



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

ASYNCHRONNÍ MOTOR S PLNÝM ROTOREM

AN INDUCTION MACHINE WITH SOLID ROTOR

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jan Fišer

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Mach, Ph.D.

BRNO 2017

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Bc. Jan Fišer

ID: 146818

Ročník: 2

Akademický rok: 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Asynchronní motor s plným rotorem

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Analyzujte konkrétní asynchronní motor s plným rotorem.
2. Pomocí prostudované literatury navrhnete úpravy, které povedou ke zlepšení parametrů daného stroje.
3. Navržené úpravy ověřte pomocí simulací metodou konečných prvků.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] BAŠTA, J a KUČAVALOV, V. M. Elektrické stroje s plnými rotory. Teorie a výpočet. Academia, Praha 1980.

[2] HUPPUNEN, J. High-speed solid-rotor induction machine – electromagnetic calculation and design. Acta Universitatis Lappeenrantaensis 197, 2004. ISBN 951-764-944-4.

Termín zadání: 6.2.2017

Termín odevzdání: 24.5.2017

Vedoucí práce: Ing. Martin Mach, Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Ondřej Vitek, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně / Technická 3058/10 / 616 00 / Brno

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá problematikou asynchronního motoru s plným rotorem. Úvod práce je věnován rozboru plného rotoru. Následně byl vytvořen model motoru s plným rotorem ve 2D i 3D a provedly se simulace těchto modelů metodou konečných prvků. Dále jsou v práci uvedeny výsledky z laboratorního měření na vzorku motoru. Na základě výsledků ze simulací a z měření byly navrženy úpravy rotoru, které vedly ke zlepšení parametrů stroje. S těmito úpravami rotoru se vytvořily modely ve 2D, které prošly simulací metodou konečných prvků. V závěru práce jsou porovnány všechny dosažené výsledky z měření a ze simulací.

Klíčová slova

Asynchronní motor, plný rotor, drážky, klec, vrstva, metoda konečných prvků

Abstract

This master's thesis is focused on induction motor with solid rotor. The introduction is dedicated to the full analysis of the rotor. Then model of motor with solid rotor was designed in 2D and 3D. Simulations of these models were carried out using the finite elements method. Further in this thesis there are laboratory measurements' results due to the motor's sample. Based on the results from simulations and measurements rotor modifications have been proposed, which led to improved machine parameters. 2D models have been developed by rotor modifications. These models went through finite elements method's simulation. In the conclusion of the thesis there are all results from measurements and simulations compared.

Keywords

Induction motor, solid rotor, slits, cage, layer, finite element method

Bibliografická citace:

FIŠER, J. *Asynchronní motor s plným rotorem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 55s. Vedoucí práce: Ing. Martin Mach, Ph.D.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou závěrečnou práci na téma Asynchronní motor s plným rotorem jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné 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 části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne 24. května 2017

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Martinu Machovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne 24. května 2017

.....
podpis autora

Obsah

1	Úvod	1
2	Plný rotor	2
2.1	Využití plných rotorů	3
2.2	Momentová charakteristika.....	3
2.3	Pronikání magnetického toku do plného rotoru	4
2.4	Vliv drážek statoru na ztráty na povrchu rotoru.....	4
3	Úpravy konstrukce plného rotoru	6
3.1	Plný rotor s povrchovou vrstvou.....	6
3.2	Vyfrézování axiálních drážek do rotoru	7
3.3	Vyfrézování axiálních drážek do plného rotoru s povrchovou vrstvou	7
3.4	Plný rotor s měděnou klecí	8
3.5	Ekvivalentní vodivost.....	8
4	Laboratorní vzorek motoru s plným rotorem	9
5	Provedená měření na motoru.....	11
5.1	Měření momentové charakteristiky.....	11
5.2	Měření nakrátko.....	15
5.3	Měření naprázdno	16
6	Simulace plného rotoru a jeho úprav.....	18
6.1	Přepočet vodivosti.....	20
6.2	Porovnání různých vodivostí	20
6.3	Výsledky ze simulací.....	22
6.3.1	Výsledné hodnoty ze simulací.....	22
6.4	Porovnání výsledků ze simulací a z měření.....	24
7	Úpravy plného rotoru	26
7.1	Plný rotor s povrchovou vrstvou.....	26
7.2	Axiální drážky v rotoru.....	26
7.2.1	Volba počtu drážek.....	26
7.2.2	Volba šířky drážky	27
7.2.3	Volba hloubky drážky.....	27
7.3	Axiální drážky s povrchovou vrstvou	27
7.4	Plný rotor s klecí z mědi.....	28
7.4.1	Návrh klece rotoru.....	28
7.4.2	Návrh klece pro upravenou vzdálenost h_0	30
8	Porovnání výsledků z měření a ze simulací	31
8.1	Rotor s povrchovou vrstvou a rotor s axiálními drážkami s povrchovou vrstvou.....	31
8.2	Rotor s axiálními drážkami.....	34

8.3	Rotor s měděnou klecí	36
8.4	Celkové srovnání.....	38
	Závěr.....	39
	Literatura	41
	Seznam symbolů, veličin a zkratk.....	42

Seznam obrázků

Obr. 2. 1 Asynchronní motor s plným hladkým rotorem [2].....	2
Obr. 2. 2 Momentová charakteristika motoru s plným rotorem [1].....	3
Obr. 2. 3 Průběh magnetické indukce na povrchu rotoru pod drážkou statoru [5]...5	
Obr. 2. 4 Indukční čáry u statorové drážky s klínem z feromagnetického materiálu [5]	5
Obr. 2. 5 Průběh magnetické indukce ve vzduchové mezeře pod otevřenou drážkou [5]	6
Obr. 3. 1 Plný rotor s vodivou vrstvou na povrchu [2]	7
Obr. 3. 2 Vyfrézované axiální drážky do plného rotoru [2]	7
Obr. 3. 3 Vyfrézované axiální drážky do plného rotoru s povrchovou úpravou rotoru [2]	8
Obr. 3. 4 Plný rotor s měděnou klecí [9].....	8
Obr. 4. 1 Vzorek motoru.....	9
Obr. 4. 2 Magnetizační charakteristika plechů M700-50A [6].....	10
Obr. 4. 3 Magnetizační charakteristika ocele 11373	10
Obr. 5. 1 Pracoviště pro měření motoru	11
Obr. 5. 2 Sestava pro měření momentové charakteristiky.....	12
Obr. 5. 3 Momentová charakteristika	14
Obr. 5. 4 Závislost statorového proudu na skluzu	15
Obr. 5. 5 Závislost výkonu motoru na skluzu	15
Obr. 6. 1 Prostředí programu Maxwell	18
Obr. 6. 2 Model plného rotoru ve 2D	19
Obr. 6. 3 Model plného rotoru ve 3D/mesh	19
Obr. 6. 4 Porovnání vodivostí při závislosti statorového proudu na otáčkách	21
Obr. 6. 5 Porovnání vodivostí při závislosti momentu na otáčkách	22
Obr. 6. 6 Rozložení magnetické indukce při $f = 50 \text{ Hz}$ a $n = 2600 \text{ min}^{-1}$	23
Obr. 6. 7 Rozložení proudové hustoty v rotoru při $f = 50 \text{ Hz}$ a $n = 2600 \text{ min}^{-1}$	24
Obr. 7. 1 Činitel k_i v závislosti na $\cos\varphi$ [8]	28
Obr. 7. 2 Rozměry drážky rotoru [8]	29
Obr. 8. 1 Porovnání momentů pro jednotlivé úpravy plného rotoru	32
Obr. 8. 2 Porovnání průběhů výkonů pro jednotlivé úpravy plného rotoru.....	33
Obr. 8. 3 Vliv drážkování statoru vytvářející nesinusový průběh magnetické indukce ve vzduchové mezeře	33
Obr. 8. 4 Porovnání rozložení magnetické indukce pro rotor s vrstvou 0,3 mm vlevo a axiálními drážkami s vrstvou 0,3 mm vpravo	34
Obr. 8. 5 Rozložení magnetické indukce u rotoru s axiálními drážkami při $n = 2600 \text{ min}^{-1}$	35

Obr. 8. 6 Rozložení proudové hustoty v rotoru s axiálními drážkami při $n = 2600 \text{ min}^{-1}$	35
Obr. 8. 7 Rozložení magnetické indukce v motoru s měděnou klecí při $n = 2600 \text{ min}^{-1}$	36
Obr. 8. 8 Rozložení proudové hustoty v rotoru s měděnou klecí při $n = 2600 \text{ min}^{-1}$	37
Obr. 8. 9 Proudová hustota v tyčích klece rotoru	37

Seznam tabulek

Tab. 5. 1 Naměřené hodnoty odporů vinutí motoru ve studeném stavu.....	11
Tab. 5. 2 Naměřené hodnoty odporů vinutí po zatížení.....	12
Tab. 5. 3 Získané hodnoty z měření momentové charakteristiky při $f = 50$ Hz motoru ve studeném stavu	13
Tab. 5. 4 Získané hodnoty z měření momentové charakteristiky při $f = 50$ Hz při zahřátém motoru.....	13
Tab. 5. 5 Získané hodnoty z měření momentové charakteristiky při $f = 60$ Hz	14
Tab. 5. 6 Hodnoty odporů při měření motoru nakrátko	16
Tab. 5. 7 Naměřené hodnoty	16
Tab. 5. 8 Hodnoty odporů vinutí při měření naprázdno.....	16
Tab. 5. 9 Naměřené hodnoty při měření naprázdno při $f = 50$ Hz	17
Tab. 5. 10 Naměřené hodnoty při měření motoru naprázdno při $f = 60$ Hz	17
Tab. 6. 1 Zvolené vodivosti pro simulaci	21
Tab. 6. 2 Výsledné hodnoty ze simulací 2D modelu při $f = 50$ Hz.....	22
Tab. 6. 3 Výsledné hodnoty ze simulací 2D modelu při $f = 60$ Hz.....	23
Tab. 6. 4 Výsledné hodnoty ze simulace 3D modelu při $f = 50$ Hz.....	23
Tab. 6. 5 Porovnání výsledků ze simulace 2D modelu a z měření.....	24
Tab. 6. 6 Výsledky ze simulací modelů s plným rotorem 2D, 3D a z měření při $f = 50$ Hz.....	25
Tab. 7. 1 Rozměry úprav rotoru a vrstvy	28
Tab. 7. 2 Výsledky z výpočtů návrhu klece rotoru	30
Tab. 8. 2 Porovnání výsledků momentu ze simulací plného rotoru, rotoru s povrchovou vrstvou a rotoru s axiálními drážkami a povrchovou vrstvou	31
Tab. 8. 3 Porovnání výsledků statorového proudu ze simulací plného rotoru, rotoru s povrchovou vrstvou a rotoru s axiálními drážkami a povrchovou vrstvou.....	32
Tab. 8. 4 Porovnání výsledků pro plný rotor a pro rotor s axiálními drážkami	34
Tab. 8. 5 Porovnání výsledků plného rotoru a plného rotoru s měděnou klecí.....	36
Tab. 8. 6 Porovnání výsledků všech úprav modelů rotoru	38

1 ÚVOD

Práce je věnována asynchronním motorům s plným rotorem. Tento typ stroje má rotor vyroben z jednoho pevného kusu feromagnetického materiálu. Nejjednodušší plný rotor je hladký ocelový válec. Jedná se o vysokootáčkové elektrické motory. Rostoucí poptávka po velkém výkonu, energeticky efektivních a spolehlivých systémech, zvýšila výzkum v oblasti vysokootáčkových elektrických motorů během několika posledních desetiletí. Tyto motory nacházejí své uplatnění například jako dmychadla, ventilátory nebo čerpadla. Nejčastěji se využívají v petrochemickém průmyslu jako kompresory, které pohání zemní plyn přenosovým potrubím na velké vzdálenosti. [2]

Diplomová práce si klade za cíl navrhnout takové úpravy plného rotoru asynchronního motoru, které povedou ke zlepšení parametrů daného motoru. Na konkrétním asynchronním motoru s plným rotorem provést měření v laboratoři. Následně vytvořit model tohoto motoru pro výpočet metodou konečných prvků. Na základě výsledků z měření a ze simulací navrhnout úpravy rotoru. Modely s těmito úpravami nechat ověřit výpočtem metodou konečných prvků.

Celkově je diplomová práce rozdělena do osmi kapitol. Druhá kapitola obsahuje teoretický rozbor plného rotoru. Třetí kapitola popisuje možné úpravy konstrukce plného rotoru. Ve čtvrté kapitole jsou uvedeny parametry a vlastnosti konkrétního vzorku motoru. V následující kapitole byly zaznamenány výsledky z měření na vzorku motoru v laboratoři. Šestá kapitola se věnuje simulacím plného rotoru v programu Maxwell. Zde jsou uvedeny i nezbytné výpočty, které musí být provedeny před simulací a dále výsledky vygenerované ze simulací. V předposlední kapitole je uveden postup návrhu úprav konstrukce plného rotoru. Závěr práce se věnuje porovnáním výsledků ze simulací a měření plného rotoru s výsledky úprav provedených na rotoru.

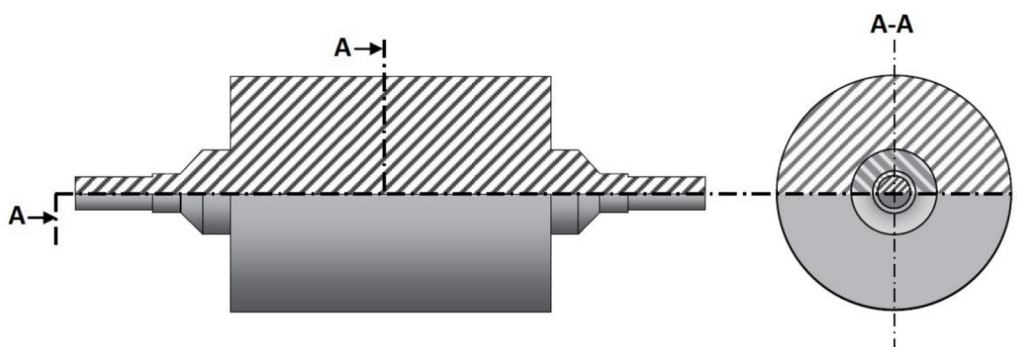
2 PLNÝ ROTOR

U nejrozšířenějších asynchronních motorů je magnetický obvod rotoru sestaven ze svazku izolovaných plechů, do nichž jsou raženy otvory pro drážky. Vinutí je pak vytvořeno metodou tlakového lití, kde dojde k úplnému vyplnění drážky, vzniká klec, jejíž konce tvoří spojovací kruhy nakrátko. Tento typ rotoru nazýváme kotva nakrátko. Rotor však může být vyroben z jednoho kusu feromagnetického materiálu. Pak se jedná o plný rotor, viz Obr. 2. 1. Hladkým ocelovým válcem, který se vyznačuje velkou permeabilitou, prochází magnetický tok vytvořený statorem. Válec rotoru představuje nekonečný počet paralelně zapojených vodičů. Indukuje se napětí v rotoru a vodiči prochází proudy. [1][2][3]

Několik výhod konstrukce plného rotoru:

- Vysoká mechanická tuhost a odolnost. Ze všech typů je plný rotor nejstabilnější a udržuje nejlepší rovnováhu,
- má vysokou tepelnou odolnost,
- vysoká spolehlivost,
- chráněn před agresivními chemikáliemi,
- jednoduchá konstrukce, snadná a levná výroba,
- nízká hladina hluku a vibrací.

Nevýhody asynchronního motoru s plným rotorem oproti asynchronnímu motoru s kotvou nakrátko při stejné velikosti jsou: nižší výstupní výkon, účinnost a účinník. To je zejména způsobeno vysokou impedancí plného rotoru, přesněji induktivní složkou. Jak bude dále popsáno, nevýhodou plného rotoru je především vytlačování magnetického toku směrem k povrchu rotoru a indukci vířivých proudů v podpovrchových vrstvách. [2][4]



Obr. 2. 1 Asynchronní motor s plným hladkým rotorem [2]

Aby se tyto nevýhody eliminovaly, je potřeba navrhnout takové úpravy rotoru, které povedou ke zlepšení elektromagnetických vlastností stroje. Plný rotor lze nahradit rotory, které mají provedeny následující úpravy:

- Plný rotor s povrchovou vrstvou,

- vyfrézované axiální drážky do rotoru,
- vyfrézované axiální drážky do rotoru s povrchovou vrstvou,
- plný rotor s měděnou klecí.

2.1 Využití plných rotorů

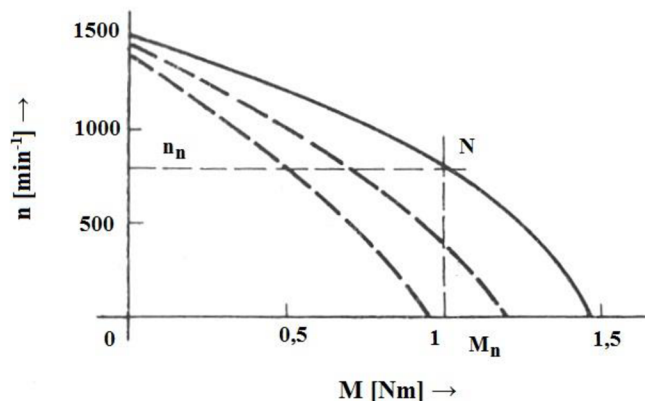
Hlavními výhodami těchto vysokorychlostních motorů jsou např.: absence mechanické převodovky a mechanických spojek, redukce velikosti motoru při zachování stejného výkonu. Konstrukce plného rotoru se využívá především pro svou mechanickou pevnost. Rotor udržuje rovnováhu i při velmi vysokých rychlostech. Pokud se zatíží na hřídeli a je provozován při vysokých rychlostech, je schopen dosáhnout dostatečné mechanické pevnosti a zabránit tak kolísání a vibracím, které by mohly poškodit systém ložiska. Tyto motory dosahují své nejlepší účinnosti, pokud se provozují při vysokých rychlostech. [2]

Několik příkladů využití asynchronních motorů s plným rotorem:

- Vysokorychlostní motory a generátory.
- Dvou nebo třífázové motory a generátory pro vysoké zatížení, kolísavé zatížení, pro reverzní provoz.
- Vysoce spolehlivé motory a generátory pracující za podmínek vysoké teploty, vysokého zrychlení, tam, kde se vyskytují aktivní chemikálie.
- Pomocné motory pro spuštění turbo-alternátorů.
- Setrvačné aplikace.

2.2 Momentová charakteristika

Momentová charakteristika u motoru s plným rotorem, na Obr. 2. 2, se od běžného asynchronního motoru s kotvou nakrátko liší tím, že její průběh je téměř lineární. Podle toho lze usoudit, že v jakémkoliv provozním stavu bude zajištěna stabilita motoru. [1]



Obr. 2. 2 Momentová charakteristika motoru s plným rotorem [1]

2.3 Pronikání magnetického toku do plného rotoru

Elektromagnetický moment je důsledkem vzájemného působení mezi vířivými proudy indukovanými ve válcovém plném rotoru a točivým magnetickým polem ve vzduchové mezeře. Střídavý magnetický tok procházející přes feromagnetický, elektricky vodivý materiál jádra rotoru, způsobuje vytlačování toku směrem k povrchu rotoru. Dochází k přesycování materiálu v podpovrchových vrstvách, z důvodu vzrůstu magnetické indukce a rostou hysterezní ztráty. Současně se ve vodivém materiálu rotoru indukují vířivé proudy, právě díky střídavému toku, ty pak způsobují vířivé ztráty. [4]

Vlivem přesycování materiálu v podpovrchových vrstvách tak dochází pouze ke slabému průniku magnetického toku hlouběji do jádra rotoru, současně se zvyšuje hodnota odporu rotoru, který má za následek zhoršení elektrického výkonu motoru. [2]

Průnik magnetického toku do jádra, lze vyjádřit hloubkou vniku [12]

$$\delta_i = \left[\operatorname{Re} \left(\sqrt{\frac{1}{\left(\frac{\pi}{\tau}\right)^2 + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_s \cdot s \cdot \frac{\sigma_{Fe}}{K_T} \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}} \right) \right] \quad (2.1)$$

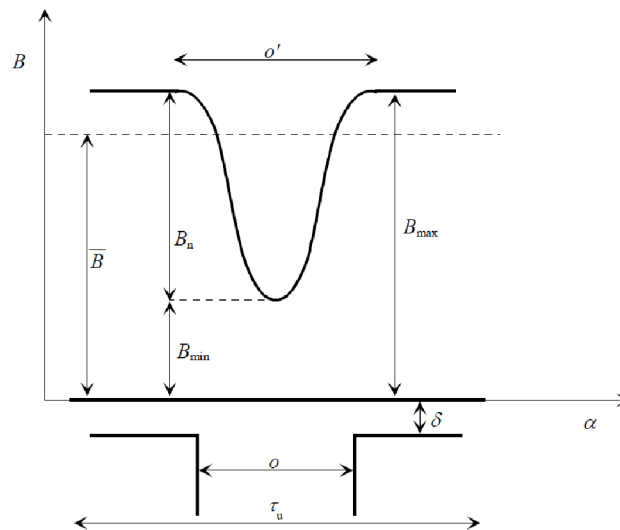
V rovnici (2.1) je K_T korekční činitel zastupující vliv konečné délky [12]

$$K_T \approx \frac{1}{1 - \frac{\tanh\left(\pi \cdot \frac{L}{2\tau}\right)}{\left(\pi \cdot \frac{L}{2\tau}\right)}} > 1 \quad (2.2)$$

Činitel K_T je podle rovnice (2.2) závislý na poměru L/τ .

2.4 Vliv drážek statoru na ztráty na povrchu rotoru

Magnetický obvod statoru téměř vždy vykazuje určité nerovnosti, a to především v místech, kde se nachází drážky. Na ploše vzduchové mezery pod těmito drážkami je rozdělení magnetické indukce nerovnoměrné. Hustota indukčních čar se nad otevřením drážek zmenšuje a nad hlavami zubů se naopak zhušťuje. Maximální hodnota magnetické indukce B_{max} bude v místě, kde se nenachází drážka statoru. Jak lze vidět z Obr. 2. 3, ve vzduchové mezeře, která je pod plně otevřenou drážkou se magnetická indukce snižuje až na hodnotu B_{min} . To vede ve vzduchové mezeře k nesinusovému průběhu magnetické indukce. Na povrchu rotoru pak dochází k vířivým ztrátám způsobeným právě vyššími harmonickými od drážkování statoru. [5][8]

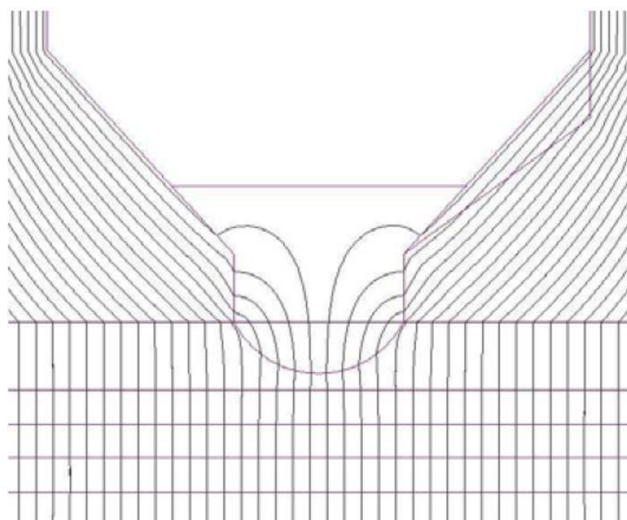


Obr. 2. 3 Průběh magnetické indukce na povrchu rotoru pod drážkou statoru [5]

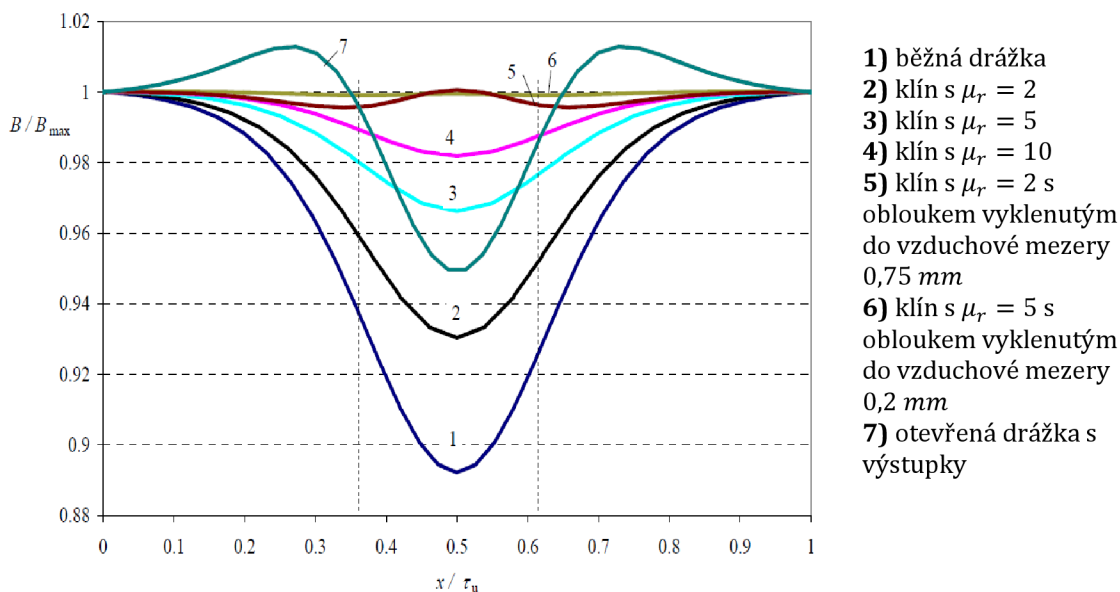
Minimalizace těchto harmonických ve vzduchové mezeře je u asynchronních motorů s plným rotorem velmi důležitá, protože snižuje dodatečné ztráty motoru. [5]

Podle literatury [5] je jednou z možností, jak snížit vliv harmonických od drážkování statoru, je zvětšit vzduchovou mezeru. Při zvětšení však dochází k růstu magnetizačního proudu ve statorovém vinutí a současně se zvyšují ztráty ve vinutí statoru. Je nutné proto přizpůsobit délku vzduchové mezery s přihlédnutím na velikost ztrát vířivými proudy v rotoru a ztrát ve vinutí statoru.

Kromě zvětšení vzduchové mezery lze drážku statoru upravit podle [5] tím, že se mezi zuby vloží feromagnetický klín. Tento klín má malou měrnou permeabilitu s velikostí od $\mu_r = 2$ do přibližně $\mu_r = 5$. Pro dosažení vyrovnanějšího průběhu magnetické indukce se geometrie tohoto klínu upravuje tak, aby byl vytažen z otvoru šterbiny do vzduchové mezery, jak ukazuje Obr. 2. 4.



Obr. 2. 4 Indukční čáry u statorové drážky s klínem z feromagnetického materiálu [5]



Obr. 2. 5 Průběh magnetické indukce ve vzduchové mezeře pod otevřenou drážkou [5]

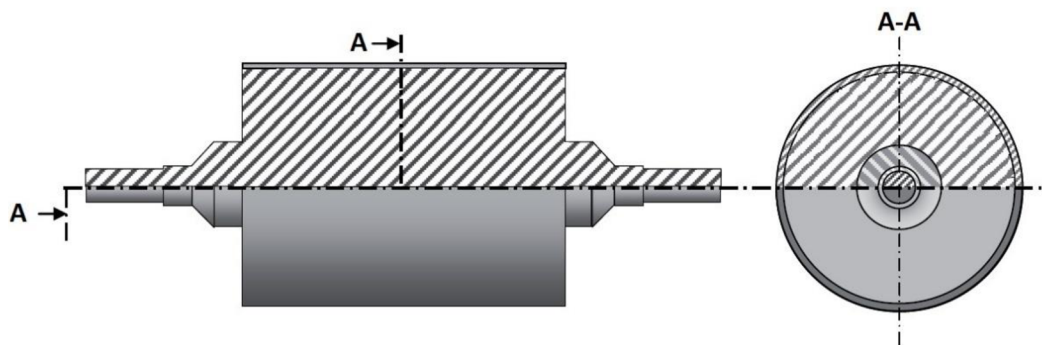
3 ÚPRAVY KONSTRUKCE PLNÉHO ROTORU

Jak bylo uvedeno v předchozí kapitole, plný ocelový válec rotoru neumožňuje proniknout magnetickému toku hlouběji do rotoru a je vytlačován pod povrch rotoru. Tím dochází k zhoršení elektromagnetických vlastností motoru. V této kapitole budou uvedeny možné úpravy konstrukce plného rotoru, které vedou ke zlepšení parametrů motoru.

3.1 Plný rotor s povrchovou vrstvou

U tohoto typu konstrukce plného rotoru je povrch rotoru pokryt vrstvou materiálu. V této vrstvě dochází k potlačení vyšších harmonických magnetického toku, který způsobuje v rotoru vířivé proudy.

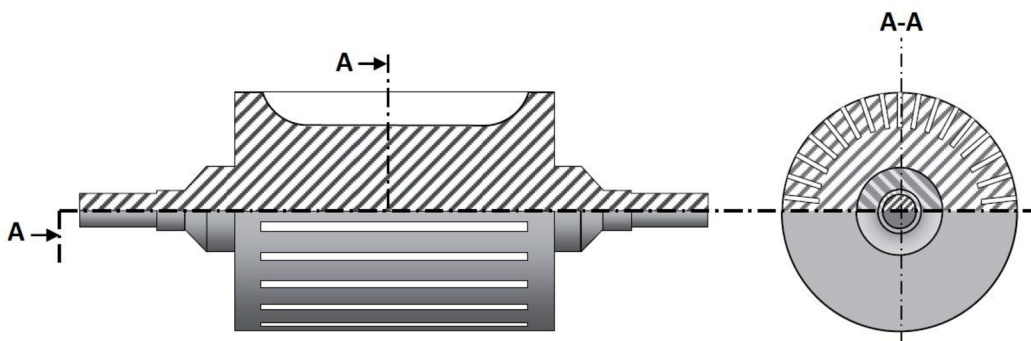
V případě, že by nebyl správně dimenzován poměr mezi rezistivitou a tloušťkou vrstvy, mohlo by dojít k tomu, že pokud bude vrstva slabá, tak se v rotoru začnou vytvářet vířivé ztráty. Naopak, při silné vrstvě by se zvýšila její rezistivita, následkem toho by byl větší skluz a nedocházelo by k účinné produkci momentu, jako u vysoce vodivého rotoru.



Obr. 3. 1 Plný rotor s vodivou vrstvou na povrchu [2]

3.2 Vyfrézování axiálních drážek do rotoru

Z dalších možností úprav rotorů, pro zlepšení jejich výkonu, je vyfrézování axiálních drážek do rotoru. Jednotlivé zuby rotoru tak tvoří cestu pro proudy, které prochází skrze celý rotor. Oproti plnému rotoru, zde dochází k lepšímu pronikání magnetického toku a proudu do rotoru. Nedochází tak k přesycování materiálu u povrchu rotoru a snižují se vířivé ztráty. Podél drážek prochází tok směrem k druhému magnetickému pólu a tím by se mělo dosáhnout výrazného zvýšení výkonu. Nevýhodou vyfrézování těchto drážek je snížení mechanické pevnosti rotoru. K nejvyššímu mechanickému namáhání dochází v ose válce nebo u kořenů zubů. Frézování drážek způsobuje ztráty třením na povrchu, kde jsou drážky otevřené. Náklady spojené s výrobou těchto rotorů jsou znatelně vyšší. [2]

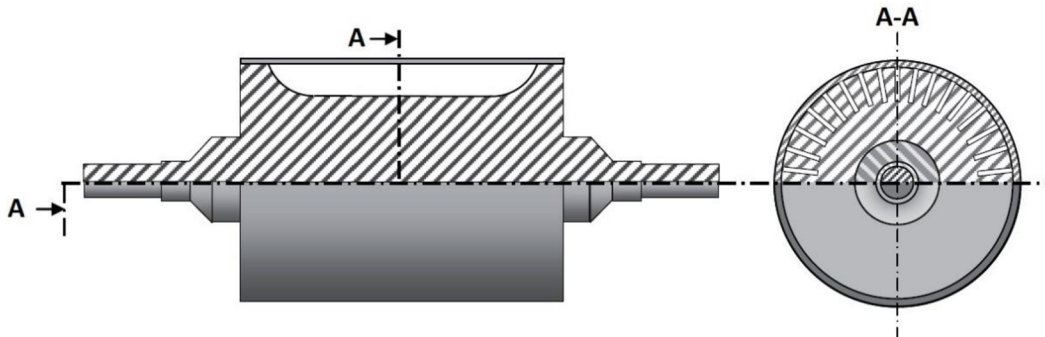


Obr. 3. 2 Vyfrézované axiální drážky do plného rotoru [2]

3.3 Vyfrézování axiálních drážek do plného rotoru s povrchovou vrstvou

Tato konstrukce spojuje předešlé dva návrhy. U této konstrukce dochází k přivaření povrchové vodivé vrstvy ke každému zubu plného rotoru. Tímto postupem se výrazně posiluje konstrukce plného rotoru s drážkami a dále jsou splněny požadavky na mechanickou pevnost při vysokých obvodových rychlostech. Dále

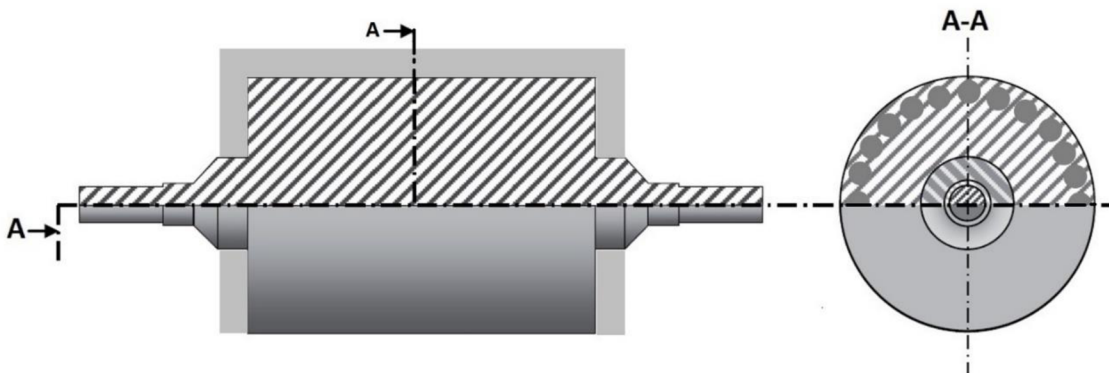
tato konstrukce snižuje ztráty třením vzduchu, díky tomu, že je povrch rotoru uzavřen.



Obr. 3. 3 Vyfrézované axiální drážky do plného rotoru s povrchovou úpravou rotoru [2]

3.4 Plný rotor s měděnou klecí

Další možností konstrukce plného rotoru je založení měděných tyčí do vyvrtaných otvorů v plném rotoru a jejich spojení spojovacími kruhy nakrátko. Při návrhu se musí správně zvolit počet a rozměry tyčí s ohledem na sycení klínu mezi dvěma sousedními tyčemi rotoru. U rotoru s měděnou klecí již nedochází ke ztrátám třením, jako tomu bylo u rotoru s vyfrézovanými axiálními drážkami, protože povrch rotoru je hladký, bez drážek. [9]



Obr. 3. 4 Plný rotor s měděnou klecí [9]

3.5 Ekvivalentní vodivost

Dvourozměrný model při výpočtu pracuje pouze se složkou proudové hustoty v ose z. Je proto potřeba model upravit tak, aby zahrnoval i vliv konečné délky rotoru. Aby se předešlo této chybě ve výpočtu, provede se podle postupu uvedeném

v literatuře [2], přepočít vodivosti materiálu v rotoru pomocí korekčního faktoru. Literatura [2] uvádí výpočet činitele k podle Russella

$$k_{Russel} = 1 - \frac{2 \cdot \tau_p}{\pi \cdot l_{fe}} \cdot \tanh\left(\frac{\pi \cdot l_{Fe}}{2 \cdot \tau_p}\right) \quad (3.1)$$

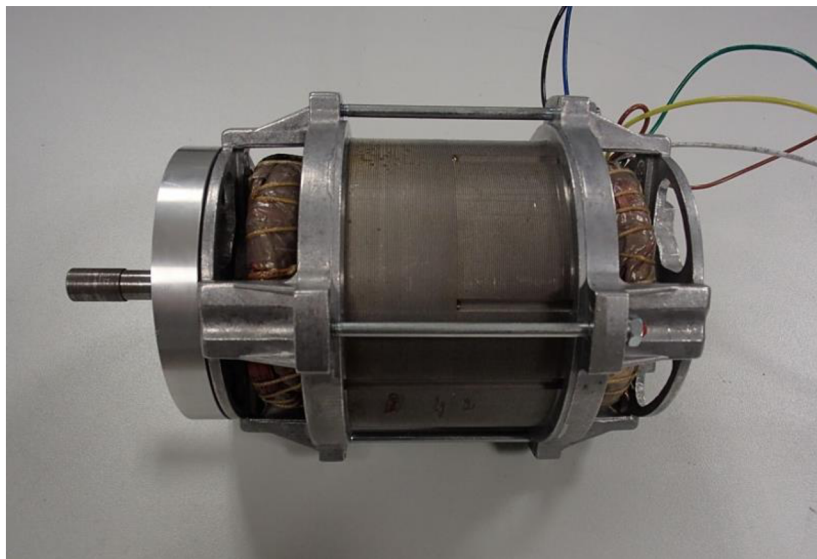
Přepočít vodivosti

$$\sigma_{er} = \sigma \cdot k_{Russel} \quad (3.2)$$

4 LABORATORNÍ VZOREK MOTORU S PLNÝM ROTOREM

Pro diplomovou práci byl využit asynchronní motor s plným rotorem, Obr. 4. 1, od firmy ATAS spol. s r.o. Tento motor však není firmou vyráběn v sériích, ale jde pouze o zkušební vzorek určený pro analyzování vlastností motoru.

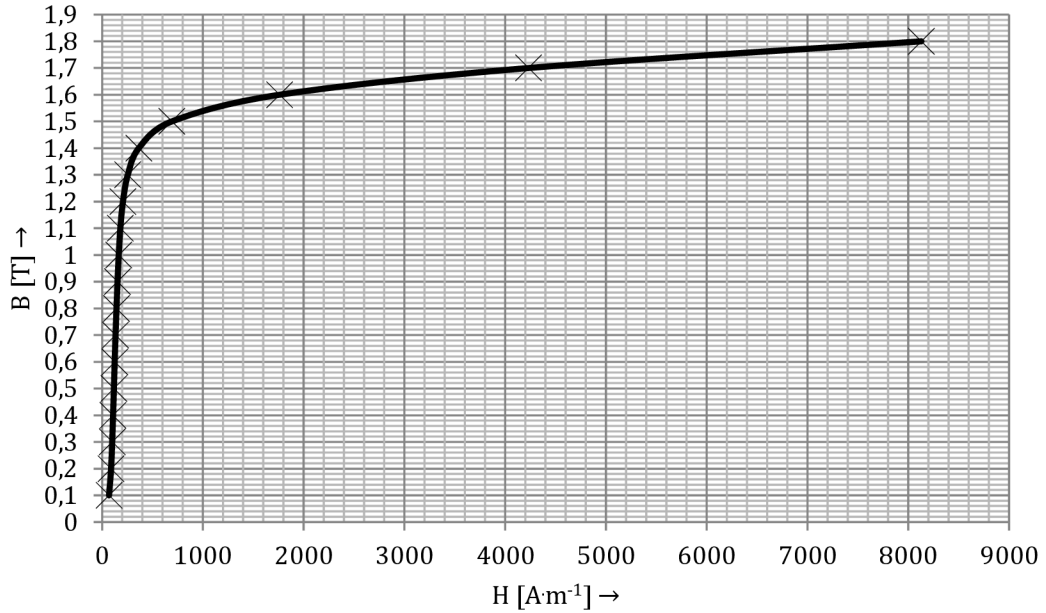
Analytickým návrhem tohoto motoru se zabýval pan Belica [7], z jehož práce byly převzaty především rozměry magnetického obvodu statoru a rotoru, pro vytvoření modelu v programu Maxwell. Návrh motoru v práci pana Belici byl proveden na jmenovitý výkon 100 W a otáčky 2650 min⁻¹. Jedním z výsledků návrhu byl jmenovitý proud motoru 0,344 A.



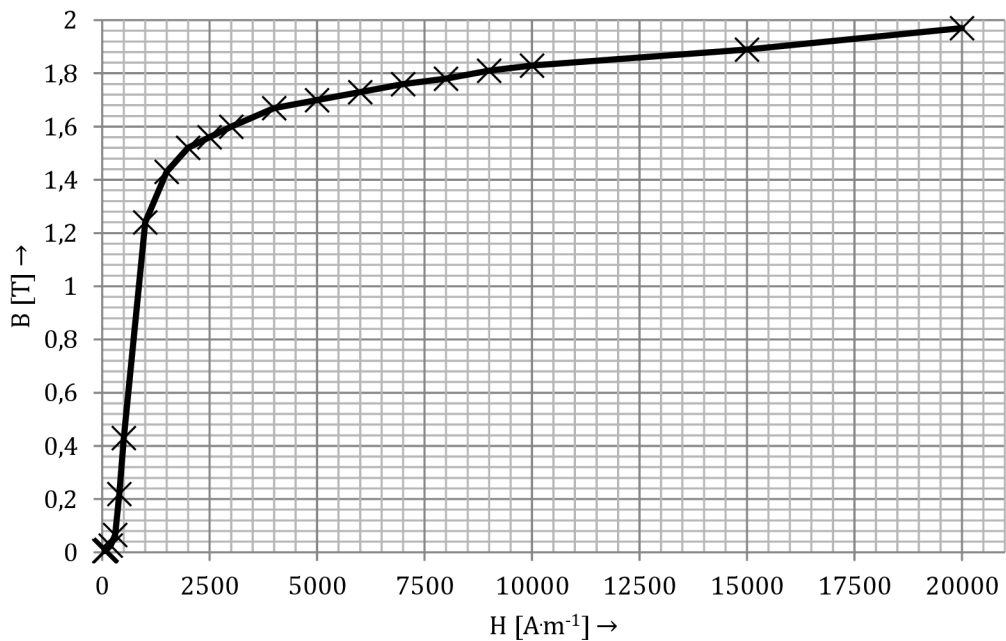
Obr. 4. 1 Vzorek motoru

Magnetický obvod statoru je vyroben z plechů M700-50A, jejichž magnetizační charakteristika je na Obr. 4. 2. Ocelový válec rotoru je vyroben z materiálu 11373, jehož magnetizační charakteristika je na Obr. 4. 3.

Tyto magnetizační charakteristiky materiálů byly nadefinovány pro magnetické obvody statoru a rotoru při vytváření modelu motoru v programu Maxwell.



Obr. 4. 2 Magnetizační charakteristika plechů M700-50A [6]



Obr. 4. 3 Magnetizační charakteristika ocele 11373 [8]

5 PROVEDENÁ MĚŘENÍ NA MOTORU

Vzorek motoru z kapitoly 4 byl změřen v laboratoři a byla provedena následující měření: měření momentové charakteristiky, měření nakrátko a naprázdno a také měření odporů vinutí. Uspořádání pracoviště pro měření je na Obr. 5. 1.



Obr. 5. 1 Pracoviště pro měření motoru

Nejdříve se změřily odpory vinutí na nezahřátém motoru. Vinutí motoru je však zapojeno do hvězdy, proto naměřené odpory byly změřeny jako odpory dvou vinutí v sérii. Musí se tedy přepočítat na odpor jednoho vinutí, který bude polovinou z naměřeného odporu. Naměřené a vypočtené odpory vinutí uvádí Tab. 5. 1.

Tab. 5. 1 Naměřené hodnoty odporů vinutí motoru ve studeném stavu

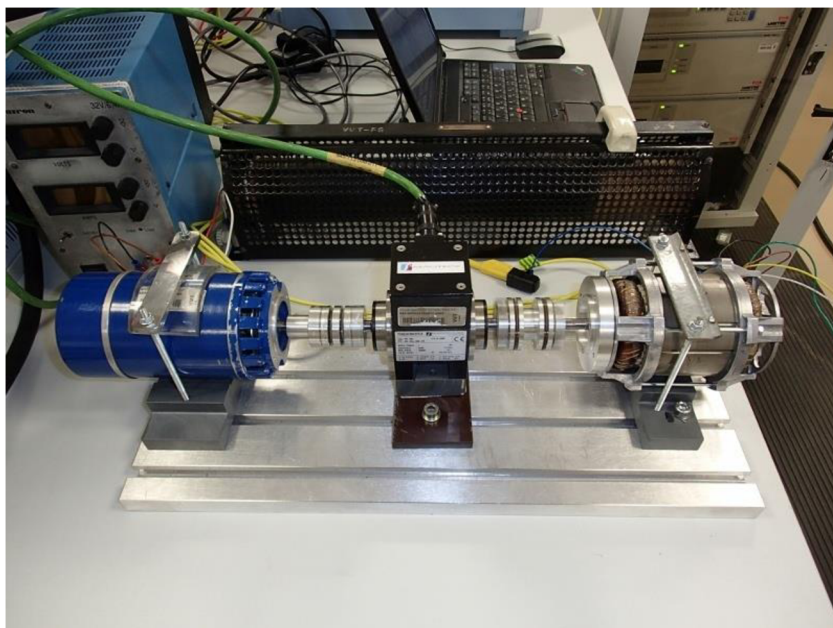
Vinutí	R	Vinutí	R/2	R ₀
	[Ω]		[Ω]	
U1-V1	128,11	U1	64,06	63,82
V1-W1	126,50	V1	63,25	
W1-U1	128,31	W1	64,16	

Zaznamenala se i teplota v laboratoři $\vartheta_0 = 21,3 \text{ }^\circ\text{C}$, která poslouží pro výpočet oteplení vinutí.

5.1 Měření momentové charakteristiky

Momentová charakteristika motoru se měřila se zatížením na hřídeli motoru pomocí dynamometru, viz Obr. 5. 2. V tabulkách níže jsou uvedeny naměřené a vypočtené hodnoty pro tři rozdílné provozní stavy motoru při měření charakteristiky. Nejprve se změřila na nezahřátém motoru při frekvenci $f = 50 \text{ Hz}$, viz Tab. 5. 3. V Tab. 5. 4 jsou uvedeny hodnoty, kdy byl motor měřen při provozní

teplotě při napájecí frekvenci $f = 50 \text{ Hz}$ a na závěr byla zvýšena napájecí frekvence na $f = 60 \text{ Hz}$, naměřené a vypočtené hodnoty viz Tab. 5. 5.



Obr. 5. 2 Sestava pro měření momentové charakteristiky

Po každém měření charakteristik, se změřily odpory vinutí, viz Tab. 5. 2 a následně se vypočetlo oteplení a teplota vinutí.

Tab. 5. 2 Naměřené hodnoty odporů vinutí po zatížení

Číslo měření	Vinutí	R	Vinutí	R/2	R _{prum}	$\Delta\vartheta$	ϑ
		[Ω]		[Ω]			
1	U1-V1	140,11	U1	70,06	69,56	22,5	43,8
	V1-W1	137,72	V1	68,86			
	W1-U1	139,52	W1	69,76			
2	U1-V1	149,21	U1	74,61	74,16	40,5	61,8
	V1-W1	147,02	V1	73,51			
	W1-U1	148,72	W1	74,36			
3	U1-V1	151,08	U1	75,54	75,08	44,1	65,4
	V1-W1	148,71	V1	74,36			
	W1-U1	150,67	W1	75,34			

Výpočet oteplení pro měření číslo 1:

$$\Delta\vartheta = \frac{\frac{R_{prum}}{R_0} - 1}{\alpha} = \frac{\frac{69,56}{63,82} - 1}{4 \cdot 10^{-3}} = 22,5 \text{ } ^{\circ}\text{C} \quad (5.1)$$

kde $\alpha = 4 \cdot 10^{-3} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ je teplotní součinitel mědi

A pro teplotu vinutí:

$$\vartheta = \Delta\vartheta + \vartheta_0 = 22,48 + 21,3 = 43,8 \text{ } ^{\circ}\text{C} \quad (5.2)$$

Tab. 5. 3 Získané hodnoty z měření momentové charakteristiky při f = 50 Hz motoru ve studeném stavu

I_{rms1}	I_{rms2}	I_{rms3}	I_{rms_p}	M	n	P	s	η
[A]	[A]	[A]	[A]	[Nm]	[min ⁻¹]	[W]	[-]	[%]
0,287	0,287	0,291	0,288	0,02	2907	6,697	0,03	15,59
0,297	0,296	0,300	0,298	0,05	2827	14,802	0,06	27,09
0,316	0,314	0,319	0,316	0,10	2674	28,002	0,11	37,74
0,338	0,336	0,341	0,338	0,15	2500	39,270	0,17	41,54
0,359	0,356	0,362	0,359	0,20	2321	48,611	0,23	42,95
0,383	0,380	0,386	0,383	0,25	2114	55,566	0,30	41,58
0,408	0,404	0,410	0,407	0,30	1896	59,565	0,37	38,86
0,433	0,430	0,435	0,433	0,36	1635	60,782	0,46	35,04
0,458	0,454	0,459	0,457	0,40	1397	59,103	0,53	30,73

Tab. 5. 4 Získané hodnoty z měření momentové charakteristiky při f = 50 Hz při zahřátém motoru

I_{rms1}	I_{rms2}	I_{rms3}	I_{rms_p}	M	n	P	s	η
[A]	[A]	[A]	[A]	[Nm]	[min ⁻¹]	[W]	[-]	[%]
0,285	0,284	0,288	0,286	0,019	2905	5,78	0,03	13,47
0,297	0,295	0,300	0,297	0,052	2809	15,30	0,06	27,16
0,308	0,306	0,310	0,308	0,08	2717	22,76	0,09	33,48
0,320	0,318	0,322	0,320	0,11	2616	30,13	0,13	37,76
0,332	0,330	0,334	0,332	0,139	2512	36,56	0,16	40,03
0,345	0,343	0,348	0,345	0,169	2399	42,46	0,20	41,03
0,358	0,355	0,360	0,358	0,201	2283	48,05	0,24	41,83
0,372	0,369	0,374	0,372	0,231	2153	52,08	0,28	40,97
0,386	0,383	0,388	0,386	0,26	2021	55,03	0,33	39,61
0,400	0,397	0,401	0,399	0,29	1888	57,34	0,37	38,24
0,418	0,414	0,419	0,417	0,322	1711	57,69	0,43	35,11
0,426	0,422	0,427	0,425	0,35	1628	59,67	0,46	34,97
0,445	0,441	0,445	0,444	0,383	1417	56,83	0,53	30,61
0,461	0,457	0,461	0,460	0,415	1225	53,24	0,59	26,87

Příklad výpočtu pro 1. řádek z Tab. 5. 4:

Výkon motoru

$$P = M \cdot 2\pi \cdot \frac{n}{60} = 0,019 \cdot 2\pi \cdot \frac{2905}{60} = 5,78 \text{ W} \quad (5.3)$$

Skluz

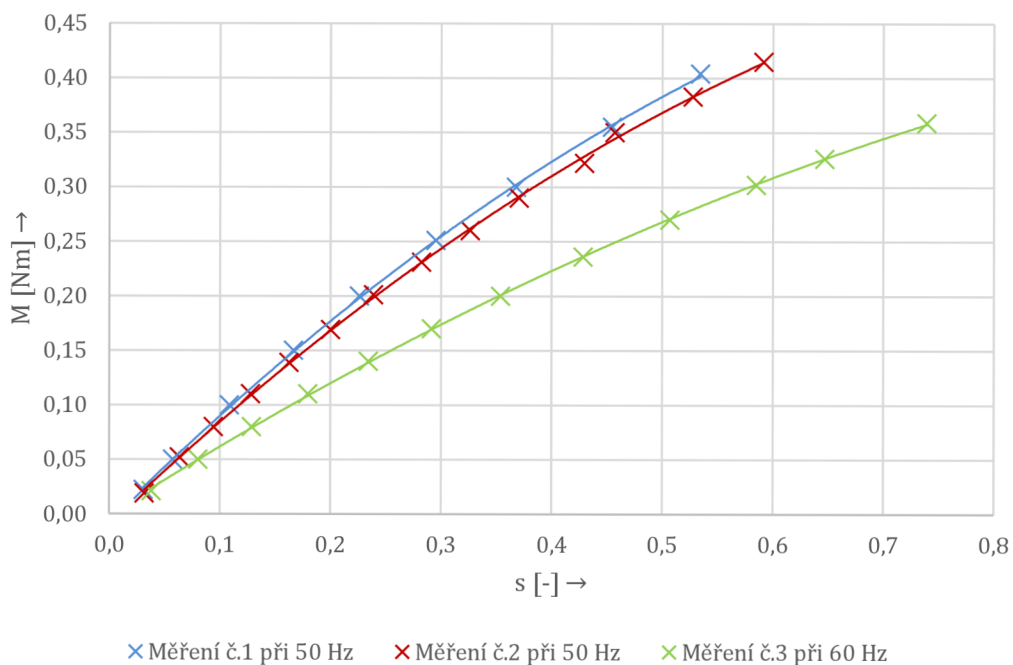
$$s = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{3000 - 2905}{3000} = 0,03 \quad (5.4)$$

Účinnost

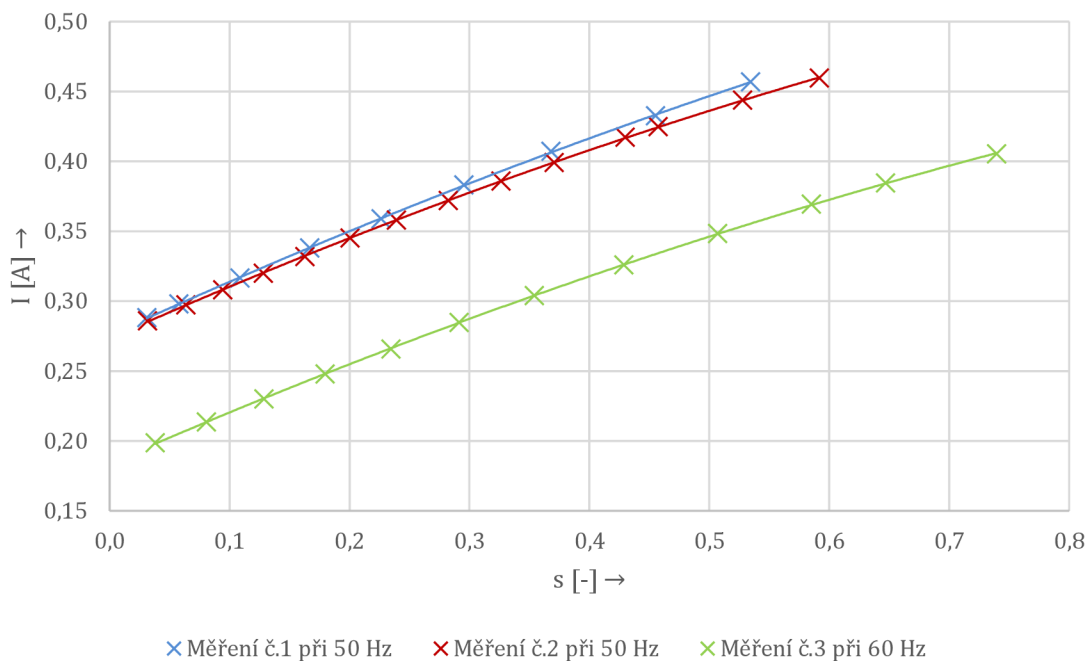
$$\eta = \frac{P}{P_1} \cdot 100 = \frac{5,78}{42,92} \cdot 100 = 13,47 \% \quad (5.5)$$

Tab. 5.5 Získané hodnoty z měření momentové charakteristiky při $f = 60$ Hz

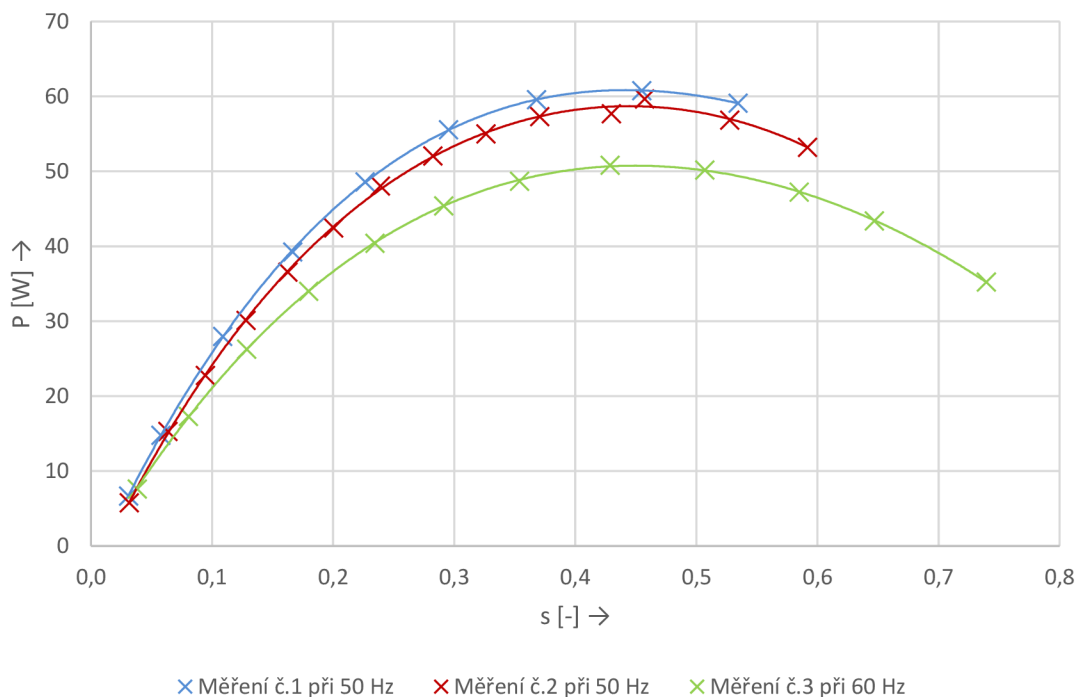
I_{rms1}	I_{rms2}	I_{rms3}	I_{rms_p}	M	n	P	s	η
[A]	[A]	[A]	[A]	[Nm]	[min ⁻¹]	[W]	[-]	[%]
0,198	0,197	0,201	0,199	0,021	3463	7,62	0,04	23,0
0,213	0,211	0,216	0,213	0,05	3310	17,33	0,08	36,7
0,230	0,228	0,232	0,230	0,08	3137	26,28	0,13	42,6
0,248	0,245	0,250	0,248	0,11	2953	34,02	0,18	44,8
0,266	0,263	0,268	0,266	0,14	2756	40,41	0,23	45,0
0,285	0,282	0,287	0,285	0,17	2551	45,41	0,29	43,7
0,304	0,301	0,306	0,304	0,2	2326	48,72	0,35	41,3
0,327	0,323	0,328	0,326	0,236	2057	50,84	0,43	38,1
0,349	0,345	0,350	0,348	0,27	1775	50,19	0,51	33,7
0,370	0,367	0,371	0,369	0,302	1494	47,25	0,59	28,9
0,386	0,382	0,386	0,384	0,326	1271	43,39	0,65	25,0
0,406	0,402	0,407	0,405	0,359	938	35,26	0,74	18,8



Obr. 5.3 Momentová charakteristika



Obr. 5.4 Závislost statorového proudu na skluzu



Obr. 5.5 Závislost výkonu motoru na skluzu

5.2 Měření nakrátko

Při měření motoru se musí hřídel motoru mechanicky zablokovat, aby nemohlo dojít k otáčení rotoru. Následně je motor měřen opět při odlišných provozních stavech,

převážně se jedná o zvýšení odporu vinutí po předchozím zatěžování, viz Tab. 5. 6. Ale také pro zvýšenou hodnotu napájecí frekvence $f = 60 \text{ Hz}$.

Tab. 5. 6 Hodnoty odporů při měření motoru nakrátko

Číslo měření	Vinutí	R	Vinutí	R/2	R _{prum}	Δθ	θ
		[Ω]		[Ω]			
1	U1-V1	145,03	U1	72,52	73	35,7	57
	V1-W1	146,47	V1	73,24			
	W1-U1	146,48	W1	73,24			
2	U1-V1	149,05	U1	74,53	74,02	39,7	61,0
	V1-W1	146,84	V1	73,42			
	W1-U1	148,21	W1	74,11			
3	U1-V1	150,35	U1	75,18	74,81	42,8	64,1
	V1-W1	148,31	V1	74,16			
	W1-U1	150,22	W1	75,11			

Tab. 5. 7 Naměřené hodnoty

č. měř.	U _{rms_p}	I _{rms1}	I _{rms2}	I _{rms3}	I _{rms_p}	P	S	Q	cos φ	M
	[V]	[A]	[A]	[A]	[A]	[W]	[VA]	[Var]	[-]	[Nm]
1	399,2	0,587	0,583	0,588	0,586	282,64	405,33	290,63	0,70	0,651
2	399,2	0,575	0,571	0,576	0,574	276,82	396,81	284,4	0,70	0,634
3	399,2	0,470	0,466	0,471	0,469	228,33	324,30	230,33	0,70	0,461

Poznámka k Tab. 5. 7:

Č. měření 1: Při napájecí frekvenci $f = 50 \text{ Hz}$ odpovídající číslu měření 1 z Tab. 5. 6

Č. měření 2: Při napájecí frekvenci $f = 50 \text{ Hz}$ odpovídající číslu měření 2 z Tab. 5. 6

Č. měření 3: Při napájecí frekvenci $f = 60 \text{ Hz}$ odpovídající číslu měření 3 z Tab. 5. 6

5.3 Měření naprázdno

Na závěr proběhlo měření naprázdno, při napájecí frekvenci $f = 50 \text{ Hz}$ a $f = 60 \text{ Hz}$.

Tab. 5. 8 Hodnoty odporů vinutí při měření naprázdno

Číslo měření	Vinutí	R	Vinutí	R/2	R _{prum}	Δθ	θ
		[Ω]		[Ω]			
1	U1-V1	148,63	U1	74,32	74,05	39,8	61,1
	V1-W1	147,05	V1	73,53			
	W1-U1	148,62	W1	74,31			
2	U1-V1	148,0	U1	74,0	73,79	38,8	60,1
	V1-W1	146,05	V1	73,03			
	W1-U1	148,68	W1	74,34			

Tab. 5. 9 Naměřené hodnoty při měření naprázdno při $f = 50$ Hz

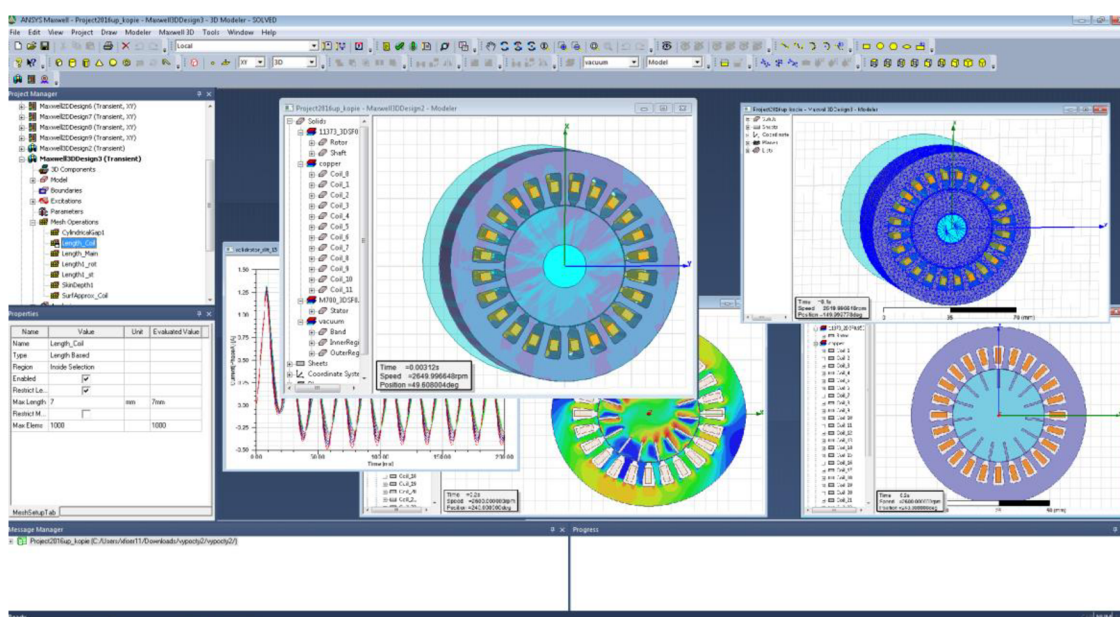
$U_{rms,p}$	I_{rms1}	I_{rms2}	I_{rms3}	$I_{rms,p}$	P	S	Q	$\cos \varphi$
[V]	[A]	[A]	[A]	[A]	[W]	[VA]	[Var]	[-]
434,0	0,344	0,343	0,348	0,345	48,93	259,15	254,73	0,19
399,3	0,279	0,277	0,282	0,280	35,59	193,34	190,18	0,18
364,6	0,227	0,225	0,230	0,227	26,29	143,44	141,08	0,18
329,8	0,186	0,184	0,188	0,186	19,81	106,05	104,21	0,19
295,1	0,154	0,152	0,155	0,154	15,15	78,47	77,01	0,19
260,4	0,130	0,127	0,131	0,129	11,77	58,39	57,19	0,20
225,7	0,110	0,108	0,111	0,110	9,08	42,92	41,94	0,21
191,0	0,092	0,091	0,093	0,092	6,87	30,46	29,67	0,23
156,2	0,076	0,074	0,076	0,076	5,01	20,44	19,82	0,24
121,5	0,060	0,059	0,061	0,060	3,45	12,61	12,13	0,27

Tab. 5. 10 Naměřené hodnoty při měření motoru naprázdno při $f = 60$ Hz

$U_{rms,p}$	I_{rms1}	I_{rms2}	I_{rms3}	$I_{rms,p}$	P	S	Q	$\cos \varphi$
[V]	[A]	[A]	[A]	[A]	[W]	[VA]	[Var]	[-]
433,9	0,226	0,224	0,229	0,226	30,53	170,03	167,34	0,18
399,2	0,191	0,189	0,193	0,191	24,28	132,10	129,88	0,18
364,5	0,163	0,161	0,165	0,163	19,56	102,73	100,86	0,19
329,8	0,141	0,138	0,142	0,141	15,93	80,26	78,66	0,20
295,1	0,123	0,121	0,124	0,123	12,99	62,62	61,25	0,21
260,4	0,107	0,105	0,108	0,107	10,46	48,08	46,92	0,22
225,6	0,092	0,091	0,093	0,092	8,32	35,92	34,94	0,23
190,9	0,078	0,077	0,079	0,078	6,45	25,84	25,02	0,25
156,2	0,065	0,064	0,066	0,065	4,83	17,57	16,90	0,27
121,5	0,052	0,051	0,053	0,052	3,34	10,95	10,43	0,30

6 SIMULACE PLNÉHO ROTORU A JEHO ÚPRAV

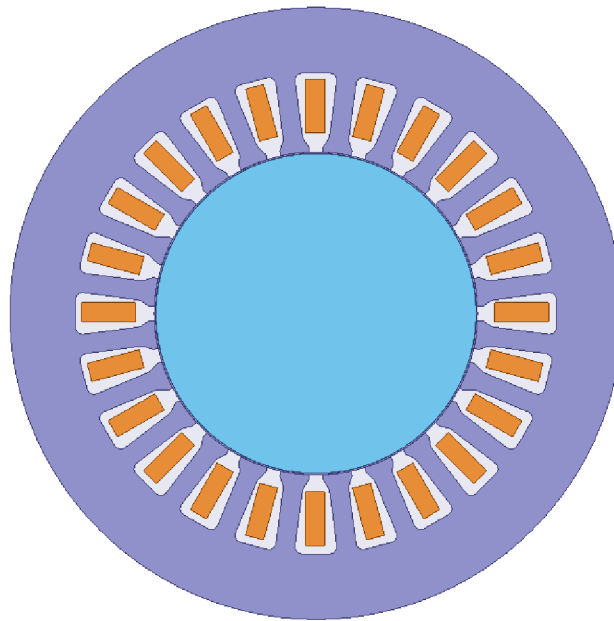
Program Maxwell byl využit k simulacím motoru s plným rotorem i jeho úprav. V tomto programu lze řešit 2D a 3D magnetické a elektrické pole pomocí metody konečných prvků. Prostředí programu Maxwell je na Obr. 6. 1. Před samotnou simulací se musí vytvořit model motoru. V programu je možnost přímo vytvořit geometrii 2D i 3D modelu nebo tyto modely importovat z jiného programu. Dále se nastaví vlastnosti jednotlivých materiálů motoru, definuje vinutí statoru, počáteční podmínky a vytvoří se síť konečných prvků. Následuje proces výpočtu, po jehož provedení lze pracovat se získanými daty.



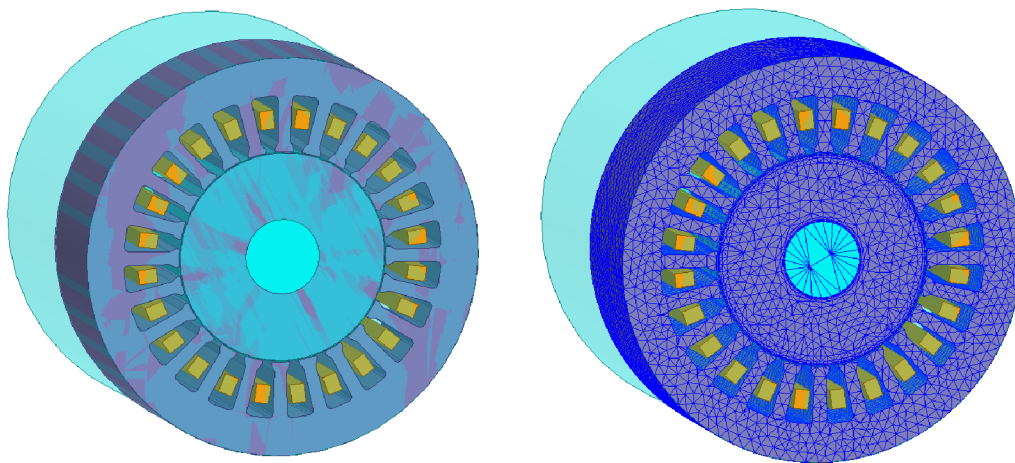
Obr. 6. 1 Prostředí programu Maxwell

V případě všech modelů v této práci byly simulace tranzientní. U 2D modelů bylo vždy simulováno více bodů, ne pouze jmenovitý stav. Kvůli přesnosti výsledku se při definování modelu motoru nastavila jemná mesh a to především na povrchu rotoru. To všechno způsobilo značnou časovou náročnost simulací.

Následující obrázky zobrazují modely vytvořené ve 2D a 3D.



Obr. 6. 2 Model plného rotoru ve 2D



Obr. 6. 3 Model plného rotoru ve 3D/mesh

V rámci diplomové práce proběhla i simulace pouze poloviny 3D modelu, jejíž výpočet se provedl pro otáčky $n = 2750 \text{min}^{-1}$ při napájecí frekvenci $f_s = 50 \text{Hz}$. Při simulaci 3D modelu, obsahovala síť konečných prvků přibližně 300 tisíc elementů.

6.1 Přepočet vodivosti

Aby bylo možné provést plnohodnotný výpočet dvourozměrného modelu, je potřeba přepočíst vodivost materiálu rotoru, podle postupu z kapitoly 3.5.

S uvažováním teploty materiálu rotoru 75°C , bude rezistivita oceli

$$\begin{aligned}\rho_{Fe75} &= \rho_{Fe20} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T) = \\ &= 2,47 \cdot 10^{-7} \cdot (1 + 0,0023 \cdot 75) = 2,896 \cdot 10^{-7} \Omega \cdot m\end{aligned}\quad (6.1)$$

Vodivost materiálu

$$\sigma'_{Fe75} = \frac{1}{\rho_{Fe75}} = \frac{1}{2,896 \cdot 10^{-7}} = 3,453 \cdot 10^6 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}\quad (6.2)$$

Rezistivita mědi podle [10]

$$\begin{aligned}\rho_{Cu75} &= \rho_{Cu20} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T) = \\ &= 1,8 \cdot 10^{-8} \cdot (1 + 0,0039 \cdot 75) = 2,3292 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m\end{aligned}\quad (6.3)$$

Vodivost materiálu

$$\sigma'_{Cu75} = \frac{1}{\rho_{Cu75}} = \frac{1}{2,3292 \cdot 10^{-8}} = 4,29332 \cdot 10^7 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}\quad (6.4)$$

Činitel k_{Russel}

$$k_{Russel} = 1 - \frac{2 \cdot 0,0699}{\pi \cdot 0,06} \cdot \tanh\left(\frac{\pi \cdot 0,06}{2 \cdot 0,0699}\right) = 0,352\quad (6.5)$$

Přepočtená hodnota vodivosti ocele

$$\begin{aligned}\sigma_{Fe75} &= \sigma'_{Fe75} \cdot k_{Russel} = 3,453 \cdot 10^6 \cdot 0,352 = \\ &= 1215583 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}\end{aligned}\quad (6.6)$$

Přepočtená hodnota vodivosti mědi

$$\begin{aligned}\sigma_{Cu75} &= \sigma'_{Cu75} \cdot k_{Russel} = 4,29332 \cdot 10^7 \cdot 0,352 = \\ &= 15112486 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}\end{aligned}\quad (6.7)$$

6.2 Porovnání různých vodivostí

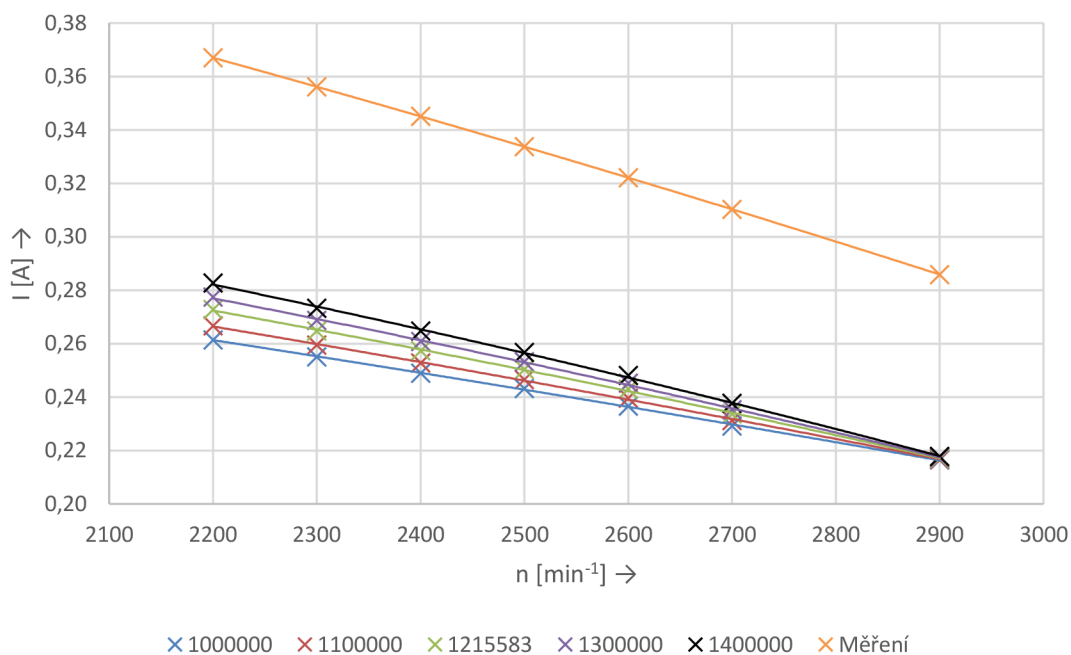
Jak bylo uvedeno výše, je nutné přepočítat vodivost materiálu rotoru, aby mohly být provedeny výpočty. Faktor, který může ovlivnit srovnání naměřených a vypočtených hodnot, bude teplota rotoru. U těchto vysokorychlostních strojů, může dojít ke změně teploty poměrně rychle. Přesnou teplotu materiálu rotoru při měření však neznáme, proto se ve výpočtech i v nastaveních použila teplota 75°C .

Byly zvoleny vodivosti podle Tab. 6. 1, pro které bylo simulacemi dosaženo výsledků uvedených na Obr. 6. 4 a na Obr. 6. 5, kde jsou současně porovnány s výsledky z měření.

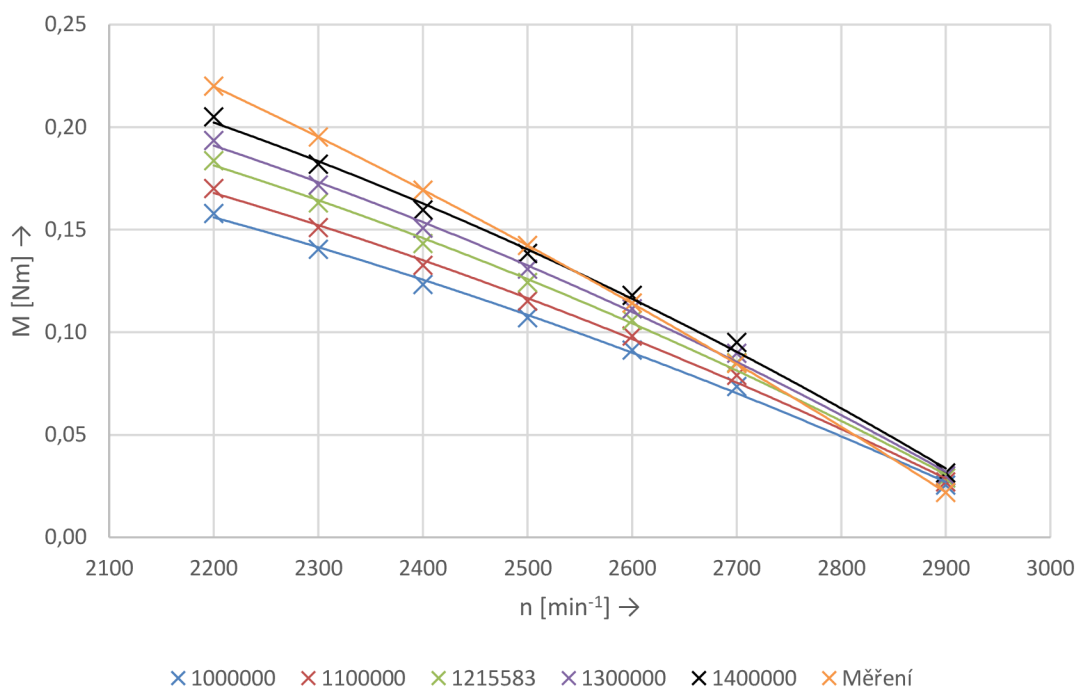
Tab. 6. 1 Zvolené vodivosti pro simulaci

Simulace	Vodivost σ_{Fe}
č. 1	$1000000 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$
č. 2	$1100000 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$
č. 3	$1215583 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$
č. 4	$1300000 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$
č. 5	$1400000 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$

Jak je patrné z Obr. 6. 4 a z Obr. 6. 5, nejvíce se měřeným hodnotám blíží vodivost ze simulací $\sigma_{Fe} = 1400000 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$ avšak vhodnější by bylo použít ještě vyšší hodnotu vodivosti pro dosažení přesnějších výsledků.



Obr. 6. 4 Porovnání vodivostí při závislosti statorového proudu na otáčkách



Obr. 6. 5 Porovnání vodivostí při závislosti momentu na otáčkách

6.3 Výsledky ze simulací

Po dokončení výpočtu se z programu Maxwell převzaly hodnoty proudů a momentů v závislosti na otáčkách motoru. Následně se pro vybrané simulované body vygenerovalo rozložení magnetické indukce a proudové hustoty v rotoru.

6.3.1 Výsledné hodnoty ze simulací

Tab. 6. 2 Výsledné hodnoty ze simulací 2D modelu při f = 50 Hz

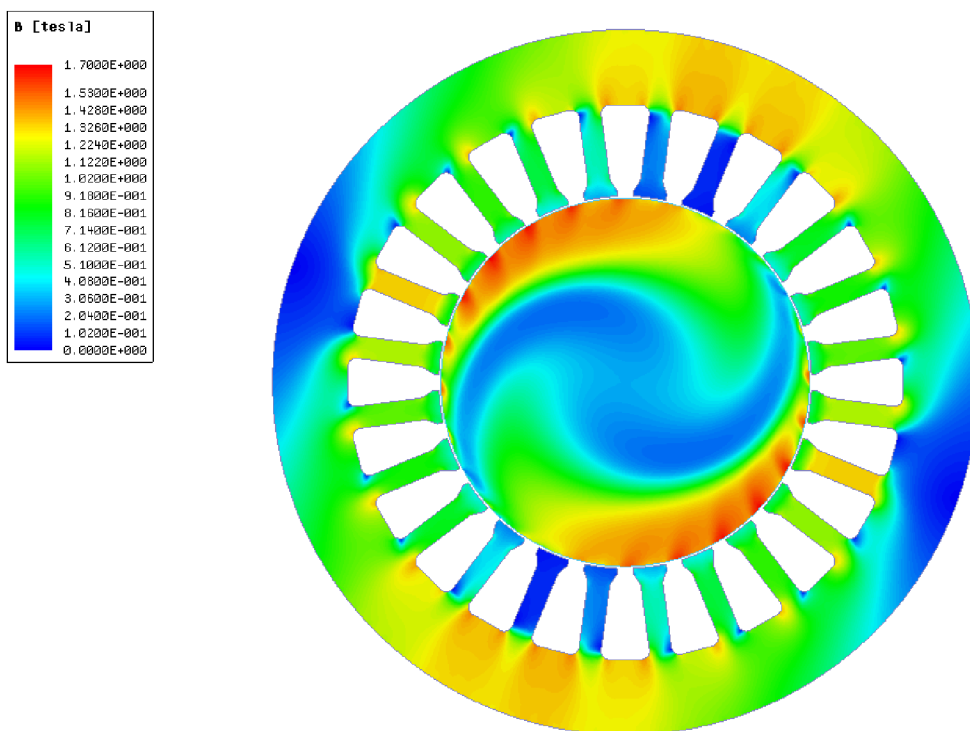
n	I _{rms1}	I _{rms2}	I _{rms3}	I _{2D}	M _{2D}
[min ⁻¹]	[A]	[A]	[A]	[A]	[Nm]
2250	0,278	0,277	0,277	0,277	0,174
2350	0,269	0,269	0,269	0,269	0,154
2450	0,261	0,261	0,261	0,261	0,133
2550	0,254	0,253	0,254	0,254	0,112
2650	0,246	0,246	0,246	0,246	0,091
2750	0,238	0,238	0,238	0,238	0,070
2850	0,230	0,229	0,230	0,230	0,046
2950	0,225	0,224	0,224	0,224	0,013

Tab. 6. 3 Výsledné hodnoty ze simulací 2D modelu při $f = 60$ Hz

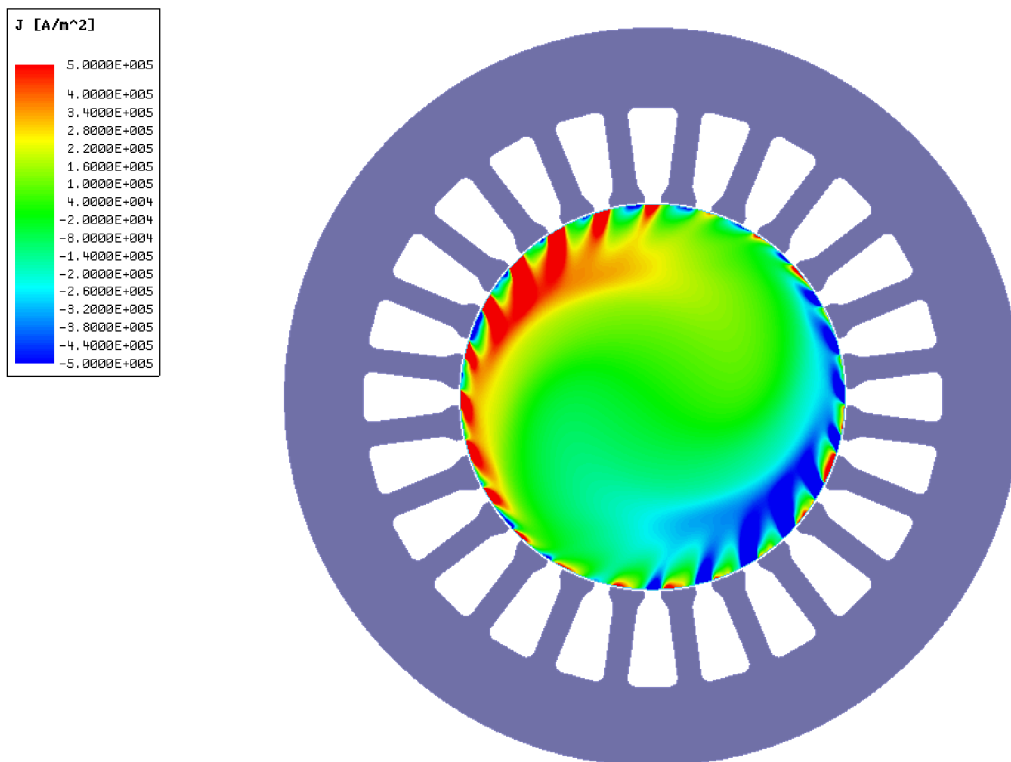
n	I_{rms1}	I_{rms2}	I_{rms3}	I_{2D}	M_{2D}
[min ⁻¹]	[A]	[A]	[A]	[A]	[Nm]
2400	0,248	0,247	0,247	0,247	0,162
2600	0,234	0,234	0,234	0,234	0,139
2800	0,221	0,220	0,220	0,220	0,115

Tab. 6. 4 Výsledné hodnoty ze simulace 3D modelu při $f = 50$ Hz

n	I_{rms1}	I_{rms2}	I_{rms3}	I_{3D}	M_{3D}
[min ⁻¹]	[A]	[A]	[A]	[A]	[Nm]
2750	0,135	0,142	0,145	0,141	0,145



Obr. 6. 6 Rozložení magnetické indukce při $f = 50$ Hz a $n = 2600$ min⁻¹



Obr. 6. 7 Rozložení proudové hustoty v rotoru při $f = 50 \text{ Hz}$ a $n = 2600 \text{ min}^{-1}$

6.4 Porovnání výsledků ze simulací a z měření

Jak ukazuje následující tabulka, výsledky ze simulací jsou odlišné než při měření, především u statorového proudu. To může být způsobeno přepočtem vodivosti materiálu, jak již bylo diskutováno výše, který slouží pro zahrnutí konečné délky motoru do dvourozměrného modelu.

Tab. 6. 5 Porovnání výsledků ze simulace 2D modelu a z měření

n	s	2D model		Měření	
		I_{2D}	M_{2D}	$I_{m\check{e}r}$	$M_{m\check{e}r}$
[min^{-1}]	[-]	[A]	[Nm]	[A]	[Nm]
2250	0,25	0,277	0,174	0,362	0,208
2350	0,22	0,269	0,154	0,351	0,182
2450	0,18	0,261	0,133	0,339	0,156
2550	0,15	0,254	0,112	0,328	0,128
2650	0,12	0,246	0,091	0,316	0,100
2750	0,08	0,238	0,070	0,304	0,070
2850	0,05	0,230	0,046	0,292	0,038
2950	0,02	0,224	0,013	0,280	0,005

Následující tabulka Tab. 6. 6 porovnává výsledky ze simulací a z měření plného rotoru při otáčkách $n = 2750 \text{ min}^{-1}$. Výsledky získané z výpočtů trojrozměrného modelu nejsou zcela přesné. Jak bylo uvedeno výše, je tato nepřesnost způsobená především nastavením nízké hustoty elementů sítě konečných prvků. Z časové náročnosti výpočtu a nedostatečné výpočetní techniky, obsahovala síť pouze 300 tisíc elementů. Výsledky jsou tímto omezením zkresleny.

Tab. 6. 6 Výsledky ze simulací modelů s plným rotorem 2D, 3D a z měření při $f = 50 \text{ Hz}$

		Simulace				Měření	
		2D model		3D model			
n	s	I_{2D}	M_{2D}	I_{3D}	M_{3D}	I_{měř}	M_{měř}
[min ⁻¹]	[-]	[A]	[Nm]	[A]	[Nm]	[A]	[Nm]
2750	0,08	0,238	0,070	0,141	0,145	0,304	0,070

7 ÚPRAVY PLNÉHO ROTORU

V kapitole 2 bylo popsáno, že motory s hladkým pevným rotorem se vyznačují, oproti ostatním běžně používaným motorům s kotvou nakrátko, nižším výstupním výkonem, účinností a účínkem. Je to především z důvodu nízké hloubky průniku toku do rotoru a přesycování materiálu v podvrchových vrstvách rotoru. V následujících kapitolách proto budou provedeny návrhy rotorů, které by měly vést ke zlepšení parametrů stroje.

7.1 Plný rotor s povrchovou vrstvou

Pro vrstvu pokrývající rotor byla zvolena měď s rezistivitou a součinitelem přestupu tepla převzatým z [10]. Tento materiál lze vyrobit v podobě trubky, která se na rotor navleče a po té je k tělesu rotoru přivařena. Technologie výroby vrstvy a jejího spojení k rotoru se však může lišit s ohledem na požadovanou tloušťku vrstvy.

Při návrhu zůstaly rozměry vnitřního průměru statoru a vzduchové mezery konstantní. Byla zvolena šířka vodivé vrstvy $h_{vrstva} = 2 \text{ mm}$ podle [2] a o tuto tloušťku se zmenšil průměr rotoru.

Poloměr rotoru

$$r'_{rotor} = r_{rotor} - h_{vrstva} = 22,25 - 2 = 20,25 \text{ mm} \quad (7.1)$$

Dále byly provedeny dvě studie. V první studii se zmenšila šířka vrstvy ze 2 mm na $h_{vrstva,0,3mm} = 0,3 \text{ mm}$. Druhá studie se naopak zabývala tím, že se k rotoru přičetla povrchová vrstva o šířce $h_{vrstva,0,15mm} = 0,15 \text{ mm}$, čímž došlo ke zmenšení vzduchové mezery.

Alternativním materiálem, který lze využít jako vrstvu na povrchu rotoru, může být nerezová ocel. Tímto materiálem se zabýval ve své disertační práci Tuomo Aho [2].

7.2 Axiální drážky v rotoru

7.2.1 Volba počtu drážek

Počet rotorových drážek se musí volit s ohledem na počet statorových drážek. Důvodem jsou spektra vyšších harmonických, které jsou obsaženy ve vzduchové mezeře a indukují napětí do rotoru. Právě tyto vyšší harmonické společně s proudy rotoru mohou mít negativní vliv na mechanické vlastnosti motoru, pokud nebude zvolen vhodný poměr mezi statorovými a rotorovými drážkami. V závislosti na tomto poměru se projeví asynchronní a synchronní momenty, a mohou vzniknout také vibrace při provozu motoru.

Vhodný počet drážek byl volen podle literatury [8]. Zde se uvádí pro 24 statorových drážek, pro dvoupólový motor a při uvažování nenatočených drážek na rotoru, počet drážek 15 nebo 17. Tento počet drážek se volí převážně pro motory o malém výkonu. [8]

7.2.2 Volba šířky drážky

Byla zvolena šířka drážky $b_{drážky} = 1 \text{ mm}$ s ohledem na magnetické pole v rotoru. Z výrobního hlediska by bylo vhodnější zvolit větší šířku, ale motor se nebude vyrábět, tento návrh slouží pouze pro simulace. Tvar drážek byl zvolen jako obdélníkový.

7.2.3 Volba hloubky drážky

Volba hloubky drážek rotoru je omezena nasycením materiálu rotoru mezi drážkami. Jestliže tato hloubka drážky bude zasahovat hluboko do rotoru, může dojít k tomu, že materiál mezi drážkami bude vysoce nasycený a sníží se průchod toku zuby rotoru. Zřetel se musí brát také na mechanickou pevnost rotoru, která se snižuje se zvyšující se hloubkou drážky. Podle literatury [2] je vhodné volit hloubku drážek asi 40 % až 50 % z poloměru rotoru, aby byla dodržena omezení výše uvedená.

Výpočet hloubky drážek

$$h_{drážky} = r_{rotor} \cdot 0,4 = 22,25 \cdot 0,4 = 8,9 \text{ mm} \quad (7.2)$$

zaokrouhleno na $h_{drážky} = 9 \text{ mm}$

7.3 Axiální drážky s povrchovou vrstvou

Vše už bylo popsáno v kapitole 3.1. Zde se dá ještě poznamenat, že je-li rotor pokryt vrstvou, tak se výrazně posiluje konstrukce plného rotoru s drážkami a jsou splněny požadavky na mechanickou pevnost při vysokých obvodových rychlostech. Tato konstrukce také snižuje ztráty třením vzduchu, díky tomu, že je povrch rotoru uzavřen.

Vnitřní průměr statoru a vzduchová mezera zůstaly nezměněny. Šířka vodivé vrstvy byla zvolena $h_{vrstva} = 2 \text{ mm}$ podle [2] a o tuto šířku se zmenšil průměr rotoru. Tím se zmenšila i hloubka drážek rotoru.

Poloměr rotoru

$$r'_{rotor} = r_{rotor} - h_{vrstva} = 22,25 - 2 = 20,25 \text{ mm} \quad (7.3)$$

Hloubka drážky

$$h'_{drážky} = h_{drážky} - 2 = 9 - 2 = 7 \text{ mm} \quad (7.4)$$

U této úpravy rotoru byla také provedena studie, jako v kapitole 7.1. Zde jsou pouze uvedené rozměry pro danou studii.

Tab. 7. 1 Rozměry úprav rotoru a vrstvy

Vrstva [mm]	Poloměr rotoru [mm]	Hloubka drážek [mm]	Vzduchová mezera [mm]
0,3	21,95	8,7	0,25
0,15	22,25	9	0,1

7.4 Plný rotor s klecí z mědi

Při návrhu bylo postupováno podle literatury [8]. Počet tyčí klece rotoru byl volen stejně, jako počet drážek, uvedených v kapitole 7.2.1. Parametry rotoru byly převzaty od Belici [7]. Dále bude uveden návrh pro zvolených 15 tyčí.

7.4.1 Návrh klece rotoru

Výpočet drážkové rozteče

$$t_{d_2} = \frac{\pi \cdot D_2}{Q_2} = \frac{\pi \cdot 44,5}{15} = 9,32 \text{ mm} \quad (7.5)$$

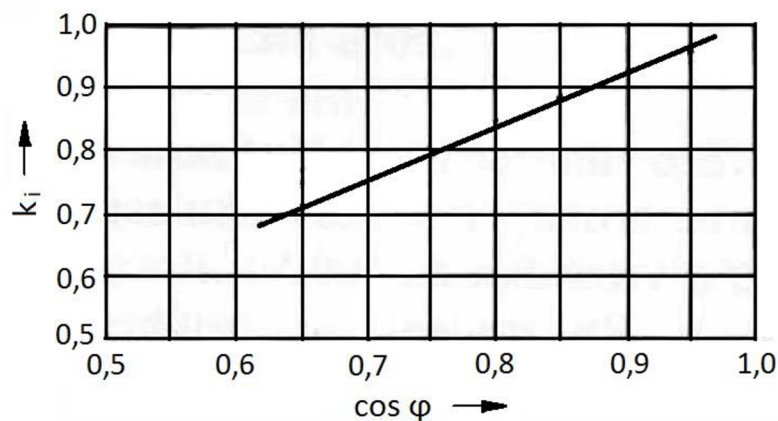
Činitel přepočtu proudů

$$p_i = \frac{2 \cdot m_1 \cdot N_1 \cdot k_{v1}}{Q_2} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 700 \cdot 0,96}{15} = 268,8 \quad (7.6)$$

Určení předběžného proudu v tyči

$$I_2 = k_i \cdot I_1 \cdot p_i = 0,77 \cdot 0,344 \cdot 268,8 = 71,2 \text{ A} \quad (7.7)$$

Činitel $k_i = 0,77$ odečten z Obr. 7. 1 pro $\cos \varphi = 0,7$



Obr. 7. 1 Činitel k_i v závislosti na $\cos \varphi$ [8]

Efektivní průřez tyče klece rotoru

$$S_t = \frac{I_2}{J_2} = \frac{71,2}{7,5 \cdot 10^6} = 9,49 \text{ mm}^2 \quad (7.8)$$

Průměr tyče pak

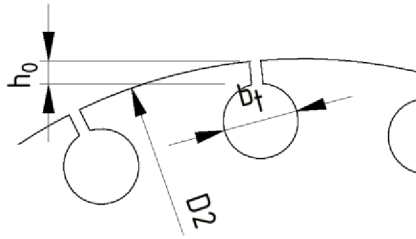
$$b_t = \sqrt{\frac{4 \cdot S_t}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 9,49}{\pi}} = 3,476 \text{ mm} \quad (7.9)$$

hustota proudu zvolena $J_2 = 7,5 \cdot 10^6 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$ z literatury [8], pro rotorové vinutí z měděných tyčí

V nejužším místě je šířka zubu [11]

$$\begin{aligned} b_{z2} &= \frac{\pi \cdot \left[D_2 - 2 \cdot \left(h_0 + \frac{b_t}{2} \right) \right] - Q_2 \cdot b_t}{Q_2} = \\ &= \frac{\pi \cdot \left[44,5 - 2 \cdot \left(1 + \frac{3,476}{2} \right) \right] - 15 \cdot 3,476}{15} = 4,7 \text{ mm} \end{aligned} \quad (7.10)$$

Zvolena drážka uzavřená, kde $h_0 = 1 \text{ mm}$



Obr. 7. 2 Rozměry drážky rotoru [8]

Indukce v nejužším místě zubu

$$B_{z2} = \frac{B_\delta \cdot t_{d2}}{b_{z2} \cdot k_{Fe}} = \frac{0,55 \cdot 9,22}{4,7 \cdot 1} = 1,08 \text{ T} \quad (7.11)$$

Průřez kruhu nakrátko

$$\Delta = 2 \cdot \sin \frac{\pi \cdot p}{Q_2} = 2 \cdot \sin \frac{\pi \cdot 1}{15} = 0,416 \quad (7.12)$$

Proud v kruhu nakrátko

$$I_{kn} = \frac{I_2}{\Delta} = \frac{71,2}{0,416} = 171,15 \text{ A} \quad (7.13)$$

V kruzích klece se proudová hustota podle [8] volí o 20 % menší, jak v tyčích

$$J_{kn} = 0,8 \cdot J_2 = 0,8 \cdot 7,5 \cdot 10^6 = 6 \cdot 10^6 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2} \quad (7.14)$$

Průřez kruhu nakrátko

$$S_{kn} = \frac{I_{kn}}{J_{kn}} = \frac{171,15}{6 \cdot 10^6} = 28,53 \text{ mm}^2 \quad (7.15)$$

V rotorech s měděnými tyčemi bývá průřez kruhů nakrátko obvykle obdélníkový. Rozměry kruhů nakrátko

$$a_{kn} = 1,2 \cdot 3,476 = 4,17 \text{ mm} \quad (7.16)$$

$$b_{kn} = \frac{S_{kn}}{a_{kn}} = \frac{28,53}{4,17} = 6,84 \text{ mm} \quad (7.17)$$

Tab. 7. 2 Výsledky z výpočtů návrhu klece rotoru

	Počet tyčí	
	15	17
Proud v tyči I_2	71,2 A	62,83 A
Průřez tyče S_t	9,49 mm ²	8,377 mm ²
Průměr tyče b_t	3,476 mm	3,266 mm
Šířka zubu v nejužším místě b_{z2}	4,7mm	3,98 mm
Indukce v nejužším místě zubu B_{z2}	1,08 T	1,27 T
Proud v kruhu nakrátko I_{kn}	171,15 A	170,97 A
Průřez kruhu nakrátko S_{kn}	28,53 mm ²	28,49 mm ²
Rozměr a_{kn}	4,17 mm	3,92 mm
Rozměr b_{kn}	6,84 mm	7,27 mm

7.4.2 Návrh klece pro upravenou vzdálenost h_0

Postup pro návrh klece rotoru, který byl výše proveden, uvažoval s volbou uzavřené drážky s rozměrem $h_0 = 1mm$. Takový rozměr je vhodnější využít, pokud se počítá stroj na vyšší otáčky, při vyšší napájecí frekvenci. Je to hlavně z důvodů mechanických, kdy při velkých rychlostech dochází k silovému namáhání tyčí. Proto se tyče usazují hlouběji do rotoru.

Vzorek konkrétního motoru, na kterém je založena tato práce, je provozován při frekvenci $f = 50 Hz$, nedosahuje tudíž vysokých otáček, a proto lze tyče umístit blíže k okraji rotoru. Byla provedena studie, kdy se zvolila opět uzavřená drážka, zde však s rozměrem $h'_0 = 0,4 mm$.

Výsledky z výpočtů provedených na rotoru s klecí jsou téměř shodné pro obě varianty, jak pro navržených 15 tyčí, tak pro 17 tyčí. Proto se model rotoru navrhne s $h'_0 = 0,4 mm$ pouze pro 15 tyčí. Volba tohoto počtu tyčí je uvažována především z ekonomického hlediska, kde se menší počet projeví na menších nákladech na výrobu klece a vrtání do rotoru.

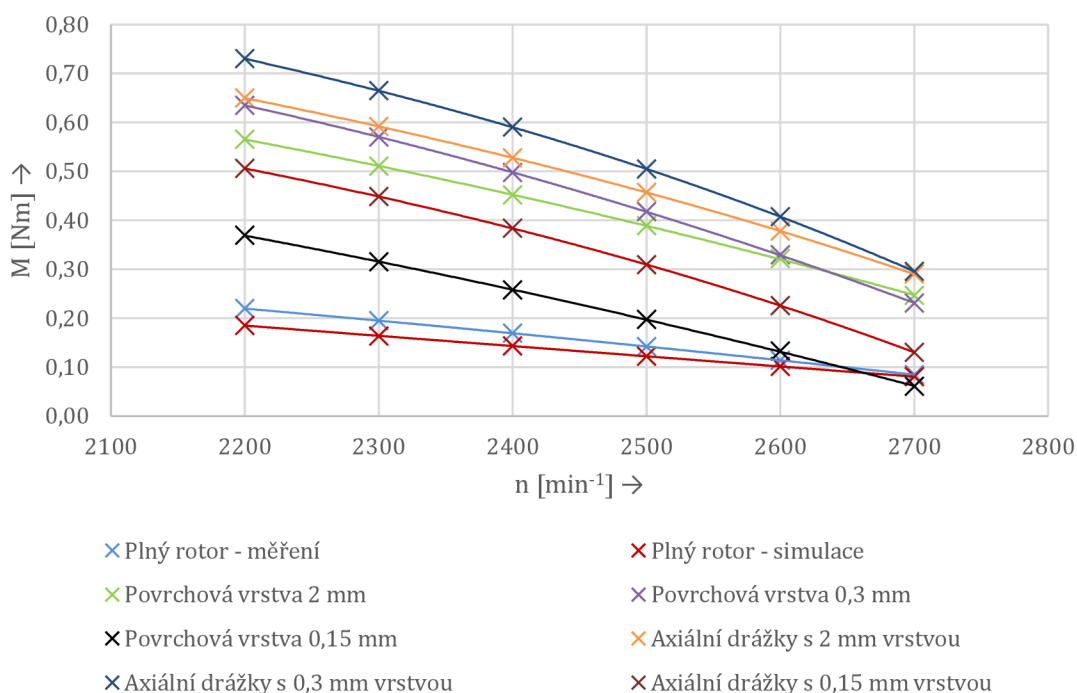
8 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ Z MĚŘENÍ A ZE SIMULACÍ

8.1 Rotor s povrchovou vrstvou a rotor s axiálními drážkami s povrchovou vrstvou

Při návrhu modelu rotoru byla zvolena vrstva se šířkou 2 mm a následně byl vytvořen model motoru. Podle dosažených výsledků je takto zvolená šířka vrstvy nepříliš vhodnou. Tímto provedením tudíž dochází ke zvětšení vzduchové mezery, protože měděná vrstva má nízkou relativní permeabilitu $\mu_r = 0,99991$ a tedy představuje vrstvu vzduchu pro indukční čáry. Zvětšení vzduchové mezery již bylo diskutováno v kapitole 2.4. Zde bylo popsáno, že zvětšením vzduchové mezery dochází k růstu magnetizačního proudu a zvyšují se ztráty ve vinutí statoru. Tedy se zhoršuje i celková účinnost motoru. Navíc vířivé proudy, pod povrchem plného rotoru, zabraňují průchodu toku hlouběji do plného rotoru a tak dochází ke zhoršení momentu, což je patrné z Tab. 8. 1.

Tab. 8. 1 Porovnání výsledků momentu ze simulací plného rotoru, rotoru s povrchovou vrstvou a rotoru s axiálními drážkami a povrchovou vrstvou

n	Plný rotor		Plný rotor s povrchovou vrstvou			Plný rotor s axiálními drážkami a povrchovou vrstvou		
	M _{měř}	M _{sim}	M _{2mm}	M _{0,3mm}	M _{0,15mm}	M _{2mm}	M _{0,3mm}	M _{0,15mm}
[min ⁻¹]	[Nm]	[Nm]	[Nm]	[Nm]	[Nm]	[Nm]	[Nm]	[Nm]
2200	0,220	0,185	0,566	0,635	0,369	0,650	0,730	0,506
2300	0,195	0,164	0,511	0,570	0,315	0,592	0,665	0,449
2400	0,169	0,143	0,452	0,498	0,258	0,528	0,590	0,384
2500	0,142	0,123	0,389	0,418	0,197	0,457	0,505	0,310
2600	0,114	0,101	0,322	0,330	0,133	0,378	0,408	0,226
2700	0,085	0,081	0,247	0,231	0,061	0,290	0,296	0,131



Obr. 8. 1 Porovnání momentů pro jednotlivé úpravy plného rotoru

Takto zvolená šířka vrstvy je vhodná spíše pro motory větších rozměrů. Pro motor, který je předmětem této práce, se provedly dvě studie, které zahrnovaly úpravy šířky vrstvy s ohledem na rozměry motoru.

Ve srovnání se šířkou vrstvy 2 mm, se výpočty provedené u studie s vrstvou šířky 0,3 mm projevilo zmenšením statorového proudu a naopak se zvýšil moment i výkon motoru.

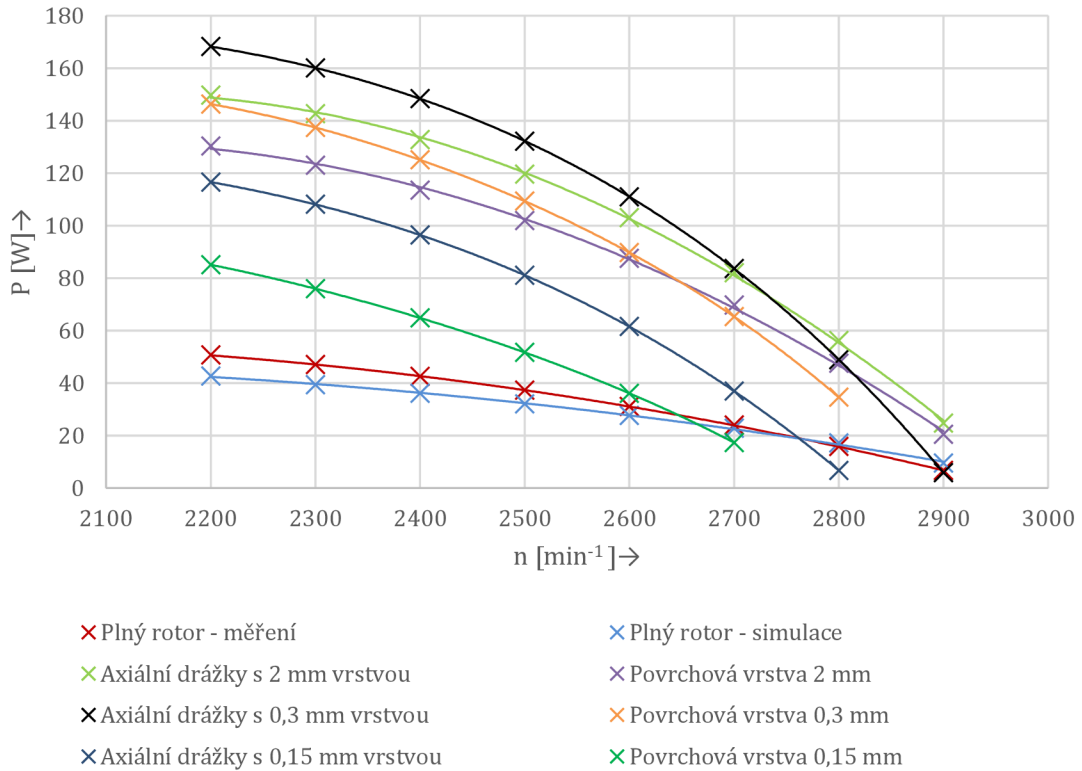
U druhé studie se šířkou vrstvy 0,15 mm tomu tak není. Návrhem se zmenšila vzduchová mezera a přes tenkou vrstvu mědi dochází k sycení v podpovrchových vrstvách rotoru a projevují se tak vířivé ztráty.

Tab. 8. 2 Porovnání výsledků statorového proudu ze simulací plného rotoru, rotoru s povrchovou vrstvou a rotoru s axiálními drážkami a povrchovou vrstvou

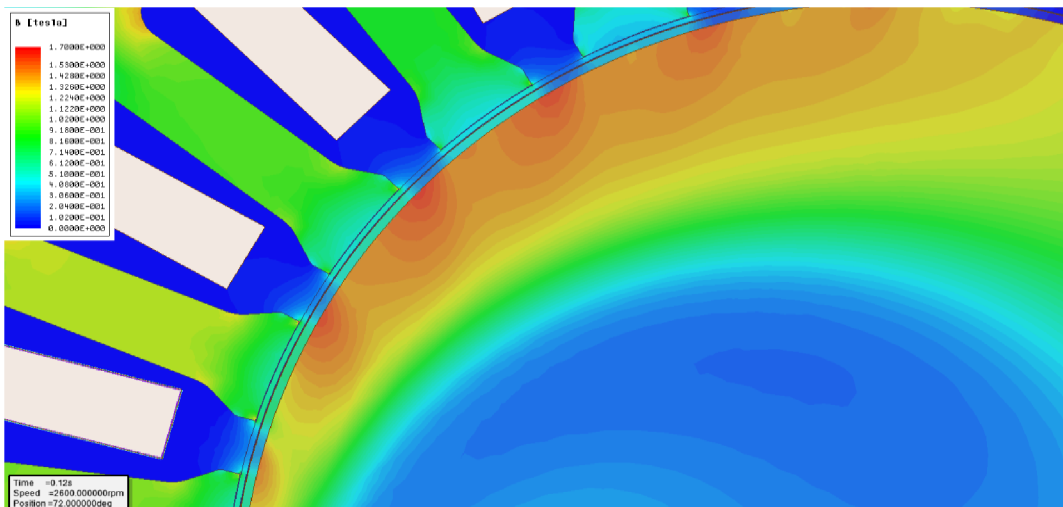
n [min ⁻¹]	Plný rotor		Plný rotor s povrchovou vrstvou			Plný rotor s axiálními drážkami a povrchovou vrstvou		
	I _{měř} [A]	I _{sim} [A]	I _{2mm} [A]	I _{0,3mm} [A]	I _{0,15mm} [A]	I _{2mm} [A]	I _{0,3mm} [A]	I _{0,15mm} [A]
2200	0,3670	0,2825	0,6932	0,5436	0,3673	0,7251	0,6043	0,4461
2300	0,3562	0,2728	0,6795	0,5082	0,3417	0,7044	0,5625	0,4089
2400	0,3451	0,2649	0,6672	0,4737	0,3163	0,6851	0,5205	0,3708
2500	0,3337	0,2576	0,6559	0,4410	0,2913	0,6679	0,4791	0,3322
2600	0,3221	0,2499	0,6459	0,4103	0,2666	0,6535	0,4390	0,2942
2700	0,3103	0,2418	0,6372	0,3814	0,2415	0,6428	0,4022	0,2580

Z důvodů přepočtu vodivosti materiálu, který zajistí náhradu pro výpočet trojrozměrného modelu, mohou být výsledky zkresleny. Může se pouze spekulovat, že se určitým způsobem v měděné vrstvě budou uzavírat vířivé proudy pod statorovými drážkami v ose z. Pro přesnější výsledky by bylo potřeba provést plnohodnotný výpočet trojrozměrného modelu motoru.

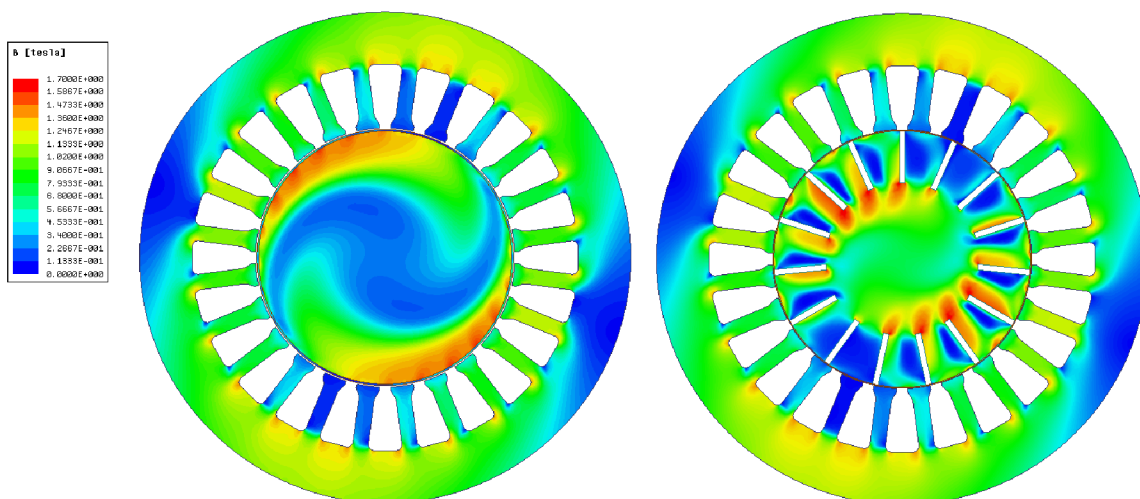
Z časových důvodů nebyl proveden výpočet pro celý rozsah otáček motoru.



Obr. 8. 2 Porovnání průběhů výkonů pro jednotlivé úpravy plného rotoru



Obr. 8. 3 Vliv drážkování statoru vytvářející nesinusový průběh magnetické indukce ve vzduchové mezeře



Obr. 8. 4 Porovnání rozložení magnetické indukce pro rotor s vrstvou 0,3 mm vlevo a axiálními drážkami s vrstvou 0,3 mm vpravo

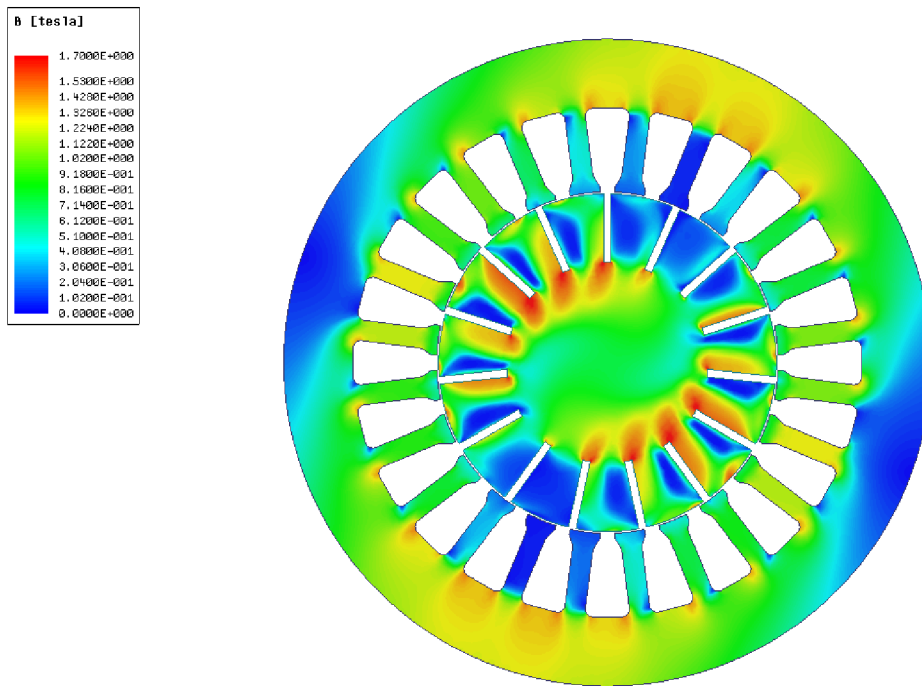
Ze vzájemného porovnání úprav rotorů na Obr. 8. 4 je patrné, že v případě rotoru s vrstvou, se magnetický tok uzavírá pod povrchem rotoru a vzrůstá zde magnetická indukce. V případě rotoru s axiálními drážkami a povrchovou vrstvou však tok prochází skrz zuby rotoru k jádru a tím zlepšuje moment a výkon motoru.

8.2 Rotor s axiálními drážkami

Modely rotoru pro tuto úpravu byly vytvořeny s 15-ti a 17-ti axiálními drážkami. Jak je patrné z Tab. 8. 3, momenty a statorové proudy pro obě úpravy jsou téměř shodné. Z průběhu proudové hustoty, viz Obr. 8. 6, lze vidět, že dochází k průniku proudu a toku hlouběji do jádra skrze jednotlivé zuby rotoru.

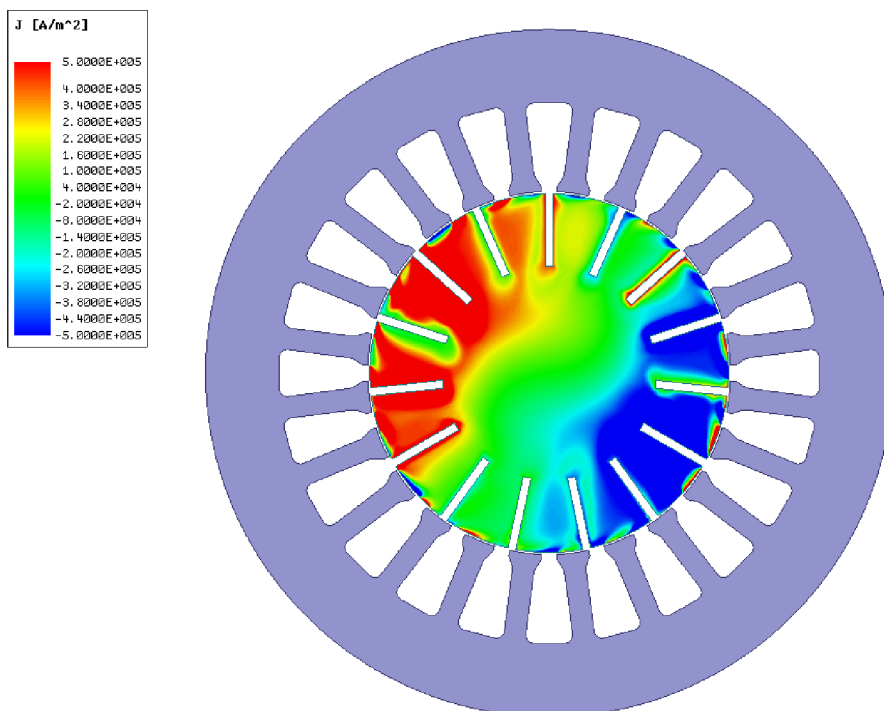
Tab. 8. 3 Porovnání výsledků pro plný rotor a pro rotor s axiálními drážkami

n	Plný rotor				Plný rotor s axiálními drážkami			
	Měření		Simulace		15 drážek		17 drážek	
	M _{měř}	I _{měř}	M _{sim}	I _{sim}	M ₁₅	I ₁₅	M ₁₇	I ₁₇
[min ⁻¹]	[Nm]	[A]	[Nm]	[A]	[Nm]	[A]	[Nm]	[A]
2200	0,220	0,3670	0,185	0,2825	0,376	0,3130	0,378	0,3141
2300	0,195	0,3562	0,164	0,2728	0,337	0,2935	0,338	0,2945
2400	0,169	0,3451	0,143	0,2649	0,299	0,2742	0,299	0,2756
2500	0,142	0,3337	0,123	0,2576	0,259	0,2552	0,257	0,2572
2600	0,114	0,3221	0,101	0,2499	0,213	0,2371	0,212	0,2399
2700	0,085	0,3103	0,081	0,2418	0,164	0,2207	0,161	0,2243
2800	0,054	0,2982	0,059	0,2337	0,109	0,2071	0,106	0,2115
2900	0,022	0,2859	0,031	0,2267	0,051	0,1979	0,049	0,2031



Obr. 8. 5 Rozložení magnetické indukce u rotoru s axiálními drážkami při $n = 2600 \text{ min}^{-1}$

Snižují se vířivé ztráty, protože nedochází již k tak silnému přesycování materiálu u povrchu rotoru. Zvyšuje se moment oproti plnému rotoru při zachování téměř stejného statorového proudu. Z důvodu otevření drážek rotoru budou vznikat ztráty třením, které sníží výkon motoru.



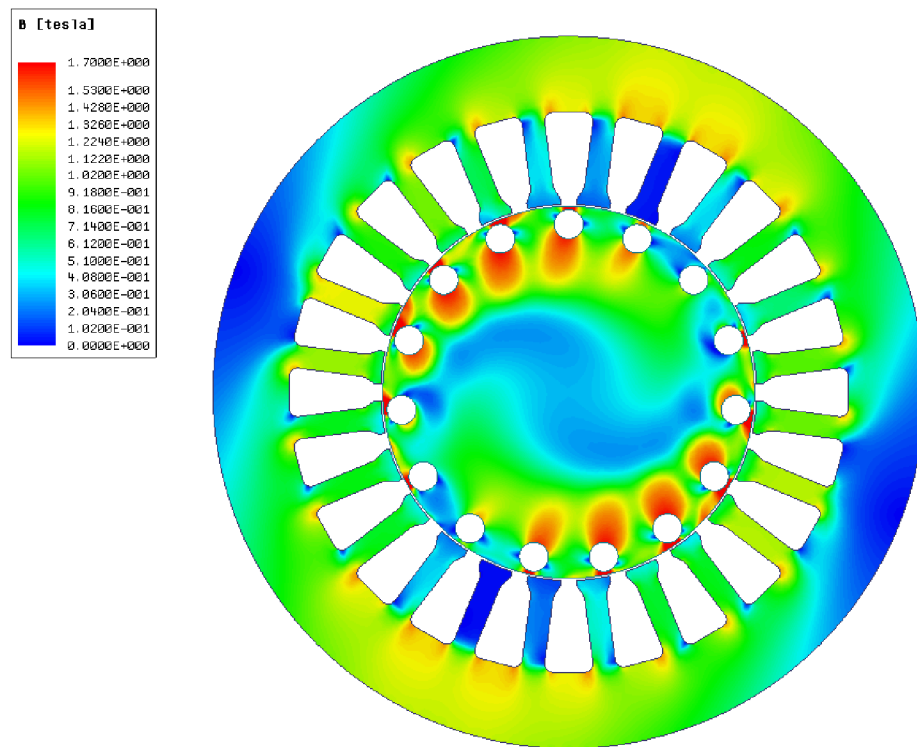
Obr. 8. 6 Rozložení proudové hustoty v rotoru s axiálními drážkami při $n = 2600 \text{ min}^{-1}$

8.3 Rotor s měděnou klecí

U modelu měděné klece s 15-ti tyčemi byly provedeny dvě úpravy vzdálenosti tyčí h_0 a výsledky ze simulací jsou uvedeny v Tab. 8. 4. Úpravou vzdálenosti h_0 , která byla popsána v kapitole 7.4.3., se dosáhlo vyššího momentu při přibližně stejném statorovém proudu.

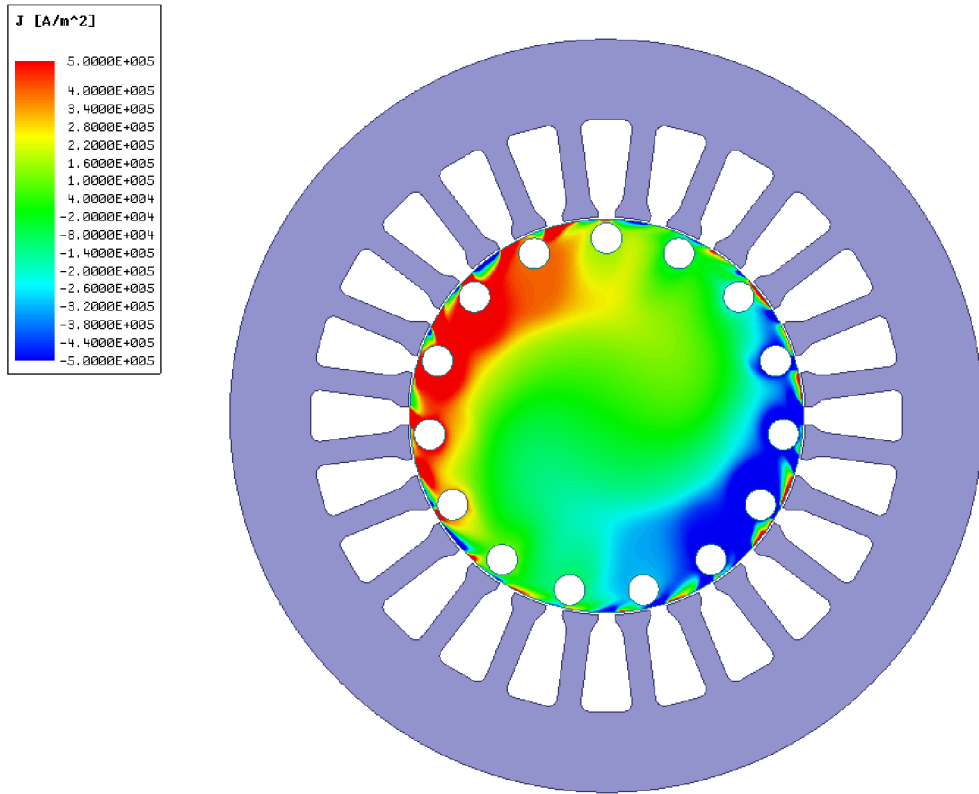
Tab. 8. 4 Porovnání výsledků plného rotoru a plného rotoru s měděnou klecí

n	Plný rotor				Plný rotor s měděnou klecí			
	Měření		Simulace		$h_0 = 1 \text{ mm}$		$h_0 = 0,4 \text{ mm}$	
	$M_{\text{měř}}$	$I_{\text{měř}}$	M_{sim}	I_{sim}	$M_{1\text{mm}}$	$I_{1\text{mm}}$	$M_{0,4\text{mm}}$	$I_{0,4\text{mm}}$
[min ⁻¹]	[Nm]	[A]	[Nm]	[A]	[Nm]	[A]	[Nm]	[A]
2200	0,220	0,3670	0,185	0,2825	0,575	0,4553	0,634	0,4539
2300	0,195	0,3562	0,164	0,2728	0,531	0,4212	0,583	0,4171
2400	0,169	0,3451	0,143	0,2649	0,480	0,3861	0,524	0,3799
2500	0,142	0,3337	0,123	0,2576	0,423	0,3503	0,460	0,3423
2600	0,114	0,3221	0,101	0,2499	0,359	0,3128	0,388	0,3046
2700	0,085	0,3103	0,081	0,2418	0,286	0,2733	0,307	0,2669
2800	0,054	0,2982	0,059	0,2337	0,200	0,2336	0,214	0,2303
2900	0,022	0,2859	0,031	0,2267	0,094	0,2013	0,105	0,2009

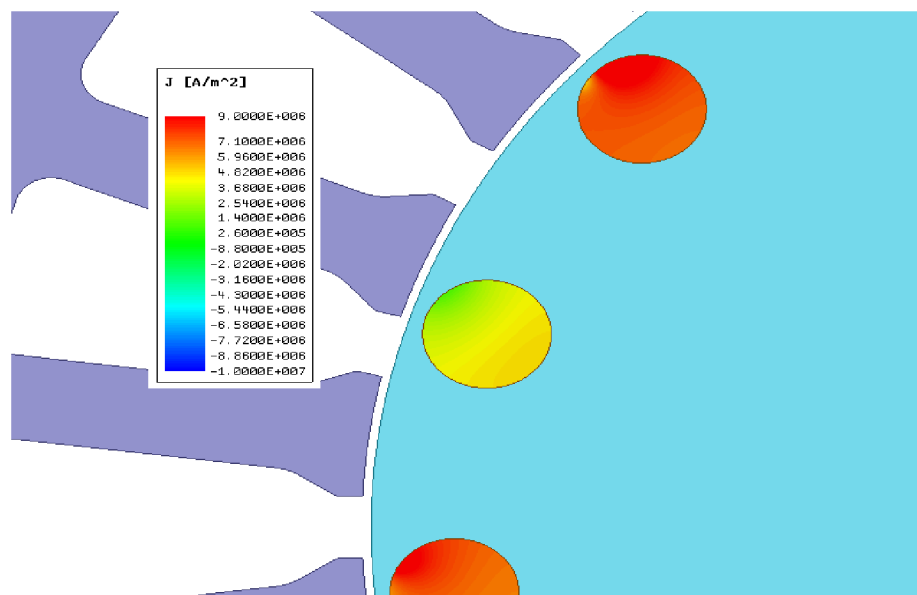


Obr. 8. 7 Rozložení magnetické indukce v motoru s měděnou klecí při $n = 2600 \text{ min}^{-1}$

Jak je patrné z výsledků ze simulací, proud, který prochází jednotlivými tyčemi rotoru, způsobuje v okolí tyčí rotoru rozptyl, který je potřeba pokrýt zvýšením statorového proudu. Současně však prochází tok hlouběji do jádra rotoru a zlepšuje tak moment, výkon motoru i účinnost. Vlivem drážkování statoru se opět projevuje pulzace magnetické indukce, která způsobuje ztráty v rotoru.



Obr. 8. 8 Rozložení proudové hustoty v rotoru s měděnou klecí při $n = 2600 \text{ min}^{-1}$



Obr. 8. 9 Proudová hustota v tyčích klece rotoru

8.4 Celkové srovnání

V následující tabulce jsou srovnány výsledky při otáčkách $n = 2650 \text{ min}^{-1}$, které uvádí ve své práci pan Belica [7] jako jmenovité motoru. Jelikož bylo dosaženo téměř stejných výsledků u 15-ti drážek/tyčí a 17-ti drážek/tyčí, budou dále porovnány pouze výsledky pro 15 drážek/tyčí.

Tab. 8. 5 Porovnání výsledků všech úprav modelů rotoru

	M	I	P₂	η
	[Nm]	[A]	[W]	[%]
Plný rotor - měření	0,10	0,316	27,2	36,7
Plný rotor - simulace	0,091	0,246	25,25	44,5
Plný rotor s 2 mm vrstvou	0,285	0,641	79,09	36,6
Plný rotor s 0,3 mm vrstvou	0,282	0,395	78,26	44,7
Plný rotor s 0,15 mm vrstvou	0,098	0,254	27,2	23,8
Plný rotor s axiálními drážkami	0,188	0,229	52,17	66,1
Plný rotor s axiálními drážkami a 2 mm vrstvou	0,335	0,648	92,96	39,8
Plný rotor s axiálními drážkami a 0,3 mm vrstvou	0,354	0,420	98,24	49,2
Plný rotor s axiálními drážkami a 0,15 mm vrstvou	0,18	0,276	49,95	35,8
Plný rotor s měděnou klecí s $h_0 = 1 \text{ mm}$	0,324	0,285	89,91	67,9
Plný rotor s měděnou klecí s $h_0 = 0,4 \text{ mm}$	0,349	0,305	96,85	69,7

ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývala problematikou asynchronního motoru s plným rotorem, především zlepšením jeho vlastností vhodnou úpravou rotoru. V práci jsou uvedeny výsledky získané z měření na konkrétním vzorku motoru s plným rotorem. Následně se provedly simulace tohoto motoru metodou konečných prvků pomocí programu Maxwell. Na základě dosažených výsledků byly navrženy úpravy rotoru, které vedly ke zlepšení parametrů motoru.

V programu Maxwell byl sestaven dvourozměrný i trojrozměrný model plného rotoru motoru, který vycházel z parametrů statorového a rotorového magnetického obvodu motoru převzatých od pana Belici [7]. Jak již bylo popsáno v kapitole 6, byl výpočet trojrozměrného modelu časově náročný, a i přesto nejsou výsledky z těchto výpočtů zcela přesné. Pro přesnější výsledky je nutné nastavit jemnější mesh a krok výpočtu, což nebylo možné z důvodu nedostatečné výpočetní techniky. Proto byly dále výpočty prováděny pouze u dvourozměrného modelu. Dvourozměrný model však nezahrnuje do výpočtu konečnou délku motoru a proto došlo k přepočtení vodivosti materiálu pomocí korekčních činitelů.

Práce popisuje návrhy jednotlivých konstrukcí rotoru, na nichž byla posléze provedena simulace. Návrhy konstrukcí s drážkami nebo s tyčemi, byly voleny podle doporučení z literatury [8]. Výsledky z výpočtů pro zvolených 15 a 17 drážek/tyčí se téměř shodovali, proto se závěrečné porovnání provádělo pouze pro 15 drážek/tyčí, které budou z pohledu nákladů na výrobu nižší.

V programu Maxwell byla odečtena nejvyšší hodnota sycení v nejužším místě zubu rotoru pro zatížení při otáčkách $n = 2600 \text{ min}^{-1}$. V případě rotoru s měděnou klecí s 15-ti tyčemi je velikost sycení $1,6 T$. Vypočtená hodnota $1,08 T$. U rotoru s axiálními drážkami dosáhla hodnota sycení $1,85 T$. Ta je však na hraně dovolených hodnot magnetické indukce v tomto místě podle [8], kde se uvádí rozmezí $1,75 T$ až $1,85 T$. Axiální drážky rotoru jsou stejně široké po celé hloubce a s větší hloubkou drážky do rotoru se zuby zužují. Sycení je tedy možné ovlivnit úpravou hloubky drážky, což by mohlo být předmětem dalšího zkoumání.

Z porovnání výsledků je patrné, že nejvyššího výkonu motoru se dosáhlo úpravou rotoru s axiálními drážkami a povrchovou vrstvou $0,3 \text{ mm}$. Avšak za cenu zvýšení příkonu motoru a tím nižší účinnosti. Naopak nejvyšší účinnosti se dosáhlo u rotoru s měděnou klecí s $h_0 = 0,4 \text{ mm}$, která se vyznačuje vysokým výkonem a momentem motoru. Výroba takto upraveného motoru by byla velmi nákladná, jednak z důvodu použití velkého množství mědi a dále řezání otvorů do rotoru. Za nejméně nákladnou úpravu rotoru lze považovat vyfrézování axiálních drážek.

Nižší náklady na úpravu rotoru by se projeví v horším výkonu motoru ve srovnání s měděnou klecí, ale naopak lepší účinností, než u rotoru s axiálními drážkami a povrchovou vrstvou 0,3 mm.

V případě dvourozměrného modelu motoru s plným rotorem i jeho úprav je zkoumání elektromagnetického pole nebo vířivých proudů značně zkráceno. Je to dáno především přepočty na dvourozměrný model. Vhodnější simulace pomocí metody konečných prvků by bylo třeba provést na plnohodnotném trojrozměrném modelu motoru, ale to nelze z důvodu nedostatečné výpočetní techniky. Další možnost ověření dosažených výsledků by byla vyrobít požadovaný model motoru, provést na tomto modelu měření a porovnat dosažené výsledky.

Literatura

- [1] HENRY-BAUDOT, J. *Elektrické stroje pro automatizaci*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1971, 274 s, Knižnice automatizace a regulace, Sv. 13
- [2] AHO, T. *Electromagnetic design of a solid steel rotor motor for demanding operation environments*. Dissertation Acta Universitatis Lappeenrantaensis 292, 2007, ISBN 978-952-214-498-0
- [3] ONDRŮŠEK, Č. *Elektrické stroje*, skriptum Vysoké Učení Technické v Brně, 40 s
- [4] PATOČKA, M. *Vybrané statě z výkonové elektroniky*, skriptum Vysoké Učení Technické v Brně, 266 s
- [5] HUPPUNEN, J. *High-speed solid-rotor induction machine - electromagnetic calculation and design*, Acta Universitatis Lappeenrantaensis 197, 2004. ISBN 951-764-944-4
- [6] *Typical data for SURA M700-50A* [online]. 1 s. [cit. 2016-11-06]. Dostupné z: <http://cogent-power.com/cms-data/downloads/m700-50a.pdf>
- [7] BELICA, A. *Speciální asynchronní motory malého výkonu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 58 s.
- [8] KOPYLOV, I.P. *Stavba elektrických strojů: celostátní vysokoškolská učebnice pro elektrotechnické fakulty vysokých škol technických*. 1. vyd. Praha 1: Státní nakladatelství technické literatury, 1988, 685 s. ISBN 04-532-88
- [9] PYRHÖNEN, J., NERG, J., KURRONEN, P., LAUBER, U. *High-Speed Solid-Rotor Induction Motor for Gas compression*. Lappeenranta University of Technology, Department of Electrical Engineering, 2008
- [10] KOŠŤÁL, J. *Teplotní závislost odporu kovových vodičů*. *Elektro* [online]. 2008, 2 s [cit. 2017-02-17]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/36489.pdf>
- [11] SVOREŇ, J. *Návrh vysokootáčkového asynchronního motoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 89 s.
- [12] KLÍMA, J. *Analýza vysokootáčkového asynchronního motoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 65 s.

Seznam symbolů, veličin a zkratek

2D	[-]	dvourozměrné zobrazení
3D	[-]	trojrozměrné zobrazení
a_{kn}	[mm]	střední výška kruhu nakrátko
B	[T]	magnetická indukce
B_{max}	[T]	maximální magnetická indukce
B_{min}	[T]	minimální magnetická indukce
B_{z2}	[T]	indukce v nejužším místě zubu rotoru
B_{δ}	[T]	indukce ve vzduchové mezeře
b_{kn}	[mm]	šířka kruhu nakrátko
b_t	[mm]	průměr tyče
C	[-]	koefficient pro výpočet korekčního faktoru
$\cos \varphi$	[-]	účinník
f_s	[Hz]	frekvence statoru
H	[A·m ⁻¹]	intenzita magnetického pole
h_0	[mm]	vzdálenost od vnějšího kraje tyče po okraj povrchu rotoru
$h_{drážky}$	[mm]	hloubka drážky
h_{vrstvy}	[mm]	šířka vrstvy
I_{kn}	[A]	proud v kruhu nakrátko
I_{rms}	[A]	proud na svorkách motoru
I_2	[A]	proud v tyči rotoru
J_{kn}	[A·m ⁻²]	hustota proudu v kruhu nakrátko
J_2	[A·m ⁻²]	hustota proudu v tyčích rotoru
K_{er}	[-]	korekční faktor
K_T	[-]	korekční činitel zastupující vliv konečné délky
k_{Fe}	[-]	činitel plnění železa
k_i	[-]	činitel uvažující vliv magnetizačního proudu a odpor vinutí
k_{Russel}	[-]	činitel pro přepočítání vodivosti materiálu
k_{v1}	[-]	činitel statorového vinutí
l_{Fe}	[mm]	axiální délka magnetického svazku
M	[Nm]	moment

m_1	[-]	počet fází statoru
N_1	[-]	počet závitů ve fázi vinutí
n	[min ⁻¹]	otáčky
P	[W]	výkon motoru
P_1	[W]	činný výkon
p	[-]	počet pólových dvojic stroje
p_i	[-]	činitel přepočtu proudů
Q	[Var]	jalový výkon
Q_2	[-]	počet drážek rotoru
R	[Ω]	naměřený odpor vinutí
R_0	[Ω]	počáteční hodnota odporu vinutí
R_{prum}	[Ω]	vypočtený odpor vinutí
r_{rotor}	[mm]	poloměr rotoru
S	[VA]	zdánlivý výkon
S_{kn}	[mm ²]	průřez kruhu nakrátko
S_t	[mm ²]	efektivní průřez tyče klece rotoru
s	[%]	skluz
t_{d2}	[mm]	drážková rozteč
U_{rms}	[V]	napětí na svorkách motoru
U_1	[-]	označení první fáze
V_1	[-]	označení druhé fáze
W_1	[-]	označení třetí fáze
α	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]	teplotní součinitel
Δ	[-]	průřez kruhu nakrátko
$\Delta\vartheta$	[°C]	oteplení
η	[%]	účinnost
ϑ	[°C]	teplota vinutí
ϑ_0	[°C]	počáteční teplota vinutí
μ_0	[H·m ⁻¹]	permeabilita vakua
μ_r	[H·m ⁻¹]	permeabilita materiálu
π	[-]	Ludolfovo číslo
ρ	[Ω·m]	rezistivita materiálu

σ	[S·m ⁻¹]	vodivost materiálu
σ_{er}	[S·m ⁻¹]	přepočtená vodivost materiálu
τ_p	[mm]	pólová rozteč