pravidelný harmonogram testů a zkoušek prováděných v Laboratorii spínacích přístrojů elektrotechnické fakulty v Brně, kde měření probíhala, a na vytíženost drahých měřicích přístrojů, které poskytla firma Siemens, bylo v rámci této práce možné realizovat měření pouze ve dvou vybraných termínech, a to v srpnu 2017 a v únoru 2018.

Zjištěné výsledky potvrzují nutnost mezioborových znalostí pro diagnostiku pohonů a dalších strojních zařízení. Popsané souvislosti mezi mechanickými a elektrickými veličinami poskytují řadu odpovědí, ale zároveň vyvolávají i množství dalších otázek, které je třeba ještě vyřešit. Rozvoj technologií a polovodičové techniky přináší nesporné výhody a nové možnosti v oblasti pohonů, na druhé straně však i nové problémy a nutnost hledání kompromisů. Četné digitalizační trendy dneška slibují průlomová řešení a řada z nich má jistě budoucnost. Složitost fyzikálních jevů a nově objevené, ale nedostatečně prozkoumané zákonitosti však budou tento nástup alespoň v nejbližší době zpomalovat.

Použité zdroje

[1] BILOŠ, Jan a Alena BILOŠOVÁ. Aplikovaný mechanik jako součást týmů konstruktérů a vývojářů: studijní opora. Vyd. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, 2012, 1 CD-ROM. ISBN 9788024827551

[2] LEGÁT, Václav. Management a inženýrství údržby. Praha: Professional Publishing, 2013. ISBN 978-80-7431-119-2.

[3] NĚMEČEK, Pavel. Proaktivní údržba: Studijní materiály. Katedra vozidel a motorů, Fakulta strojní, TU v Liberci. Liberec.

= prezentace na: <http://www.kvm.tul.cz/getFile/id:1850>

[4] CHMELÍK, Karel, Jiří POSPIŠILÍK a Jiří FOLDYNA. Ložiskové proudy v elektrických strojích: odborná publikace. Ostrava: VŠB-TU ve vydavatelství Montanex, 2008. ISBN 978-80-7225-290-9.

[5] NAHODIL, Petr a Miloš HAMMER. Vybrané vlastnosti a diagnostika motoru napájeného z frekvenčního měniče. *MM SCIENCE JOURNAL*. 2017, , 9.

[6] What is A PWM Inverter?. *Quantum Controls' Energy Saving Blog* [online]. Prudhoe, 2018 [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: <http://www.quantum-controls.co.uk/faq/drives/what-is-a-pwm-inverter/>

[7] Brněnská laboratoř spínacích přístrojů - místo, kde pracuje generátor elektrických zkratů [online]. [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: <http://www.siemens.cz/energo/brnenska-laborator-spinacich-pristroju-misto-kde-pracuje-generator-elektrickych-zkratu>

[8] VE ZKRATOVNĚ TESTUJÍ ZAHRANIČNÍ FIRMY SVÁ ELEKTRICKÁ ZAŘÍZENÍ PŘED UVEDENÍM NA TRH. *ZVUT.cz* [online]. Brno: VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, 2016 [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: https://zvut.cz/tema/tema-f38144/ve-zkratovne-testuji-zahranicni-firmy-sva-elektricka-zarizeni-pred-uvadenim-na-trh-d121226?aid_redir=1

[9] Catalog D81.1 SIMOTICS Low-Voltage Motors Frame sizes 63 to 450 Power range 0.09 to 1250 kW. Norimberk: Siemens, 2012.

[10] Catalog D21.3 SINAMICS S120 Chassis Format Units and Cabinet Modules SINAMICS S150 Converter Cabinet Units. Norimberk: Siemens, 2012.

[11] Pružné převodníky řad AmpFLEX a MiniFLEX pro měření až 30 000 A. GHV Trading [online]. [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: https://www.ghvtrading.cz/novinky/novinka_ampflex_miniampflex.html

[12] Měření otáček. Ekosoftware [online]. 2017 [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: <https://www.ekosoftware.cz/mereni-otacek>

[13] A4400 VA4 Pro II. Adash [online]. [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: <https://adash.com/cs/prenosne-merici-systemy/a4400-va4-vibracni-analyzator>

[14] SINAMICS Low Voltage Engineering Manual. Norimberk: Siemens, 2011.

[15] Hybridní ložiska. *SKF* [online]. Göteborg [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <http://www.skf.com/cz/products/bearings-units-housings/engineered-products/hybrid-bearings/index.html>

Seznam obrázků

Obrázek 1.1: Sledování provozních parametrů podle ČSN ISO 17359	12
Obrázek 1.2: Harmonický pohyb tělesa zavěšeného na pružině	14
Obrázek 1.3: Průběhy veličin a jejich fázový posun za 1 periodu.....	15
Obrázek 1.4: Frekvenční rozsah měření jednotlivých veličin	16
Obrázek 1.5: Širokopásmové hodnoty vibrací, otáčky motoru a proud	17
Obrázek 1.6: Ukázka kaskády zrychlení vibrací (nahore) a spektrografu proudu (dole).....	17
Obrázek 2.1: Cesta parazitního proudu přes ložiska.....	18
Obrázek 2.2: Aplikace izolovaného ložiska na NDE a DE straně motoru	19
Obrázek 2.3: Umístění izolované spojky a ložiska u motoru se 2 volnými konci.....	19
Obrázek 3.1: Soustrojí motor-generátor	23
Obrázek 3.2: Převodník proudu a měření jedné fáze proudu v měniči.....	24
Obrázek 3.3: Čidla vibrací	25
Obrázek 3.4: Horizontální uchycení čidel na motoru	25
Obrázek 3.5: Vertikální uchycení čidel na motoru	25
Obrázek 3.6: Vertikální uchycení čidla na generátoru	26
Obrázek 3.7: Sonda pro měření otáček a uzemňovací kartáč na ložisku generátoru.....	27
Obrázek 3.8: Adash VA4 Pro	28
Obrázek 3.9: Nastavení kanálů pro měření vibrací.....	28
Obrázek 3.10: Nastavení kanálu pro měření proudu	29
Obrázek 3.11: Přidávání měření RMS hodnot, spekter a otáček	29
Obrázek 3.12: Ukázka prostředí DDS	30
Obrázek 4.1: Schéma zapojení čidel při 1. měření	31
Obrázek 4.2: Schéma zapojení čidel při 2. měření	32
Obrázek 5.1: Srovnání otáček, RMS rychlostí a proudu	33
Obrázek 5.2: Srovnání kaskád RMS rychlostí a kaskády proudu.....	34
Obrázek 5.3: Srovnání otáček, RMS zrychlení a proudu	34
Obrázek 5.4: Srovnání kaskád RMS zrychlení a proudu.....	35
Obrázek 5.5: Srovnání spektrografů RMS zrychlení a proudu.....	35
Obrázek 5.6: Napájecí frekvence proudu	36
Obrázek 5.7: Detail kaskády proudu.....	37
Obrázek 5.8: Detail kaskády zrychlení vibrací ložiska L2	37
Obrázek 5.9: Detail postranních pásem proudu.....	38
Obrázek 5.10: Detail postranních pásem u vibrací	39
Obrázek 5.11: Detail kaskády u generátoru.....	39
Obrázek 5.12: 1,25 kHz; Průběh RMS rychlostí a otáček při rozběhu.....	40
Obrázek 5.13: 2,5 kHz; Průběh RMS rychlostí a otáček při rozběhu.....	41
Obrázek 5.14: 5 kHz; Průběh RMS rychlostí a otáček při rozběhu.....	41
Obrázek 5.15: 1,25 kHz; Kaskády RMS rychlostí ze všech čidel	42
Obrázek 5.16: 2,5 kHz; Kaskády RMS rychlostí ze všech čidel	42
Obrázek 5.17: 5 kHz; Kaskády RMS rychlostí ze všech čidel	43
Obrázek 5.18: CH1; Průběhy zrychlení RMS vibrací a otáček při rozběhu.....	43
Obrázek 5.19: CH1; Kaskády zrychlení vibrací	44
Obrázek 5.20: CH1; 1,25 kHz; Detail kaskády zrychlení vibrací	44
Obrázek 5.21: CH2; Průběhy zrychlení RMS vibrací a otáček při rozběhu.....	45

Obrázek 5.22: CH2; Kaskady zrychlení vibrací.....	45
Obrázek 5.23: CH3; Průběhy zrychlení RMS vibrací a otáček při rozběhu	46
Obrázek 5.24: CH3; Kaskady zrychlení vibrací.....	46
Obrázek 5.25: CH4; Průběhy zrychlení RMS vibrací a otáček při rozběhu	47
Obrázek 5.26: CH4; Kaskady zrychlení vibrací.....	47
Obrázek 5.27: CH4; Spektrografy zrychlení vibrací pro pulzní frekvence 1,25, 2,5 a 5 kHz	48
Obrázek 6.1: Schéma testované soustavy s opatřeními proti ložiskovému proudu	49
Obrázek 6.2: Rušení vznikající v měniči a vliv filtrů	51
Obrázek 6.3: Napětí na výstupu měniče bez tlumivky (vlevo) s tlumivkou (vpravo)	51
Obrázek 6.4: Napětí na výstupu měniče bez du/dt filtru(vlevo) s du/dt filtrem(vpravo)	51
Obrázek 6.5: Napětí na výstupu měniče se sinusovým filtrem	52
Obrázek 6.6: Hybridní ložisko s keramickými valivými tělesy	52
Obrázek 6.7: Průřez a symetrické rozdělení jednotlivých vodičů v kabelech	53
Obrázek 6.8: Pružné vodivé propojky.....	53

Seznam proměnných

$x_{stř}$	střední hodnota výchylky vibrací [mm]
x_{ef}	efektivní hodnota výchylky vibrací [mm]
x_a	amplituda výchylky [mm]
$x_{sp-šp}$	rozkmít výchylky [mm]
φ	fázový úhel [°]
Ω	vlastní kruhová frekvence [rad/s]
T	perioda [s]
$x(t)$	výchylka vibrací jako funkce času [mm]
$v(t)$	rychlost vibrací jako funkce času [mm/s]
$a(t)$	zrychlení vibrací jako funkce času [g]
Z	impedance kapacitních vazeb [Ω]
f	napájecí frekvence sítě [Hz]
C	kapacita [F]
n_s	synchronní otáčky motoru [ot./min]
p	počet pólových dvojic [-]

Přílohy

Příloha 1: Výkonové štítky motoru, měniče a generátoru se jmenovitými hodnotami



SIEMENS

117. IDU2048-4AC03-Z

2013

3- GENERATOR

Výrobní číslo: FQ1221504901

V	A	kVA	Typ provozu	cosφ	min ⁻¹
6300 ±10%	1466	16000	S2 10min.	0.80	1000.0
7560 ±10%	1222	16000	S2 10min.	0.80	1200.0

Zkratový generátor - další provozní stavy podle elektrického datového listu.

3707 kgm²

U1 V1 W1

50 / 60 Hz

Buzení kroužkové:

184 / 164 V

283 / 253 A

Tepl. třída.: 155 (F)

49.45 t

IP23

IC01

6 m³/s VZDUCH

40 °C

IEC 60034

Siemens Electric Machines s.r.o.

664 24 Drasov

MADE IN CZECH REPUBLIC

AC135 Series

Low Frequency Accelerometer, Top Exit Connector/Cable, 500 mV/g

Actual
Product
Size Shown
CE



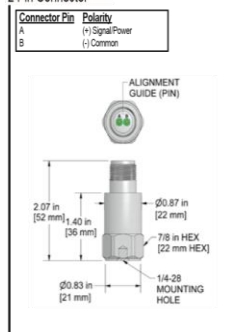
Product Features

**Low Frequency/
Slow Speed Sensor**
0,2 - 3000 Hz (12 - 180,000 CPM)

- 500 mV/g Sensitivity, $\pm 10\%$ Sensitivity
- Standard 2 Pin MIL Connection
- ± 10 g, Peak Dynamic Range

AC135-1A

2 Pin Connector



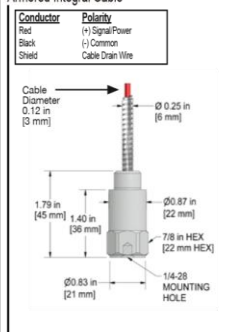
AC135-2C

Integral Cable



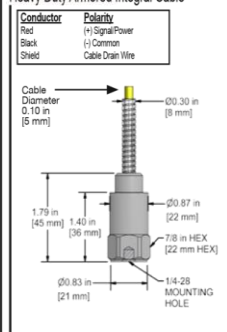
AC135-3C

Armored Integral Cable



AC135-6C

Heavy Duty Armored Integral Cable



Specifications	Standard	Metric
Part Number	AC135	M/AC135
Sensitivity (±10%)	500 mV/g	
Frequency Response (±3dB)	12-180,000 CPM	0,2-3000 Hz
Frequency Response (±10%)	36-90,000 CPM	0,6-1500 Hz
Dynamic Range	± 10 g, peak	
Electrical		
Settling Time	5 Seconds	
Voltage Source	18-30 VDC	
Constant Current Excitation	2-10 mA	
Spectral Noise @ 10 Hz	1.7 µg/√Hz	
Spectral Noise @ 100 Hz	0.2 µg/√Hz	
Spectral Noise @ 1000 Hz	0.12 µg/√Hz	
Output Impedance	<100 ohm	
Bias Output Voltage	10-14 VDC	
Case Isolation	>10 ⁸ ohm	

Specifications	Standard	Metric
Environmental		
Temperature Range	-58 to 250° F	-50 to 121 °C
Electromagnetic Sensitivity	CE	
Sealing	Welded, Hermetic	
Submersible Depth (AC135-2C/3C)	200 ft.	60 m
Physical		
Sensing Element	PZT Ceramic	
Sensing Structure	Shear Mode	
Weight	3.4 oz	95 grams
Case Material	316L Stainless Steel	
Mounting	1/4-28	
Connector (non-integral)	2 Pin MIL-C-5015	
Resonant Frequency	960,000 CPM	16000 Hz
Mounting Torque	2 to 5 ft. lbs.	2,7 to 6,8 Nm
Mounting Hardware	1/4-28 Stud	M6x1 Adapter Stud
Calibration Certificate	CA10	

Ordering Information

Standard	AC135-1A	AC135-2C	AC135-3C	AC135-6C
	(1/4-28 Stud)	(1/4-28 Stud)	(1/4-28 Stud)	(1/4-28 Stud)
	(length in feet)	(length in feet)	(length in feet)	(length in feet)
	(termination)	(termination)	(termination)	(termination)
Metric	M/AC135-1A	M/AC135-2C	M/AC135-3C	M/AC135-6C
	(M6x1 Adapter Stud)	(M6x1 Adapter Stud)	(M6x1 Adapter Stud)	(M6x1 Adapter Stud)
	(length in feet)	(length in feet)	(length in feet)	(length in feet)
	(termination)	(termination)	(termination)	(termination)
	(length in meters)	(length in meters)	(length in meters)	(length in meters)
	(termination)	(termination)	(termination)	(termination)

Cable Termination Options: **E** **F** **Z**



Backed by our Unconditional Lifetime Warranty

AC136 Series

Low Frequency Accelerometer, Side Exit Connector/Cable, 500 mV/g

SECTION 1 - VIBRATION SENSORS
Accelerometers



Actual
Product
Size Shown



Product Features

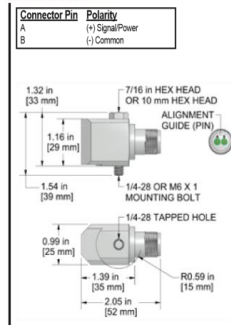
**Low Frequency/Slow
Speed Sensor**

0,2 - 3000 Hz (12 - 180,000 CPM)

- 500 mV/g, $\pm 10\%$ Sensitivity
- Standard 2 Pin MIL Connection
- ± 10 g, Peak Dynamic Range

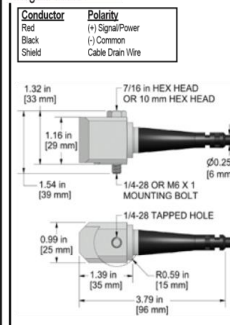
AC136-1A

2 Pin Connector



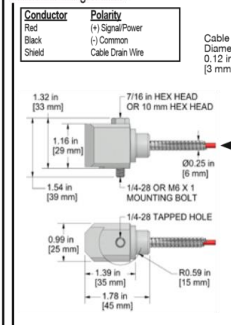
AC136-2C

Integral Cable



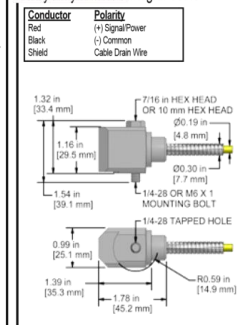
AC136-3C

Armored Integral Cable



AC136-6C

Heavy Duty Armored Integral Cable



Specifications	Standard	Metric
Part Number	AC136	M/AC136
Sensitivity (±10%)	500 mV/g	
Frequency Response (±3dB)	12-180,000 CPM	0,2-3000 Hz
Frequency Response (±10%)	36-90,000 CPM	0,6-1500 Hz
Dynamic Range	± 10 g, peak	
Electrical		
Settling Time	5 Seconds	
Voltage Source	18-30 VDC	
Constant Current Excitation	2-10 mA	
Spectral Noise @ 10 Hz	1.7 µg/√Hz	
Spectral Noise @ 100 Hz	0.2 µg/√Hz	
Spectral Noise @ 1000 Hz	0.12 µg/√Hz	
Output Impedance	<100 ohm	
Bias Output Voltage	10-14 VDC	
Case Isolation	>10 ⁶ ohm	

Specifications	Standard	Metric
Environmental		
Temperature Range	-58 to 250° F	-50 to 121°C
Electromagnetic Sensitivity	CE	
Sealing	Welded, Hermetic	
Submersible Depth (AC136-2C/3C)	200 ft.	60 m
Physical		
Sensing Element	PZT Ceramic	
Sensing Structure	Shear Mode	
Weight	5.5 oz	156 grams
Case Material	316L Stainless Steel	
Mounting	1/4-28	
Connector (non-integral)	2 Pin MIL-C-5015	
Resonant Frequency	840,000 CPM	14000 Hz
Mounting Torque	2 to 5 ft. lbs.	2.7 to 6,8 Nm
Mounting Hardware	1/4-28 Captive Bolt	M6x1 Captive Bolt
Calibration Certificate	CA10	

Ordering Information

Standard	AC136-1A (1/4-28 Captive Bolt)	AC136-2C - / (1/4-28 Captive Bolt)	AC136-3C - / (1/4-28 Captive Bolt)	AC136-6C - / (1/4-28 Captive Bolt)
Metric	M/AC136-1A (M6x1 Captive Bolt)	M/AC136-2C - / (M6x1 Captive Bolt)	M/AC136-3C - / (M6x1 Captive Bolt)	M/AC136-6C - / (M6x1 Captive Bolt)
	(length in feet) (termination)	(length in feet) (termination)	(length in feet) (termination)	(length in feet) (termination)
	(length in meters) (termination)	(length in meters) (termination)	(length in meters) (termination)	(length in meters) (termination)

Cable Termination Options: E F Z



Backed by our Unconditional Lifetime Warranty

Page 17

• 800-999-5290