



ZÁPADOČESKÁ
UNIVERZITA
V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Katedra výkonové elektroniky a strojů

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Ložisková napětí a proudy

Autor práce: Bc. Josef Kozojed
Vedoucí práce: Doc. Ing. Bohumil Skala, Ph.D.

Plzeň 2023

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2022/2023

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Josef KOZOJED**
Osobní číslo: **E21N0058P**
Studijní program: **N0713A060013 Výkonové systémy a elektroenergetika**
Specializace: **Elektrické stroje**
Téma práce: **Ložisková napětí a proudy**
Zadávací katedra: **Katedra výkonové elektroniky a strojů**

Zásady pro vypracování

1. Provedte rešeršní činnost a shrňte možnosti měření a modelování ložiskových napětí a proudů.
2. Provedte měření parazitních kapacit na vhodném motoru.
3. Provedte měření ložiskových napětí a proudů pro napájení ze sítě a z měniče pro různé parametry napájení. Stroj bude ve stavu naprázdno.
4. Shrňte dosažené výsledky.



Rozsah diplomové práce: **40-60**
Rozsah grafických prací: **dle doporučení vedoucího**
Forma zpracování diplomové práce: **elektronická**

Seznam doporučené literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Bohumil Skala, Ph.D.**
Katedra výkonové elektroniky a strojů

Datum zadání diplomové práce: **7. října 2022**
Termín odevzdání diplomové práce: **26. května 2023**



Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan

Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 7. října 2022

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá problematikou ložiskových napětí a proudů ve strojích napájených z měniče frekvence. Cílem je vyhodnocení měření na motoru typu DK0BZ 0610–4X firmy VEM Sachsenwerk GmbH. Práce je rozdělena do 3 částí.

V první části je nastíněn obecný přehled problematiky ložiskových proudů. Dále je zde také vysvětleno, jakým způsobem mohou ložiskové proudy ovlivnit životnost stroje.

V druhé kapitole je nastíněn průběh vlastního měření na motoru.

V třetí části jsou potom výsledky měření.

Klíčová slova

ložiskové proudy, ložisko, ložisková napětí, hřídelové napětí

Abstract

Kozojed, Josef. *Bearing voltage and current [Ložisková napětí a proudy]*. Pilsen, 2023. Master thesis (in Czech). University of West Bohemia. Faculty of Electrical Engineering. Department of Power Electronics and Machines. Supervisor: Bohumil Skala

The master thesis deals with the problem of bearing voltages and currents in machines powered by frequency converters. The aim is to evaluate measurements on a motor type DK0BZ 0610-4X from VEM Sachsenwerk GmbH. The work is divided into 3 parts.

In the first part a general overview of the bearing current problem is outlined. It also explains how bearing currents can affect the lifetime of a machine.

The second section outlines the actual measurement procedure on the engine.

The third section then presents the results of the measurements.

Keywords

bearing current, bearing, bearing voltage, shaft voltage

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem svou závěrečnou práci 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 závěrečné 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 § 270 trestního zákona č. 40/2009 Sb.

Také prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

V Plzni dne 25. května 2023

Bc. Josef Kozojed

.....

Podpis

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval Doc. Ing. Bohumilu Skalovi, Ph.D., vedoucímu diplomové práce, za odborné vedení, věcné připomínky a podporu při tvorbě této práce.

Obsah

Seznam obrázků	viii
Seznam tabulek	ix
Seznam symbolů a zkratek	x
Úvod	1
1 Fyzika ložiskových proudů	2
1.1 Ložiskové proudy	2
1.2 Kapacitní a ohmické chování kuličkového ložiska	3
1.3 Kapacity motoru	3
1.4 Přídavné ložiskové proudy při napájení měniče	4
1.5 Ohrožení ložisek ložiskovými proudy	5
2 Základy modelování	7
2.1 Konfigurace a náhradní obvod kuličkových ložisek	7
2.2 Obecný model pro výpočet ložiskových proudů	8
3 Měření	10
3.1 Motor	10
3.2 Identifikace zapojení vinutí	10
3.3 Měření parazitních kapacit	10
3.4 Měření ložiskových napětí a proudů	11
3.4.1 Měření proudů	11
3.4.2 Měření napětí	12
3.4.3 Zpracování výsledků měření	12
4 Výsledky	13
4.1 Identifikace zapojení vinutí	13
4.2 Měření parazitních kapacit	14
4.3 Měření ložiskových napětí a proudů	14
4.3.1 Měření při napájení ze sítě	15
4.3.2 Měření při napájení z měniče	18

4.3.2.1	Měření s frekvencí 10kHz, připojeno kabelem o délce 20m	18
4.3.2.2	Měření s frekvencí 20kHz, připojeno kabelem o délce 2m	21
Závěr		24
Reference, použitá literatura		25

Seznam obrázků

1.1	Cesta ložiskových proudů [8]	2
2.1	Kovové ložisko s hlubokou drážkou[4]	7
2.2	Keramické ložisko s hlubokou drážkou[4]	7
2.3	Náhradní elektrický model kuličkového ložiska[4]	8
2.4	Schéma náhradních kapacit na indukčním motoru[7]	9
3.1	Zjednodušené schéma parazitních kapacit motoru [9]	11
3.2	Nákres měření na motoru [10]	12
4.1	Pilové schéma část 1	13
4.2	Pilové schéma část 2	14
4.3	Fourierova transformace průběhu proudu mezi kostrou a DE štítem při napájení ze sítě	15
4.4	Fourierova transformace průběhu proudu mezi kostrou a NDE štítem při napájení ze sítě	15
4.5	Fourierova transformace průběhu proudu mezi kostrou a vodičem PE při napájení ze sítě	16
4.6	Fourierova transformace průběhu proudu mezi aegisem a NDE štítem při napájení ze sítě	16
4.7	Fourierova transformace průběhu napětí mezi aegisem a NDE štítem při napájení ze sítě	17
4.8	Fourierova transformace průběhu napětí mezi hřídelí a DE štítem při na- pájení ze sítě	17
4.9	Fourierova transformace průběhu proudu mezi kostrou a DE štítem při napájení z měniče se spínací frekvencí 10 kHz	18
4.10	Fourierova transformace průběhu proudu mezi kostrou a NDE štítem při napájení z měniče se spínací frekvencí 10 kHz	18
4.11	Fourierova transformace průběhu proudu mezi kostrou a vodičem PE při napájení z měniče se spínací frekvencí 10 kHz	19
4.12	Fourierova transformace průběhu proudu mezi aegisem a NDE štítem při napájení z měniče se spínací frekvencí 10 kHz	19

4.13	Fourierova transformace průběhu napětí mezi aegisem a NDE štítem při napájení z měniče se spínací frekvencí 10 kHz	20
4.14	Fourierova transformace průběhu napětí mezi hřídelí a DE štítem při napájení z měniče se spínací frekvencí 10 kHz	20
4.15	Fourierova transformace průběhu proudu mezi kostrou a DE štítem při napájení z měniče se spínací frekvencí 20 kHz	21
4.16	Fourierova transformace průběhu proudu mezi kostrou a NDE štítem při napájení z měniče se spínací frekvencí 20 kHz	21
4.17	Fourierova transformace průběhu proudu mezi kostrou a vodičem PE při napájení z měniče se spínací frekvencí 20 kHz	22
4.18	Fourierova transformace průběhu proudu mezi aegisem a NDE štítem při napájení z měniče se spínací frekvencí 20 kHz	22
4.19	Fourierova transformace průběhu napětí mezi aegisem a NDE štítem při napájení z měniče se spínací frekvencí 20 kHz	23
4.20	Fourierova transformace průběhu napětí mezi hřídelí a DE štítem při napájení z měniče se spínací frekvencí 20 kHz	23

Seznam tabulek

1.1	Příklady parazitních kapacit [9]	4
3.1	Naměřené kapacity mezi jednotlivými částmi	11
4.1	Základní parametry vinutí	13
4.2	Parazitní kapacity mezi jednotlivými částmi	14
4.3	Parazitní kapacity mezi jednotlivými částmi	24

Seznam symbolů a zkratek

Značky a symboly

C_{wf}	(nF)	Vlastní kapacita mezi satorovým vinutím a satorovým jhem.
C_{ph}	(nF)	Vlastní kapacita mezi fázemi.
C_{wr}	(nF)	Vlastní kapacita satorového vinutí proti rotoru.
C_{rf}	(nF)	Vlastní kapacita mezi rotorem a jhem satoru.
C_{wfm}	(nF)	Naměřená kapacita mezi satorovým vinutím a satorovým jhem.
C_{wrm}	(nF)	Naměřená kapacita satorového vinutí proti rotoru.
C_{rfm}	(nF)	Naměřená kapacita mezi rotorem a jhem satoru.
t_r	(ns)	Spínací čas tranzistoru.
du/dt	(kV/ μ s)	Strmost spínání tranzistoru.
C_b	(pF)	Kapacita ložiska.
f	(Hz)	Frekvence.
i_b	(A)	Ložiskový proud.
i_g	(A)	Proud zemním vodičem.
V_{sh}	(V)	Napětí na hřídeli.
$C_{SEW-SFT}$	(nF)	Kapacita satorových čel vůči hřídeli.
C_{SEW-RC}	(nF)	Kapacita satorových čel vůči rotorovému jhu.
C_{SWA-RC}	(nF)	Kapacita vinutí v drážkách vůči rotorovému jhu.
C_{SEW-B}	(nF)	Kapacita satorových čel vůči ložisku .
C_B	(nF)	Kapacita ložiska.
C_{SWA-SC}	(nF)	Kapacita vinutí v drážkách vůči satorovému jhu.
C_{SEW-SC}	(nF)	Kapacita satorových čel vůči satorovému jhu.
C_{SEW-H}	(nF)	Kapacita satorových čel vůči kostře.

Zkratky

DE	Drive End. Pohonný Konec.
NDE	Non-Drive End. Nepohonný Konec.
PWM	Pulse Width Modulation. Pulzně Šířková Modulace.
IGBT	Insulated-Gate Bipolar Transistor. Bipolární Tranzistor s Izolovaným Hradlem.
EDM	Electrical discharge machining. Obrábění Elektrickými Výboji
fft	Fast Fourier transform. Rychlá Fourierova Transformace.

Úvod

V důsledku rychle rostoucích napěťových pulzů pohonů s pulzně šířkovou modulací způsobuje generované napětí na hřídeli elektromotorů elektrické výbojové proudy v ložiskách. Tyto výboje mohou způsobit selhání ložisek, což vede k nákladné údržbě a neočekávanému zastavení výroby.

Možnost měřit výbojovou aktivitu na indukčním motoru poháněném PWM nabízí nástroj pro testování různých ložisek v elektromotorech. Za účelem měření napětí na hřídeli a proudů v ložisku se nejprve pomocí 3D softwaru a poté na fyzickém motoru provedou úpravy indukčního motoru. Izolováním ložiska od rámu a připevněním měděného kroužku k vnější dráze ložiska lze měřit ložiskové proudy. Kombinované měření napětí na hřídeli, proudů v ložisku a proudů v rámu ukazuje vodivé stavy ložisek při nízkých otáčkách a izolované stavy při vyšších otáčkách. Aktivita elektrického výboje je pozorována při zvyšování napětí na hřídeli, což vede ke skokovému nárůstu proudu v ložisku a napětí na hřídeli rychle klesá, zatímco statorový proud není ovlivněn.

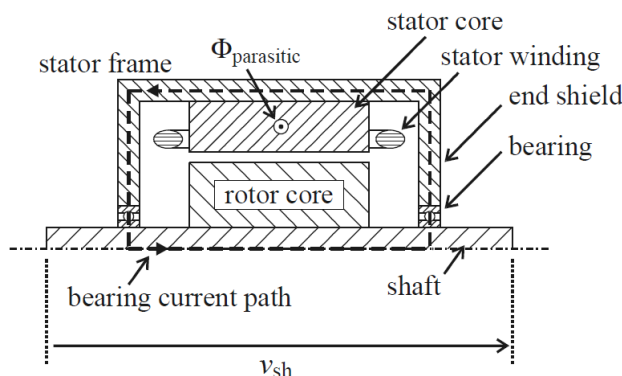
Kapitola 1

Fyzika ložiskových proudů

1.1 Ložiskové proudy

Problematika ložiskových proudů u strojů napájených ze sítě je známa již desítky let. [1][2] Tyto proudy vznikají především kvůli nesymetrii v magnetickém obvodu stroje. Ty jsou důvodem pro vznik rozptylového magnetického toku, který do prostoru mezi statorovou kostru, ložiska a hřídel indukuje napětí. Některá z těchto napětí, jako například napětí na hřídeli (u_{sh}), jsou měřitelná a mohou být změřena pomocí voltmetru mezi oběma konci hřídele.

Tato napětí mohou způsobit průchod ložiskových proudů motorem. Pro průtok proudu musí být dosaženo minimálního přeskového napětí, které je dáno tloušťkou lubrikačních filmů v obou ložiscích. Jako hranice bývá označena hodnota $u_{sh,rms} \approx 350$ mV, respektive $u_{sh} \approx 500$ mV. [8]



Obrázek 1.1: Cesta ložiskových proudů [8]

Pro motory větších velikostí se velikost těchto proudů zvětšuje. Důvodem je vyšší napájecí proud, který způsobuje větší magnetické toky ve stroji. Dvou-pólové stroje vykazují největší tok pólem a tím také největší podíl parazitních toků ze všech strojů. Jedná se tak o nejkritičtější zařízení ovlivněné ložiskovými proudy při dané osově výšce.

Izolovací přepážkou mezi ložiskem a ložiskovým domkem může být tento proud potla-

čen. U strojů s osovou výškou nad 500 mm je během konečných testů měřeno napětí na hřídeli u_{sh} . Pokud motor nevyhovuje, dodávají se dodatečná opatření. Stroje s výkonem $P_n \geq 1$ MW jsou osazeny izolovanými ložisky ve všech případech.

Výsledné ložiskové proudy jsou induktivního charakteru. Pro velké synchronní generátory byly pozorovány také ložiskové proudy jiné povahy. Hlavními příčinami těchto proudů jsou především tření v připojeném zařízení, nebo i tření vlastního rototu o chladicí médium ve vzduchové mezeře. Dalším důvodem pro vznik může být také externí napájení rotorového vinutí, díky kterému dojde ke statické excitaci, asymetriím v napětí, nebo průtoku přes izolaci rotorového vinutí. [8]

1.2 Kapacitní a ohmické chování kuličkového ložiska

Kuličkové ložisko se skládá z vnitřního kruhu, vnějšího kruhu a valivého elementu. V náhradním schématu motoru je takové ložisko velmi těžko popsatelné.

Při zjednodušeném pohledu lze provoz rozdělit na dva stavy, které jsou důležité pro popis chování impedance:

- V klidu nebo při nízkých rychlostech ($n \leq 100$ ot \cdot min⁻¹) dochází ke snížení vrstvy maziva v ložisku na řád nm. Napětí přiložené na ložisko tak může snadno vyvolat proud ve fázi s příslušným napětím. Ložisko se tak chová jako ohmická rezistance.
- Při vyšších rychlostech ($n > 100$ ot \cdot min⁻¹) dojde díky hydrodynamickému efektu k vyzdvyhnutí hřídele. Tloušťka mazacího filmu se až 100 krát zvětší. Začnou se tak projevit jeho izolační vlastnosti a ložisko se začne chovat jako kapacita. [8]

1.3 Kapacity motoru

Kapacity motoru se neuplatňují, pokud je napájení provedeno ze sítě o kmitočtu 50 Hz (60 Hz). Pokud však napájení obsahuje vysokofrekvenční složky, mohou se projevit především následující kapacity:

- Kapacita mezi statorovým vinutím a statorovým jhem C_{wf} :

Kapacita mezi statorovým vinutím a statorovým jhem C_{wf} se projevuje mezi statorovým vinutím, které je připojeno k napájecímu napětí, a jhem, které je spojeno přes kostru se zemí. Pro oddělení obou potenciálů slouží izolace cívek a izolace vyložení drážky.

- Kapacita mezi fázemi C_{ph} :

Kapacita mezi fázemi C_{ph} je způsobena paralelně vedenými závity vinutí statoru. Mezi jednotlivými fázemi se nachází izolace v podobě izolačního papíru, popřípadě jiný materiál podobné tloušťky.

- Kapacita statorového vinutí proti rotoru C_{wr}

Kapacita statorového vinutí proti rotoru C_{wr} je dána především velikostí vzduchové mezery, drážkovými klíny a izolací vinutí.

- Kapacita mezi rotorem a jhem statoru C_{rf}

Kapacita mezi rotorem a jhem statoru C_{rf} je určena společnou plochou mezi statorem a rotorem stroje, velikostí vzduchové mezery a provedením vrcholu zubů statoru a rotoru, popřípadě provedením pólových nástavců.

- Kapacita ložiska C_b

Jak bylo zmíněno výše, ložisko se může chovat jako kapacita. Ve stroji se nachází dvě ložiska na obou koncích hřídele (DE a NDE). Obě kapacity mají stejnou velikost ($C_{b,DE} \approx C_{b,NDE}$). Proto lze psát kapacitu ložiska jako C_b . [8]

V tabulce 1.1 jsou uvedeny přibližné hodnoty kapacit získaných z empirických vztahů pro 5; 6; 7; 8; 9 a 10Hp. (1 HP \approx 0,746 kW)

Tabulka 1.1: Příklady parazitních kapacit [9]

Výkon(HP)	C_{SF} (pF)	C_{RF} (pF)	C_{SR} (pF)
5	4670	1150	177
6	5200	1353	177
7	5400	1412	177
8	6000	1470	177
9	7000	1530	177
10	7000	1588	175

1.4 Přídavné ložiskové proudy při napájení měniče

S nástupem *IGBT* tranzistorů do obvodů střídačů se začínají projevovat další zdroje ložiskových proudů. [3][5][6] Krátké spínací časy těchto tranzistorů t_r vedou k velkým změnám napětí ($du/dt = 2 - 10 \text{ kV}/\mu\text{s}$). Vyšší harmonické tohoto napětí interagují s pro ně nízkými impedancemi kapacit zmíněných výše. Tím vznikají čtyři druhy proudů:

I) Kapacitní ložiskové proudy

Obě ložiska se chovají jako kapacitní dělič. Tím dojde k rozdělení napětí na jednotlivé kapacity (u_b). Výsledná napětí vyvolají ložiskový proud kapacitního charakteru v řádu desítek mA.

Pokud jsou otáčky $n \leq 100 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$, ke kapacitním proudům nedochází. Ložisko je v tomto případě přemostěno metalickým dotykem. Proud procházející v tomto případě ložiskem je odporového charakteru s amplitudami $i_b \leq 200 \text{ mA}$. [8]

II) Elektro-statické výbojové proudy

Mazivo ložiska mezi kuličkami a kroužky se při klidové teplotě ($\vartheta_b \approx 20 \text{ }^\circ\text{C}$) v důsledku překročení průrazného napětí ($U_{b,th} \approx 5 - 30 \text{ V}$) prorazí. Procházející proud způsobí elektroerozivní obrábění, které je statisticky rozdělené.

Za pracovní teploty ($\vartheta_b \approx 70 - 90 \text{ }^\circ\text{C}$) se sníží napětí potřebné k průrazu maziva. Mezi kroužky ložiska se tak cyklicky zvyšuje napětí do doby, než dojde k vybití přes mazací film. ($U_b = 5 - 15 \text{ V}$)[8]

Hodnota průrazného napětí je také ovlivněna kovovými částicemi ve vlastním mazivu. Pulzy napětí na hřídeli se objevují v okamžiku, kdy jen několik částic projde namáhanou zónou. Na krátkou dobu tak může napětí na ložisku vzrůst až na 30 V. Výsledný proud tak může mít v amplitudě $I_b \approx 0,5 - 3 \text{ A}$, což je nebezpečné zejména pro motory menších výkonů.[8]

III) Oběhové ložiskové proudy

Vysoké hodnoty du/dt v kombinaci s kapacitou mezi statorovým vinutím a statorovým jhem C_{wf} způsobují dodatečný zemní proud I_g . Frekvence těchto proudů se pohybují v rozsahu od 100 kHz do jednotek MHz. Tento proud vytvoří oběhový magnetický tok, který indukuje na jednotlivé části motoru napětí. Pokud je toto napětí vyšší než elektrická pevnost maziva v ložisku, dojde k průchodu oběhového ložiskového proudu I_b , který prochází přes jho statoru, NDE strana hřídele, DE strana hřídele a vlastní hřídel.

Amplituda tohoto proudu je závislá na velikosti stroje. Může dosahovat velikosti $I_b \approx 0,5 - 20 \text{ A}$ [8]

IV) Rotorové zemní proudy

Pokud je motor uzemněn přes svou zátěž, část ze zemních proudů může procházet jako zemní proudy rotoru i_{rg} . V závislosti na vysokofrekvenční impedanci uzemnění se se zvyšujícími rozměry stroje zvyšuje i i_{rg} a může dosáhnout značných velikostí. Protože tento proud protéká výhradně přes ložiska, může docházet k výrazně rychlejší degradaci ložiska. [8]

1.5 Ohrožení ložisek ložiskovými proudy

Typ ložiska závisí jak na velikosti motoru, tak i na oblasti použití, nebo provozních podmínkách. Ty se mohou lišit mezi jednotlivými stroji. Proto se k vyhodnocení nedá přímo použít hodnota ložiskových proudů.

Proto se častěji pro posouzení používá proudová hustota J_b . Kontaktní plocha S_H (Hertzova) je dána elastickou deformací valivých elementů ložiska při běžných pracovních podmínkách. Můžeme tedy psát vztah:

$$J_b = \frac{i_b}{S_H} \quad (1.1)$$

Pro stejnosměrné ložiskové proudy a proudy nízkých frekvencí (50/60 Hz) byly stanoveny maximální hodnoty proudové hustoty v ložisku, při kterých nedochází k poškození ložiska. Z různých měření vyplývá[8]:

- proudová hustota $J_b \leq 0,1 \text{ A/mm}^2$ neovlivní dobu života ložiska
- proudová hustota $J_b \geq 0,7 \text{ A/mm}^2$ může výrazně ovlivnit dobu života ložiska

Ve vysokofrekvenční oblasti bylo provedeno výrazně méně měření. Z nich vyplývá[8]:

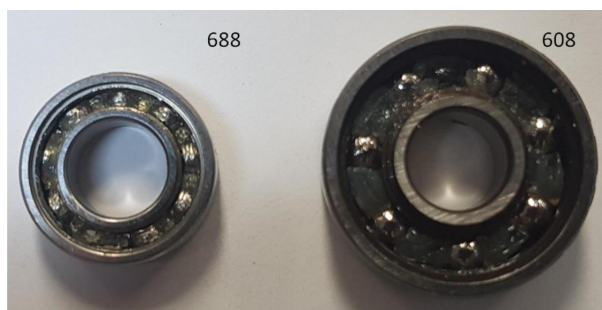
- proudová hustota $J_b \leq 0,4 \text{ A/mm}^2$ neovlivní dobu života ložiska
- proudová hustota $J_b \leq 0,6 - 0,8$ pravděpodobně nedegraduje životnost ložiska
- proudová hustota $J_b \geq 0,8 \text{ A/mm}^2$ může být nebezpečná

Kapitola 2

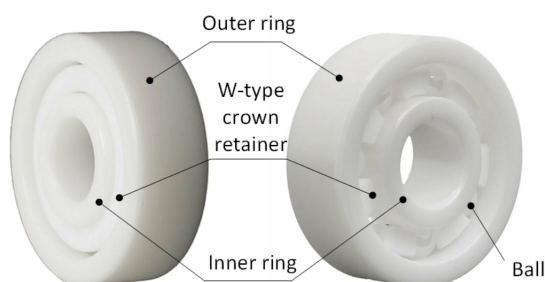
Základy modelování

2.1 Konfigurace a náhradní obvod kuličkových ložisek

Kuličková ložiska jsou nejběžnějším typem ložisek. Podle uspořádání ložiskových kroužků se kuličková ložiska dále dělí na kuličková ložiska s hlubokou drážkou a kuličková ložiska s kosoúhlým stykem. Tento typ ložisek je schopen přenášet nejen radiální, ale i axiální zatížení. Podle materiálu ložiska se kuličková ložiska dělí na ocelová kuličková ložiska, hybridní keramická kuličková ložiska a plně keramická ložiska. Na obr. 2.1 a obr. 2.2 jsou znázorněna ocelová kuličková ložiska s odstraněným kovovým těsněním a plně keramická ložiska. [4]



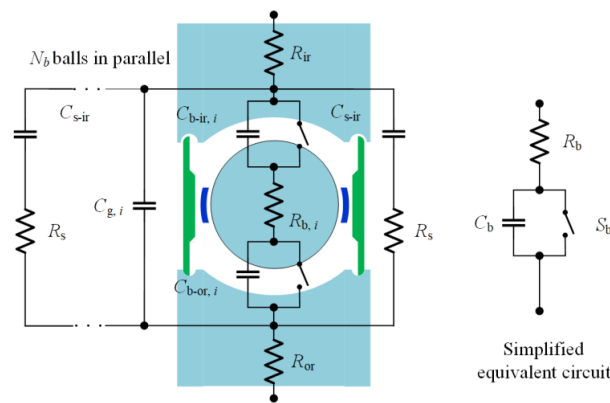
Obrázek 2.1: Kovové ložisko s hlubokou drážkou[4]



Obrázek 2.2: Keramické ložisko s hlubokou drážkou[4]

Standardní kuličkové ložisko s hlubokou drážkou se skládá z několika valivých kuliček a dvou soustředných kroužků, které jsou u ocelových a hybridních keramických kuličkových ložisek vyrobeny z oceli. U plně keramických kuličkových ložisek jsou všechny kuličky a kroužky vyrobeny z keramiky, například z nitridu křemíku (Si_3N_4) a oxidu zirkoničitého (ZrO_2). Kromě kuliček a kroužků jsou v ložiscích také kuličkové držáky a mazací těsnění. Kuličkové držáky nebo kuličkové klece slouží k oddělení kuliček, udržují symetrickou radiální vzdálenost kuliček a ve většině případů drží ložisko pohromadě. Mazací těsnění se používají k ochraně ložisek před nadměrnými ztrátami maziva a jeho znečištěním. Klec i těsnění mohou být kovové, což vnáší další kapacity mezi vnější a vnitřní kroužky. [4]

Na základě fyzikální konstrukce lze ocelové kuličkové ložisko modelovat jako kombinaci kapacit, odporů a napěťově řízených spínačů, jak je znázorněno na obr. 2.3, kde R_{ir} a R_{or} představují odpory vnitřního a vnějšího kroužku. Paralelně jsou umístěny kuličky N_b , z nichž každá má efektivní odpor $R_{b,i}$. [4]



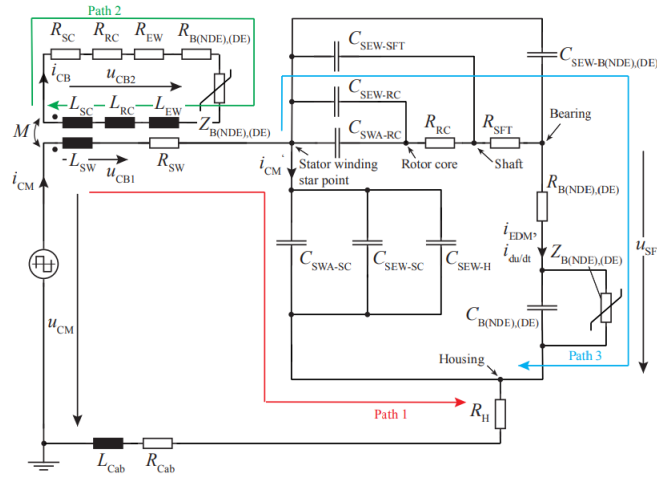
Obrázek 2.3: Náhradní elektrický model kuličkového ložiska[4]

Vzhledem k tomu, že každá kulička je ponořena do maziva, vzniknou u každé kuličky dvě kapacity, tj. $C_{b-ir,i}$ a $C_{b-or,i}$, které spojují vnitřní a vnější kroužky. Mezi kuličkami jsou vnitřní a vnější kroužky odděleny mazivem a/nebo vzduchem a vzniká další kapacita $C_{g,i}$. Upevňovač kuliček a těsnění, pokud jsou vyrobeny z kovu, rovněž vytvoří kapacitní vazbu mezi vnitřním a vnějším kroužkem. Pro zohlednění možného rozpadu maziva jsou zahrnuty přepínače řízené napětím. Jakmile napětí na vrstvě maziva ložiska překročí prahovou hodnotu, tj. hodnotu $V_b \geq V_{th}$, dojde k elektroerozivnímu obrábění a ložisko se z RC obvodu změní na rezistor. Kombinací jednotlivých komponent vznikne model ložiska redukovaného řádu, který se skládá z odporu R_b v sérii s paralelním zapojením kapacity C_b a napěťově řízeného spínače S_b . [4]

2.2 Obecný model pro výpočet ložiskových proudů

Na obrázku 2.4 je zobrazen ekvivalentní model motoru. Protože kapacita C_{SWA-SC} (v této práci C_{wf}) je výrazně větší než ostatní kapacity v obvodu, lze bezpečně předpokládat,

že $i_{CM} \approx i'_{CM}$. Odpor ložiska $R_{B(NDE),(DE)}$, stejně jako nelineární impedance $Z_{B(NDE),(DE)}$ představují kombinované hodnoty ložiska ze strany NDE a DE. Za předpokladu, že dojde k průrazu obou ložisek současně ($R_{B(NDE),(DE)} \approx 0$, $Z_{B(NDE),(DE)} \approx 0$), stane se proud CB dominantním proudem procházejícím ložisky a model lze redukovat. [7]



Obrázek 2.4: Schéma náhradních kapacit na indukčním motoru[7]

V rámci práce bylo provedeno zjednodušení náhradního schématu pro účely měření na sestaveném motoru. Při měření nebylo možné přesně změřit kapacity v této části obvodu, protože byly paralelně s jinými kapacitami. Tyto kapacity mají nicméně vliv na kapacity měřené v rámci této práce.

Při měření skutečného obvodu může být obtížné přesně změřit všechny kapacity v různých částech obvodu. V případě, který je popisován v textu, byly některé kapacity paralelně s okolními kapacitami a nelze je tedy přesně změřit samostatně. Tyto kapacity jsou však stále přítomné v obvodu a mají vliv na jeho chování.

Vlastní měření kapacit je popsáno v kapitole 3.3.

Kapitola 3

Měření

3.1 Motor

Veškerá měření byla prováděna na upraveném asynchronním motoru DK0BZ 0610–4X firmy VEM Sachsenwerk GmbH. Pro účely měření byly jeho jednotlivé části od sebe odděleny izolačními přepážkami a jednotlivé části byly propojeny měděnými dracouny. Na takto upraveném motoru byly provedeny následující úkoly a měření:

- Identifikace zapojení vinutí
- Měření parazitních kapacit
- Měření ložiskových napětí a proudů

3.2 Identifikace zapojení vinutí

Prvním úkolem bylo určit druh a propojení vinutí motoru. Toho bylo docíleno kontrolou reálného provedení vinutí motoru vůči výkresu vinutí, který byl dodán s motorem. Pro naše potřeby byl posléze výkres překreslen podle standardů pro návrh vinutí, který se používá na Západočeské univerzitě.

3.3 Měření parazitních kapacit

Hlavním úkolem měření bylo změřit významné kapacity motoru. K měření byl použit Bode 100 Vector Network Analyzer. Jednalo se o kapacity:

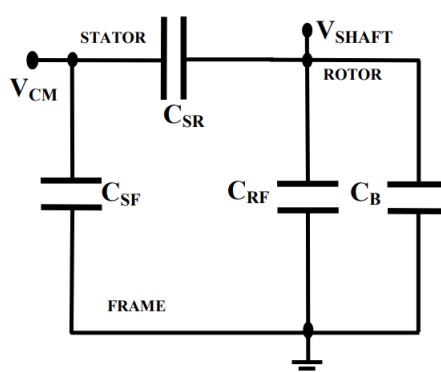
- Kapacita mezi statorovým vinutím a statorovým jhem C_{wf}
- Kapacita statorového vinutí proti rotoru C_{wr}
- Kapacita mezi rotorem a jhem statoru C_{rf}

Kapacitu ložisek C_b nebylo, z důvodu popsaného v kapitole 2.2, možné odělit od kapacity C_{rf} .

Tabulka 3.1: Naměřené kapacity mezi jednotlivými částmi

statorové vinutí - statorové jho	16,594 nF
rotor - statorové jho	2,112 nF
statorové vinutí - rotor	2,114 nF

U změřených kapacit musela být provedena korekce, neboť tyto kapacity byly ovlivněny kapacitami okolních částí. Pro dopočítání vlastních kapacit bylo použito zjednodušené schéma:



Obrázek 3.1: Zjednodušené schéma parazitních kapacit motoru [9]

Podle obrázku 3.1 byly sestaveny následující rovnice:

$$C_{wfm} = C_{wf} + \frac{1}{\frac{1}{C_{rf}} + \frac{1}{C_{wr}}}$$

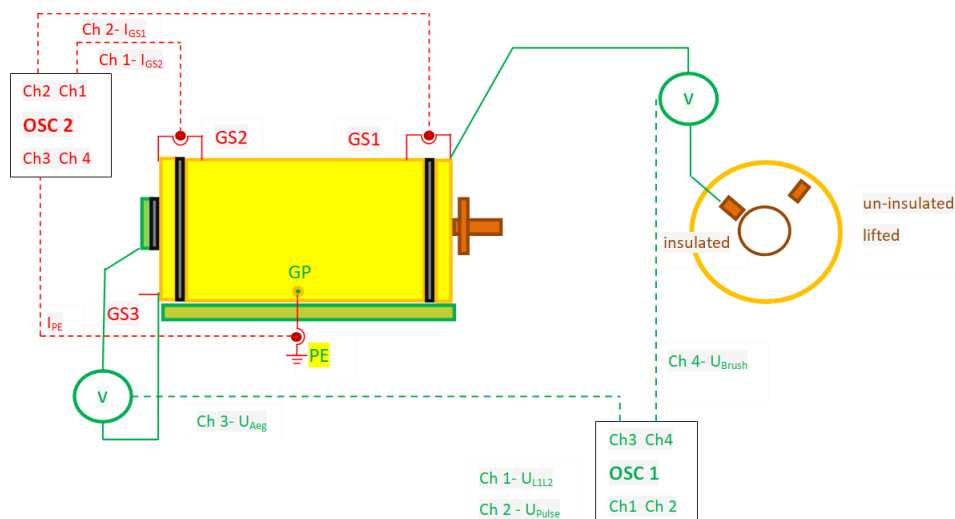
$$C_{rfm} = C_{rf} + \frac{1}{\frac{1}{C_{wf}} + \frac{1}{C_{wr}}}$$

$$C_{wrm} = C_{wr} + \frac{1}{\frac{1}{C_{wf}} + \frac{1}{C_{rf}}}$$

3.4 Měření ložiskových napětí a proudů

3.4.1 Měření proudů

Cílem bylo změřit ložiskové proudy v jednotlivých dracounech a zemním vodičem. (viz. Obrázek 3.2)



Obrázek 3.2: Nákres měření na motoru [10]

Do měřících míst byly instalovány nejprve proudové sondy osciloskopu. Všechna data byla uložena pro pozdější zpracování.

Toto měření bylo provedeno pro 2 druhy napájení:

- a) napájení ze sítě
- b) napájení z měniče frekvence

3.4.2 Měření napětí

Následně byly rozpojeny příslušné propoje a bylo změřeno i napětí mezi jednotlivými částmi stroje. (Neměřená místa zůstala spojená.) Měření bylo rovněž provedeno pro oba druhy napájení.

3.4.3 Zpracování výsledků měření

Pro zpracování výsledků byl použit software MATLAB. Každý průběh byl pomocí funkce *fft* převeden na frekvenční spektrum. Následně byly absolutní hodnoty těchto spekter zobrazeny v grafech s logaritmickou osou y , pro lepší přehlednost.

Kapitola 4

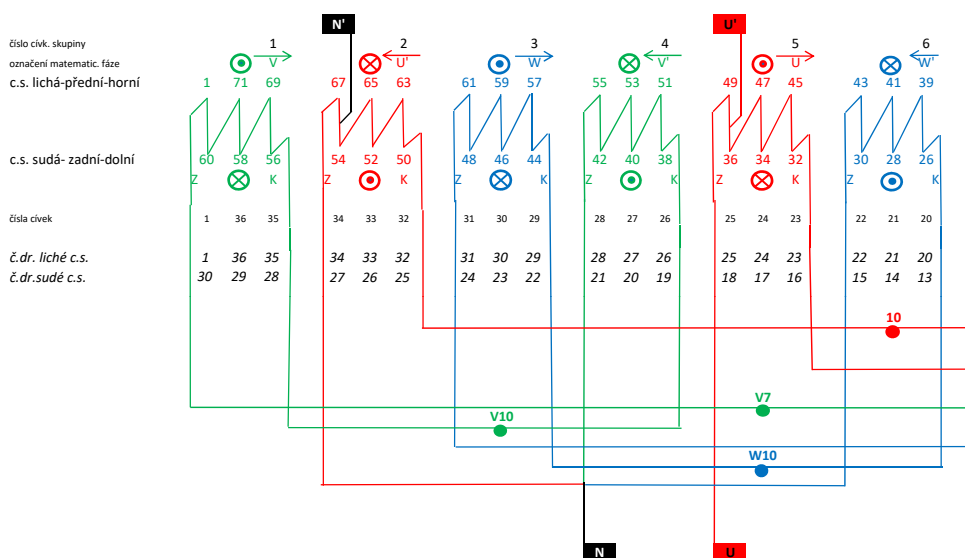
Výsledky

4.1 Identifikace zapojení vinutí

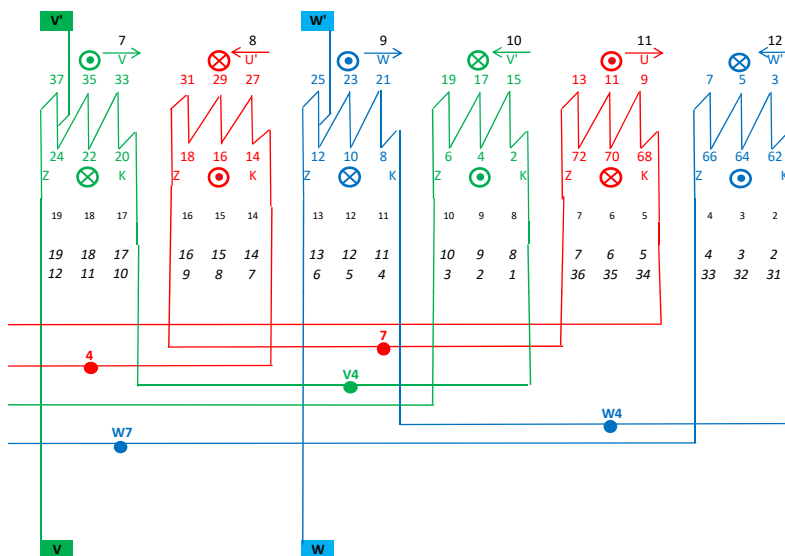
V motoru je použito smyčkové vinutí. Z konstrukčních důvodů jsou u něj zaměněny pozice předních a zadních cívkových stran. Tato vlastnost je patrná v tabulce 4.1 i na obrázcích 4.1 a 4.2. Důvod záporného cívkového kroku je vysvětlen v kapitole 3.2.

Tabulka 4.1: Základní parametry vinutí

Počet pólů	$2p$	4
Počet drážek	N_1	36
Cívkový krok	y_1	-13
Spojkový krok	y_2	11
Počet svazků cívek	S_C	12



Obrázek 4.1: Pilové schéma část 1



Obrázek 4.2: Pilové schéma část 2

4.2 Měření parazitních kapacit

Po provedení korekce (viz kapitola 3.3) byly vypočteny tyto kapacity:

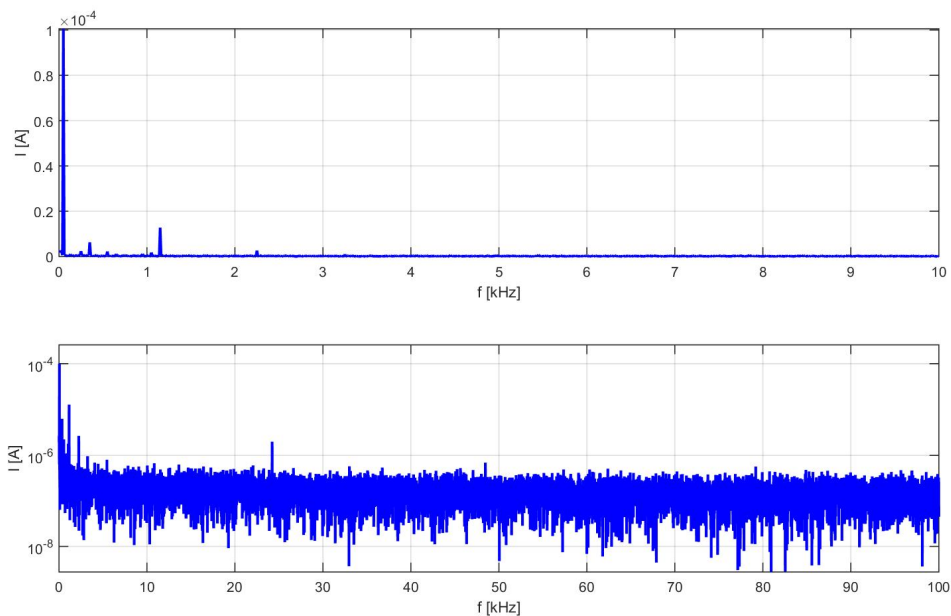
Tabulka 4.2: Parazitní kapacity mezi jednotlivými částmi

statorové vinutí - statorové jho	16,048 nF
rotor - statorové jho	1,083 nF
statorové vinutí - rotor	1,100 nF

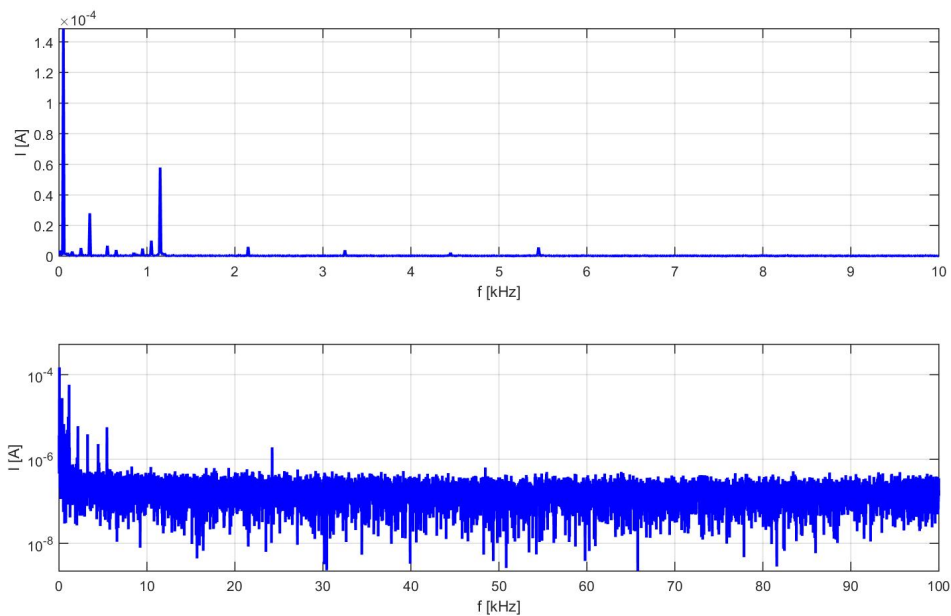
4.3 Měření ložiskových napětí a proudů

V této kapitole jsou výsledky měření popsaného v části 3.4. Rozklad na spektrum je proveden do frekvence 100kHz. Pro lepší přehlednost byl ke každému spektru udělán detail od stejnosměrné složky do 10kHz.

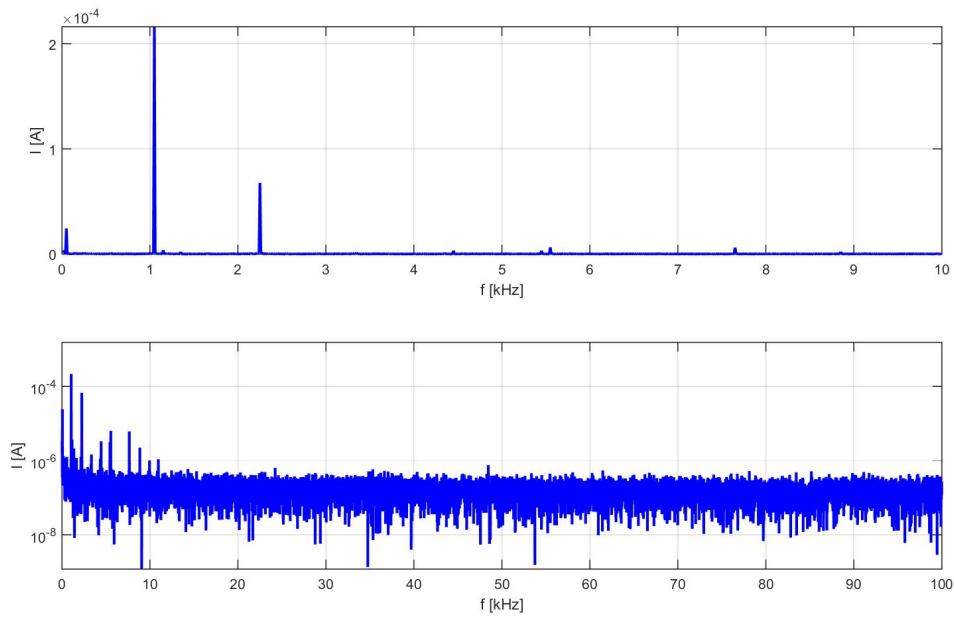
4.3.1 Měření při napájení ze sítě



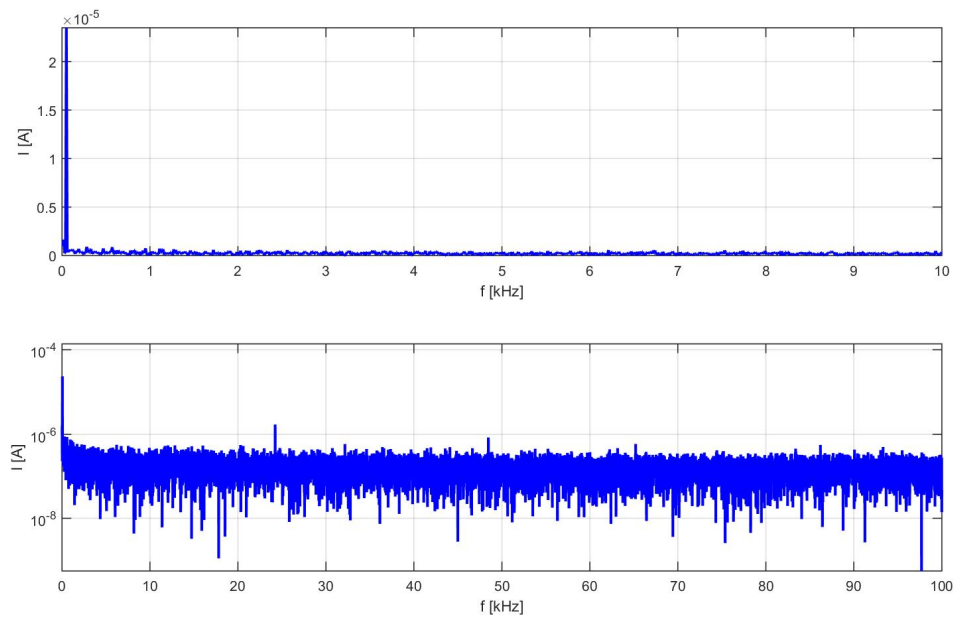
Obrázek 4.3: Fourierova transformace průběhu proudu mezi kostrou a DE štítem při napájení ze sítě



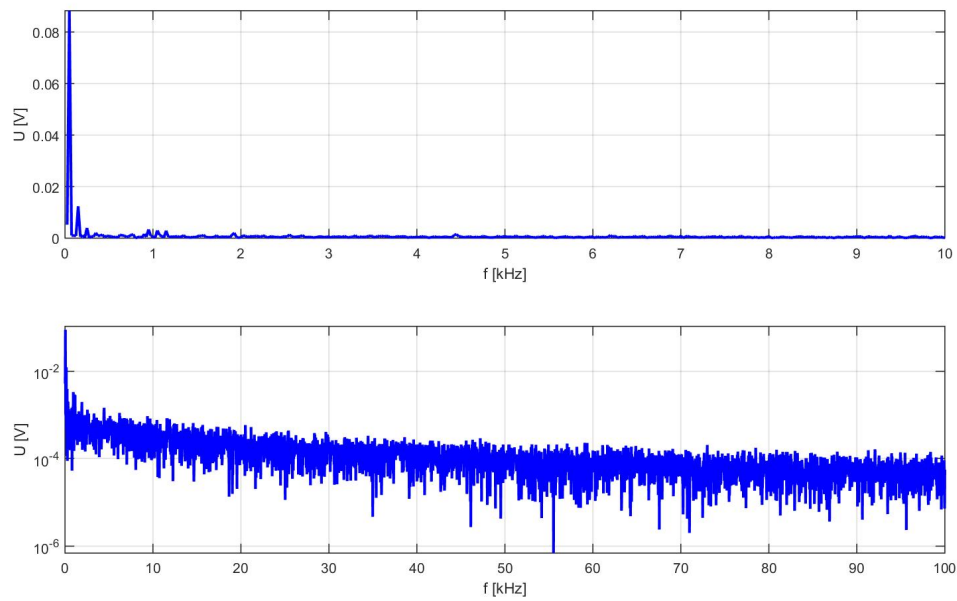
Obrázek 4.4: Fourierova transformace průběhu proudu mezi kostrou a NDE štítem při napájení ze sítě



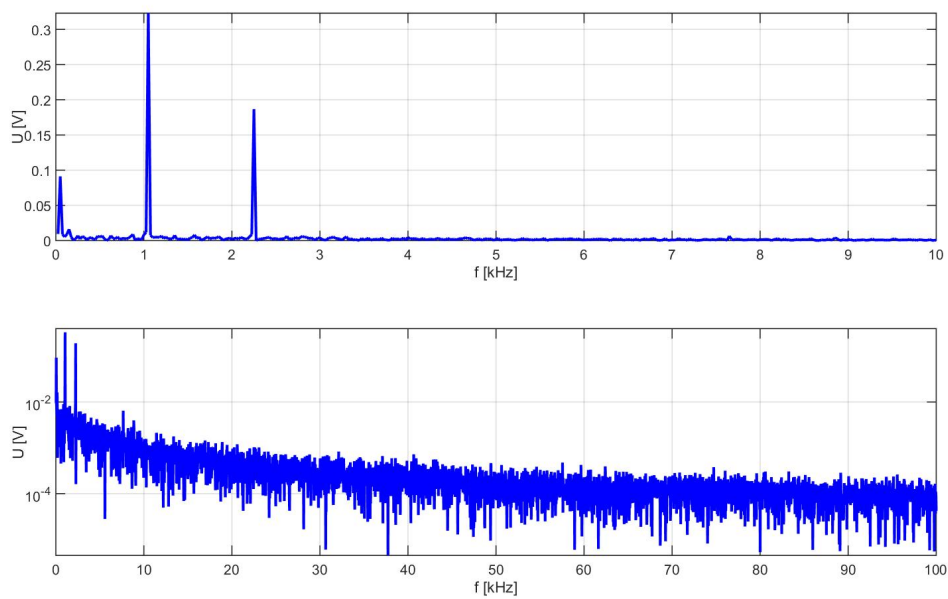
Obrázek 4.5: Fourierova transformace průběhu proudu mezi kostrou a vodičem PE při napájení ze sítě



Obrázek 4.6: Fourierova transformace průběhu proudu mezi aegisem a NDE štítem při napájení ze sítě



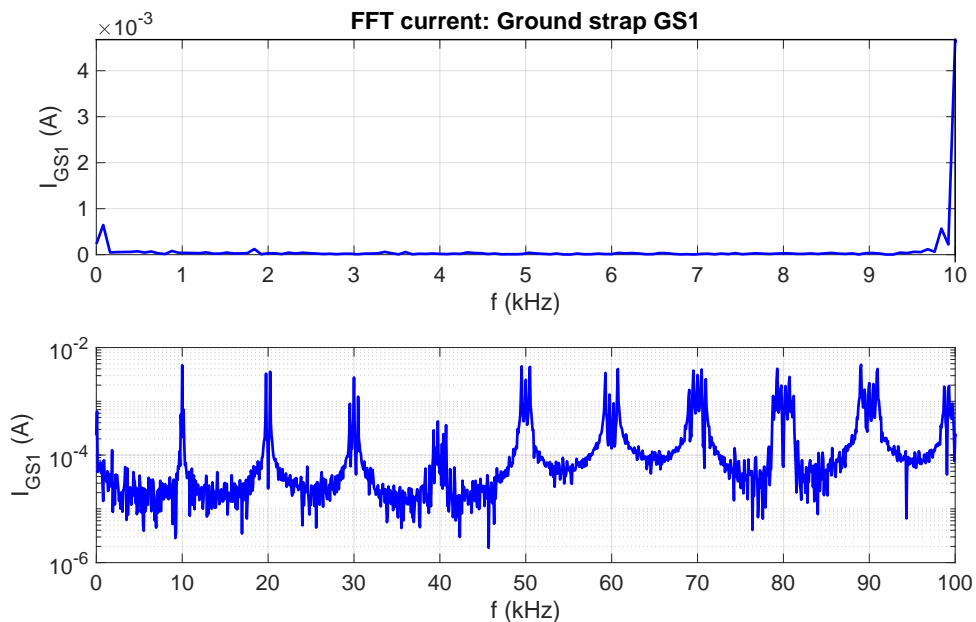
Obrázek 4.7: Fourierova transformace průběhu napětí mezi aegisem a NDE štítem při napájení ze sítě



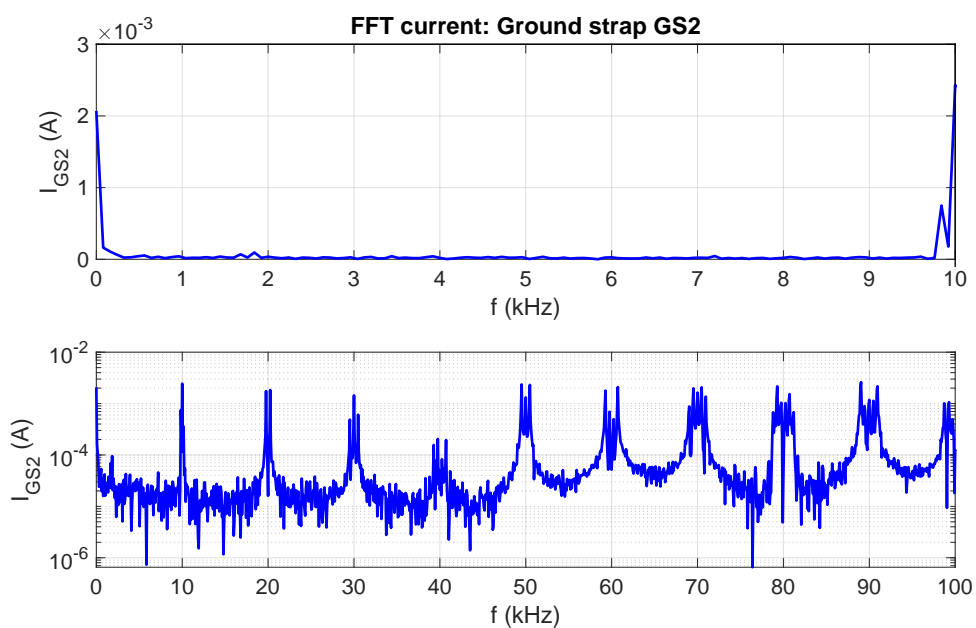
Obrázek 4.8: Fourierova transformace průběhu napětí mezi hřídělí a DE štítem při napájení ze sítě

4.3.2 Měření při napájení z měniče

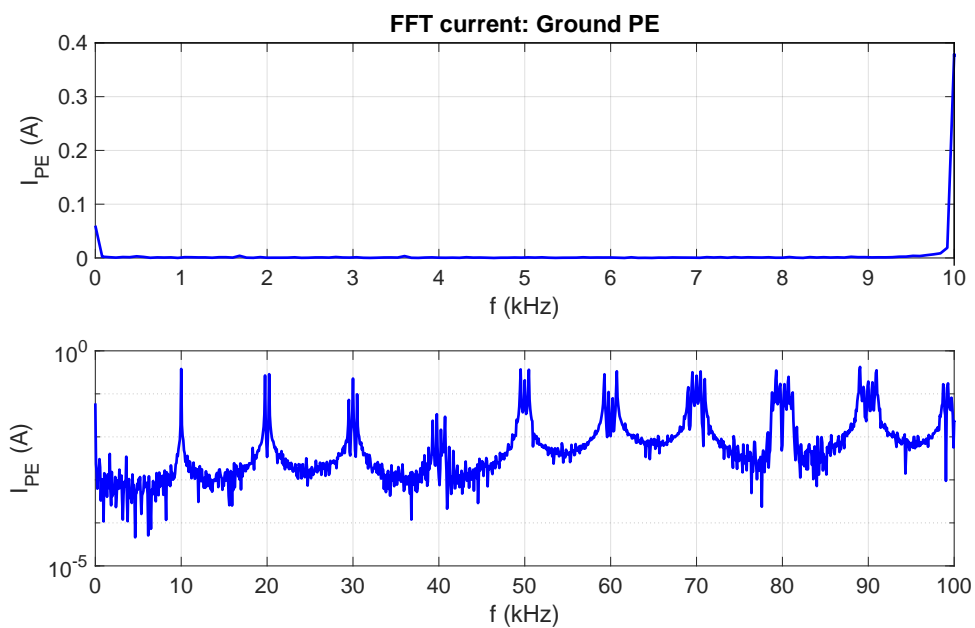
4.3.2.1 Měření s frekvencí 10kHz, připojeno kabelem o délce 20m



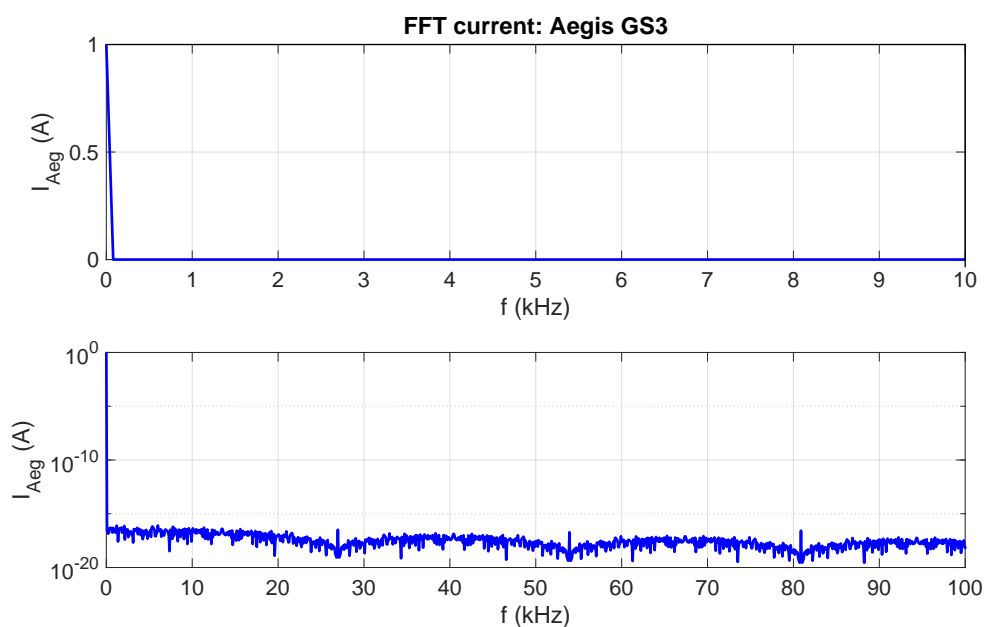
Obrázek 4.9: Fourierova transformace průběhu proudu mezi kostrou a DE štítem při napájení z měniče se spínací frekvencí 10 kHz



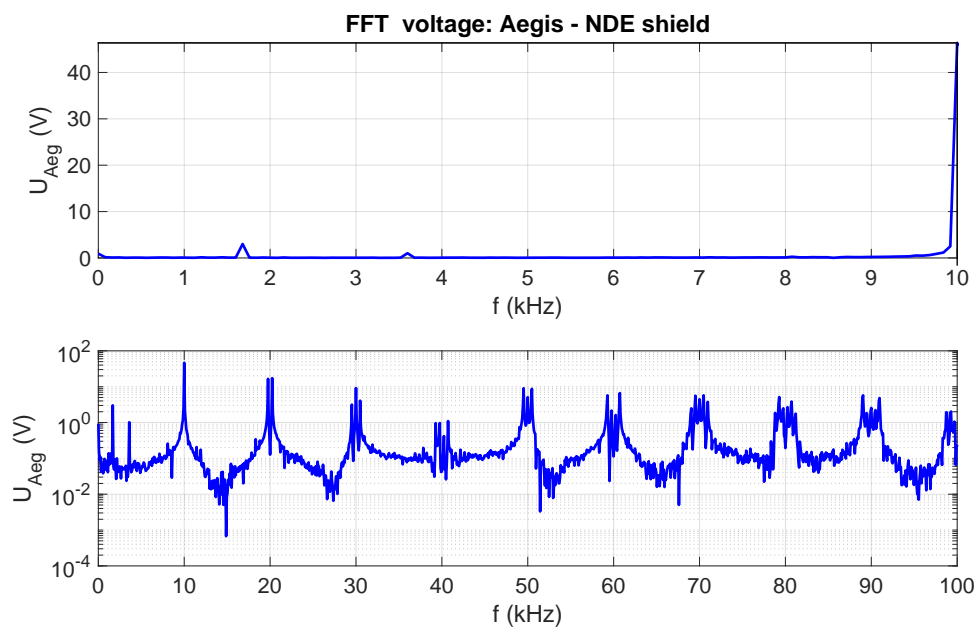
Obrázek 4.10: Fourierova transformace průběhu proudu mezi kostrou a NDE štítem při napájení z měniče se spínací frekvencí 10 kHz



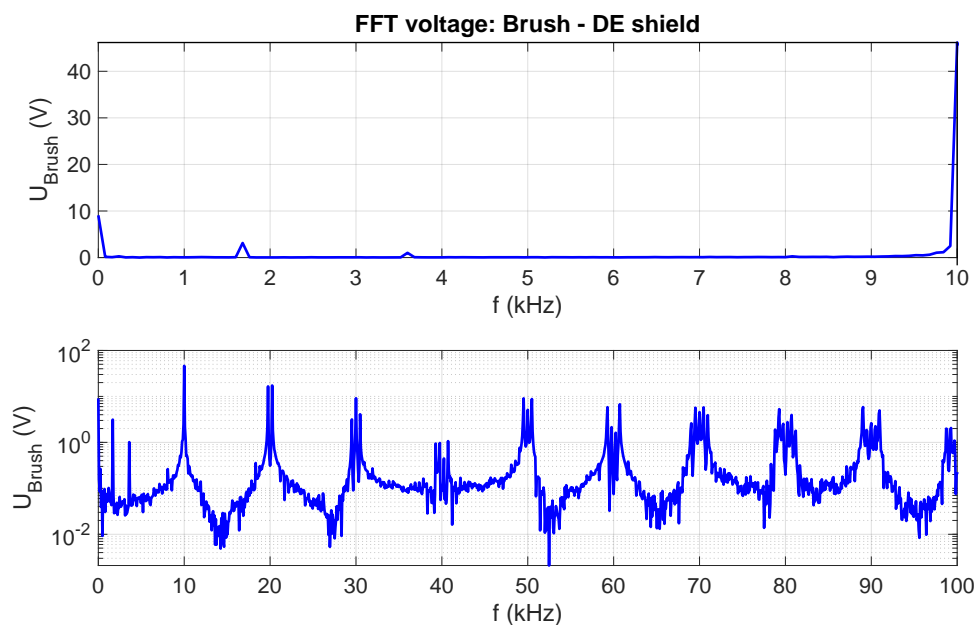
Obrázek 4.11: Fourierova transformace průběhu proudu mezi kostrou a vodičem PE při napájení z měniče se spínací frekvencí 10 kHz



Obrázek 4.12: Fourierova transformace průběhu proudu mezi aegisem a NDE štítem při napájení z měniče se spínací frekvencí 10 kHz

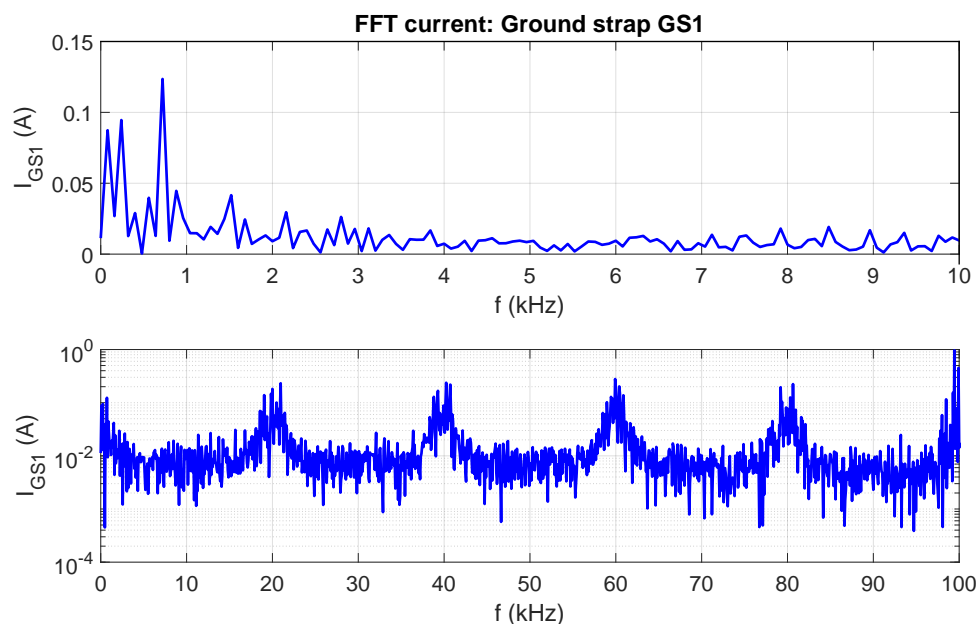


Obrázek 4.13: Fourierova transformace průběhu napětí mezi aegisem a NDE štítem při napájení z měniče se spínací frekvencí 10 kHz

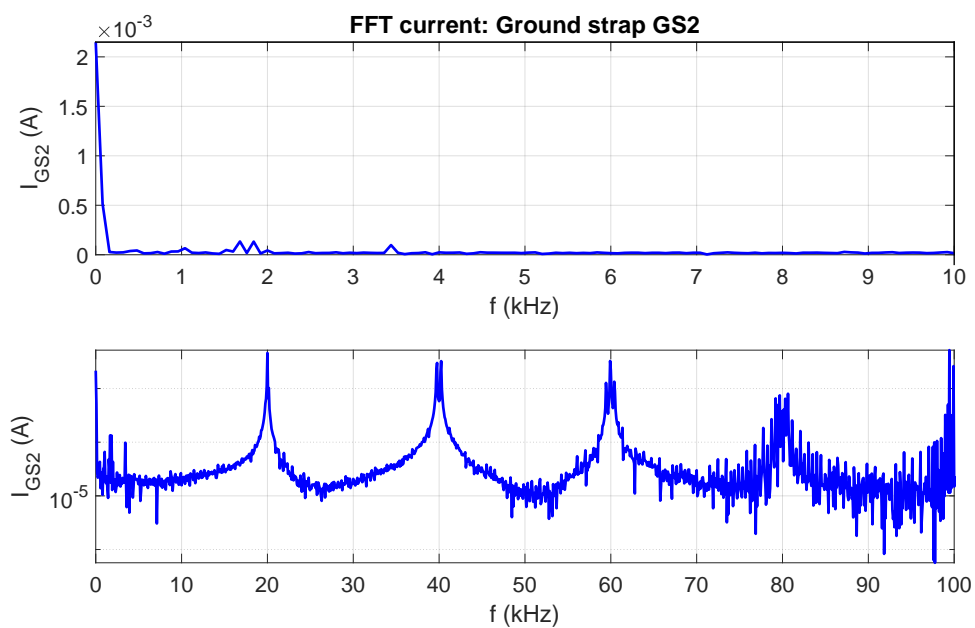


Obrázek 4.14: Fourierova transformace průběhu napětí mezi hřídelí a DE štítem při napájení z měniče se spínací frekvencí 10 kHz

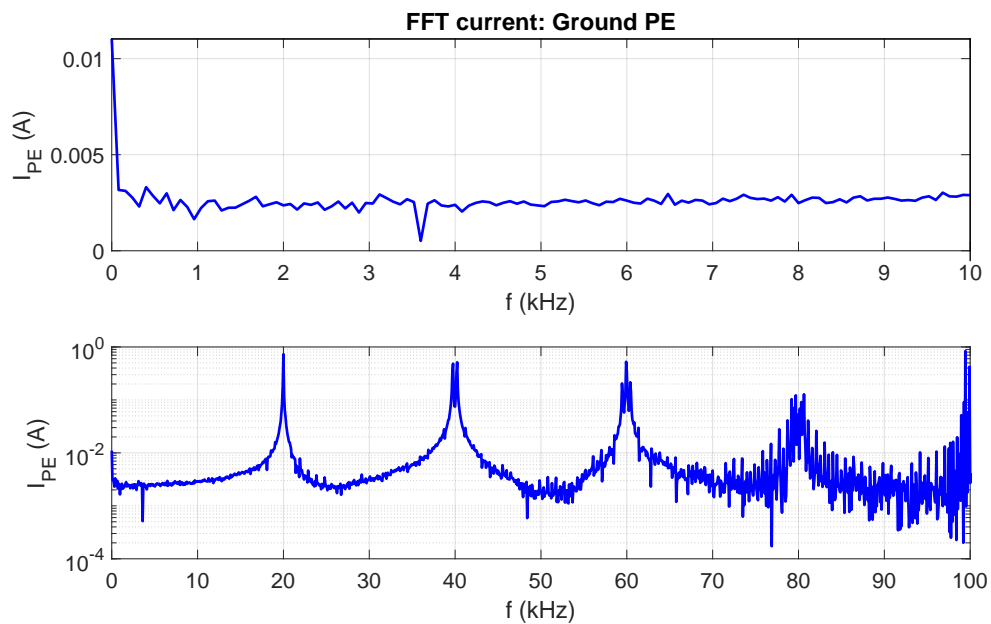
4.3.2.2 Měření s frekvencí 20kHz, připojeno kabelem o délce 2m



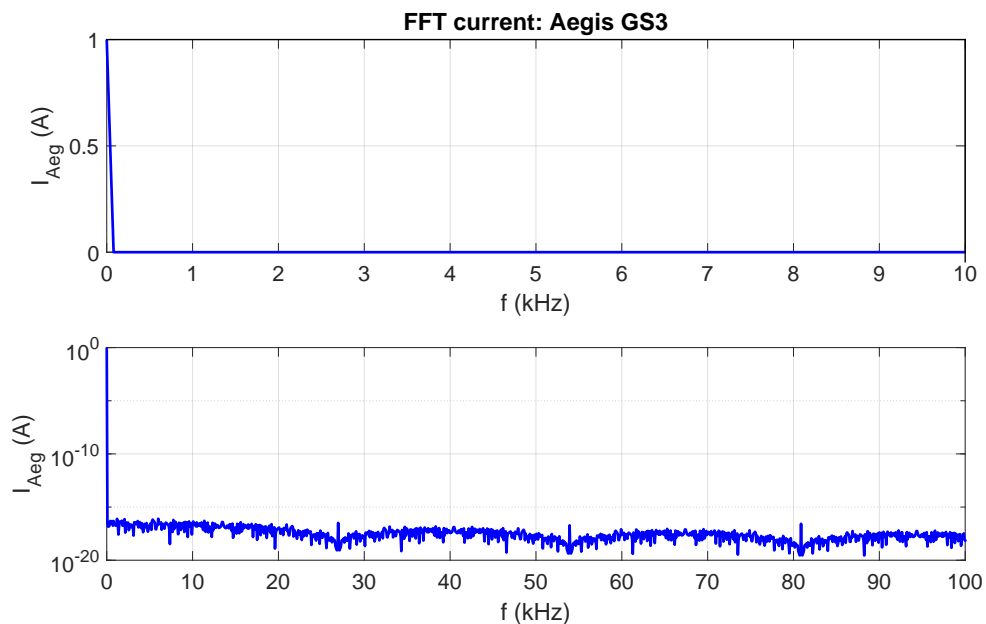
Obrázek 4.15: Fourierova transformace průběhu proudu mezi kostrou a DE štítem při napájení z měniče se spínací frekvencí 20 kHz



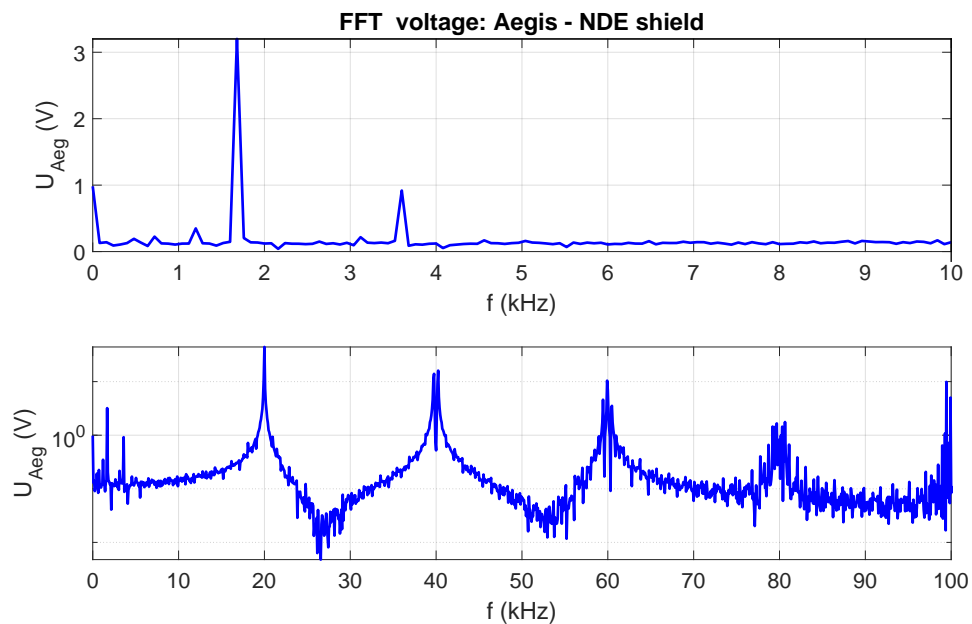
Obrázek 4.16: Fourierova transformace průběhu proudu mezi kostrou a NDE štítem při napájení z měniče se spínací frekvencí 20 kHz



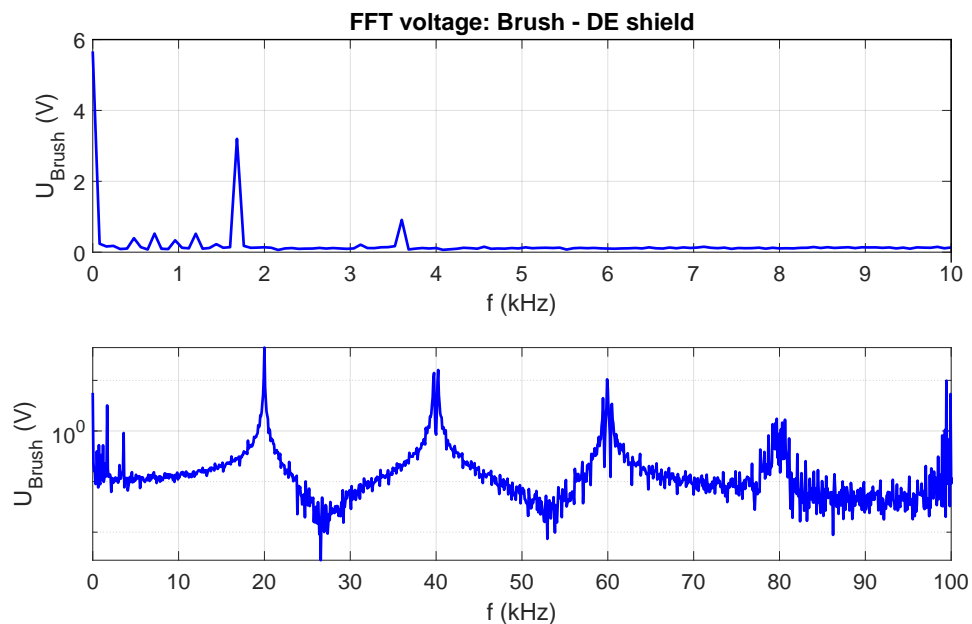
Obrázek 4.17: Fourierova transformace průběhu proudu mezi kostrou a vodičem PE při napájení z měniče se spínací frekvencí 20 kHz



Obrázek 4.18: Fourierova transformace průběhu proudu mezi aegisem a NDE štítem při napájení z měniče se spínací frekvencí 20 kHz



Obrázek 4.19: Fourierova transformace průběhu napětí mezi aegisem a NDE štítem při napájení z měniče se spínací frekvencí 20 kHz



Obrázek 4.20: Fourierova transformace průběhu napětí mezi hřídelí a DE štítem při napájení z měniče se spínací frekvencí 20 kHz

Závěr

Cílem této práce bylo shrnout základní poznatky v problematice ložiskových proudů.

Nejprve byly představeny základní druhy ložiskových proudů. Jak a za jakých podmínek se podílejí na celkovém proudu, který protéká ložiskem.

Dále bylo provedeno rozlišení druhu zapojení a změření parazitních kapacit na motoru. Velikost jednotlivých kapacit byla v rozsahu očekávaných hodnot. Protože motor byl většího výkonu, velikost kapacit dosahovala hodnoty desítek nF u kapacity C_{wf} a jednotek nF u kapacit C_{rf} a C_{wr} .

Tabulka 4.3: Parazitní kapacity mezi jednotlivými částmi

Kapacita	Změřená	Zkorigovaná
statorové vinutí - statorové jho	16,594 nF	16,048 nF
rotor - statorové jho	2,112 nF	1,083 nF
statorové vinutí - rotor	2,114 nF	1,100 nF

V poslední části bylo provedeno měření ložiskových napětí a proudů mezi částmi motoru. V případě napájení ze sítě měly spektrální složky proudů menší velikost (maximální velikost proudu v řádu 10^{-6} A.) V jednotlivých grafech je možné najít rušivé frekvence pravděpodobně z důvodu napájení ze sítě.

V případě napájení z měniče je základní hodnota proudů ve spektru v řádu $10^{-5} - 10^{-2}$ A. Ve spektrech je také patrná frekvence modulace f_{PWM} a její celočíselné násobky. Hodnoty těchto pulzů ve spektru jsou minimálně o 2 řády vyšší než okolní spektrum.

Z toho lze vyvodit negativní důsledky takového napájení na motor. Jak bylo popsáno výše, vyšší hodnoty proudu protékajícího ložiskem se projevují především větším ohřevem maziva, což může vést k redukci mazacího filmu. S postupem času může mazací film zmizet úplně. V takovém případě hrozí zadření ložiska a s tím spojené další problémy u poháněného zařízení nebo i u samotného motoru. Dále může dojít k elektrickému obrobení materiálu ložiska. Důsledkem by bylo přenášení materiálu mezi valivými elementy, kroužkem a klecí ložiska.

Použitá literatura

- [1] AMMANN, C. et al. „Shaft voltages in generators with static excitation systems - problems and solutions“. In: *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 3 (1988), s. 409–419.
- [2] BOYD, J. a H.N. KAUFMAN. „The causes and the control of electrical currents in bearings“. In: *Journal of the Society of Lubrication Engineers* (1959), s. 28–34.
- [3] ERDMAN, J.M. et al. „Effect of PWM inverters on AC motor bearing currents and shaft voltages“. In: *IEEE Transactions on Industry Applications* 32.2 (1996), s. 250–259. DOI: 10.1109/28.491472.
- [4] HAN, Peng et al. „Combined Numerical and Experimental Determination of Ball Bearing Capacitances for Bearing Current Prediction“. In: *2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. 2020, s. 5590–5594. DOI: 10.1109/ECCE44975.2020.9235700.
- [5] CHEN, Shaotang, T.A. LIPO a D. FITZGERALD. „Modeling of motor bearing currents in PWM inverter drives“. In: *IEEE Transactions on Industry Applications* 32.6 (1996), s. 1365–1370. DOI: 10.1109/28.556640.
- [6] CHEN, Shaotang, T.A. LIPO a D.W. NOVOTNY. „Circulating type motor bearing current in inverter drives“. In: *IAS '96. Conference Record of the 1996 IEEE Industry Applications Conference Thirty-First IAS Annual Meeting*. Sv. 1. 1996, 162–167 vol.1. DOI: 10.1109/IAS.1996.557010.
- [7] JARITZ, Michael et al. „An Improved Model for Circulating Bearing Currents in Inverter-Fed AC Machines“. In: *2019 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*. 2019, s. 225–230. DOI: 10.1109/ICIT.2019.8755123.
- [8] MUETZE, Annette. „Bearing Currents in Inverter-Fed AC-Motors“. Dis. pr. Technischen Universitaet Darmstadt, 2003.
- [9] RIEHL, Rudolf Ribeiro et al. „A simplified approach for identification of parasitic capacitances in three-phase induction motor driven by PWM inverter“. In: *2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*. 2014, s. 2550–2554. DOI: 10.1109/ICEMS.2014.7013931.

- [10] SKALA, Bohumil. *WP 7 – Bearing Currents and Voltages*. Tech. zpr. 22190 –007 – 2022. University of West Bohemia in Pilsen: Research a Innovation Centre for Electrical Engineering, břez. 2022.