

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ
ELEKTRONIKY**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Vliv materiálu magnetického obvodu na výkonovou
hustotu a účinnost asynchronního stroje**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Martin JANOUŠ**
Osobní číslo: **E19N0021P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Průmyslová elektronika a elektromechanika**
Téma práce: **Vliv materiálu magnetického obvodu na výkonovou hustotu a účinnost asynchronního stroje**
Zadávací katedra: **Katedra výkonové elektroniky a strojů**

Zásady pro vypracování

Cílem práce je návrh několika asynchronních motorů s využitím různých materiálů magnetického obvodu a posouzením jejich vlivu na výkonovou hustotu a účinnost stroje.

1. Navrhněte asynchronní motor na štitkové parametry zadané vedoucím práce. Návrh proveďte pro čtyři různé materiály magnetického obvodu – 2x plechy z elektrotechnické křemíkové oceli, 2x plechy z měkké magnetické slitiny. Při návrhu se snažte docílit co nejmenších rozměrů při zachování vzduchového chlazení a tepelné třídy izolace.
2. Navrhněte asynchronní motor pro maximální zadané rozměry s využitím stejných materiálů magnetického obvodu jako v předchozím bodě zadání. Pro jednotlivé materiály se snažte dosáhnout co nejvyšší výkonové hustoty při zachování vzduchového chlazení a tepelné třídy izolace.
3. Výše uvedené návrhy ověřte konečnoprvkovou analýzou.
4. Proveďte posouzení vlivu jednotlivých materiálů na výkonovou hustotu a účinnost stroje.

Rozsah diplomové práce: **40 – 60 stran**
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. Pyrhönen, Juha, Jokinen, Tapani a Hrabovcová, Valéria. Design of rotating electrical machines. 2nd ed. Chichester: Wiley, 2014. xxvii, 584 s. ISBN 978-1-118-58157-5.
2. Kopylov, Igor Petrovič aj. Stavba elektrických strojů. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988. 685 s.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jan Šobra, Ph.D.**
Katedra výkonové elektroniky a strojů

Datum zadání diplomové práce: **9. října 2020**
Termín odevzdání diplomové práce: **27. května 2021**



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



Prof. Ing. Václav Kús, CSc.
vedoucí katedry

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce je věnována vlivu materiálu magnetického obvodu na vlastnosti asynchronních motorů s kotvou nakrátko. Práce je především zaměřena na porovnání účinnosti a výkonové hustoty navržených strojů, kdy v první části jsou stroje navrženy na stejné štítkové parametry a ve druhé části jsou určeny maximální rozměry paketu, na který jsou motory navrženy. Pro porovnávané stroje je zachováno vzduchové chlazení a stejná třída izolace. Pro magnetické obvody jsou vybrány materiály z elektrotechnické křemíkové oceli a z oceli s příměsí kobaltu, případně dalšího prvku. Konkrétně se jedná o plechy M210-35A, M350-50A, Vacoflux X1 a Hiperco 50A. Navržené stroje jsou následně ověřeny pomocí metody konečných prvků.

Klíčová slova

asynchronní motor, materiál magnetického obvodu, účinnost, výkonová hustota

Abstract

This thesis is dealing with the impact of the magnetic circuit material on the properties of squirrel cage induction motors. The thesis is mainly focused on comparing the efficiency and power density of the designed machines, where in the first part the machines are designed for specified nameplate parameters and in the second part the maximum dimensions of the stator are determined for which the motors are designed. Air cooling and the same insulation class are maintained for the compared machines. Materials from electrotechnical silicon steel and cobalt steel with an admixture of another elements are selected for magnetic circuit. Specifically, these are sheets M210-35A, M350-50A, Vacoflux X1 and Hiperco 50A. The designed machines are then verified using the finite element method.

Key words

induction motor, magnetic circuit material, efficiency, power density

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

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

.....

podpis

V Plzni dne 25.5.2021

Martin Janouš

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Janu Šobrovi, Ph.D. a konzultantovi Ing. Lukáši Vegovi za cenné rady a připomínky při vedení práce. Také bych chtěl poděkovat všem členům rodiny za trpělivost a podporu po celou dobu studia.

Obsah

ÚVOD	10
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	11
1 ASYNCHRONNÍ MOTORY.....	17
1.1 KONSTRUKCE.....	17
1.2 ZTRÁTY VZNIKAJÍCÍ V ASYNCHRONNÍM MOTORU	17
1.2.1 Jouleovy ztráty.....	18
1.2.2 Ztráty v železe	18
1.2.3 Dodatečné ztráty.....	19
1.2.4 Mechanické ztráty.....	19
1.3 MOŽNOSTI SNÍŽENÍ ZTRÁT.....	19
1.4 MATERIÁLY POUŽITÉ PŘI NÁVRHU MOTORŮ	20
1.4.1 Vlastnosti plechu z křemíkové oceli	20
1.4.2 Vlastnosti plechů ze slitiny kobaltu a železa	23
2 ELEKTROMAGNETICKÝ NÁVRH ASYNCHRONNÍHO MOTORU S KOTVOU NAKRÁTKO NA ŠTÍTKOVÉ PARAMETRY.....	26
2.1 URČENÍ HLAVNÍCH ROZMĚRŮ	26
2.1.1 Vnitřní průměr statoru a výpočtová délka	26
2.1.2 Moment stroje a tangenciální napětí	27
2.1.3 Vzduchová mezera a délka statoru	27
2.2 URČENÍ PARAMETRŮ VINUTÍ	27
2.2.1 Počet drážek statoru	28
2.2.2 Parametry vinutí	28
2.2.3 Drážková rozteč	29
2.2.4 Pólová rozteč	29
2.2.5 Činitel vinutí	29
2.2.6 Počet drážek rotoru a činitel natočení.....	29
2.2.7 Určení parametrů magnetického obvodu	30
2.3 LINEÁRNÍ PROUDOVÁ HUSTOTA	30
2.3.1 Počet závitů v sérii.....	30
2.3.2 Počet vodičů v drážce	30
2.3.3 Skutečná počet závitů v sérii	30
2.3.4 Skutečná magnetická indukce ve vzduchové mezeře	31
2.3.5 Určení šířky zubu statoru a rotoru	31
2.4 VÝPOČET ROZMĚRŮ DRÁŽKY STATORU	31
2.4.1 Proud ve statoru	31
2.4.2 Proud v tyčích rotoru.....	31
2.4.3 Proud v kruhu nakrátko.....	32
2.4.4 Průřez jednoho vodiče v drážce.....	32
2.4.5 Skutečný průřez vodiče	32
2.4.6 Celkový průřez aktivní části drážky.....	32
2.4.7 Průřez tyče rotoru.....	32
2.4.8 Průřez kruhu nakrátko	32
2.4.9 Rozměry drážky statoru	33
2.4.10 Rozměry drážky rotoru	34
2.5 VÝPOČET MAGNETICKÉHO OBVDU	35
2.5.1 Carterův činitel statoru	35
2.5.2 Carterův činitel rotoru.....	36
2.5.3 Magnetické napětí ve vzduchové mezeře	36
2.5.4 Magnetické napětí statoru	36
2.5.5 Magnetická napětí rotoru	38
2.5.6 Ověření činitele pólového krytí.....	38
2.5.7 Magnetické napětí jha statoru	39
2.5.8 Magnetické napětí jha rotoru	39

2.5.9	Vnější průměr statoru a vnitřní průměr rotoru.....	40
2.6	URČENÍ PARAMETRŮ NÁHRADNÍHO SCHÉMATU.....	40
2.6.1	Magnetizační reaktance.....	40
2.6.2	Odpor respektující ztráty v železe.....	40
2.6.3	Odpor vinutí statoru.....	40
2.6.4	Odpor jedné fáze rotoru.....	41
2.6.5	Rozptylová reaktance statoru.....	42
2.6.6	Rozptylová reaktance rotoru.....	43
2.6.7	Ověření činitele elektromotorické síly.....	44
2.7	ZTRÁTY A ÚČINNOST.....	44
2.7.1	Hlavní ztráty v železe.....	44
2.7.2	Povrchové ztráty.....	45
2.7.3	Pulzační ztráty.....	46
2.7.4	Celkové ztráty v železe.....	47
2.7.5	Jouleovy ztráty.....	47
2.7.6	Mechanické ztráty.....	47
2.7.7	Dodatečné ztráty.....	47
2.7.8	Účinnost.....	48
2.7.9	Výkonová hustota stroje.....	48
3	TEPELNÝ A VENTILAČNÍ VÝPOČET STROJE.....	49
3.1	MODEL NÁHRADNÍ TEPELNÉ SÍTĚ.....	49
3.2	VÝPOČET TEPELNÝCH ODPORŮ.....	50
3.3	VENTILAČNÍ VÝPOČET.....	54
4	POROVNÁNÍ STROJŮ NAVRŽENÝCH NA ŠTÍTKOVÉ PARAMETRY.....	55
4.1	VÝPOČTOVÉ A PROVOZNÍ PARAMETRY.....	55
4.2	Hlavní rozměry.....	55
4.3	PARAMETRY VINUTÍ, KLECE A DRÁŽEK.....	57
4.4	HODNOTY MAGNETICKÉ INDUKCE.....	59
4.5	PARAMETRY NÁHRADNÍHO SCHÉMATU.....	60
4.6	ZTRÁTY, ÚČINNOST A VÝKONOVÁ HUSTOTA.....	60
4.7	OTEPLENÍ.....	62
5	POROVNÁNÍ STROJŮ NAVRŽENÝCH NA ZÁSTAVBOVÉ ROZMĚRY.....	64
5.1	VÝPOČTOVÉ, PROVOZNÍ PARAMETRY A HLAVNÍ ROZMĚRY STROJŮ.....	64
5.2	PARAMETRY VINUTÍ, KLECE A DRÁŽEK.....	66
5.3	HODNOTY MAGNETICKÉ INDUKCE.....	68
5.4	PARAMETRY NÁHRADNÍHO SCHÉMATU.....	69
5.5	ZTRÁTY, ÚČINNOST A VÝKONOVÁ HUSTOTA.....	70
5.6	OTEPLENÍ.....	72
6	OVĚŘENÍ STROJŮ POMOCÍ METODY KONEČNÝCH PRVKŮ.....	74
6.1	STROJE NAVRŽENÉ NA ŠTÍTKOVÉ PARAMETRY.....	74
6.2	STROJE NAVRŽENÉ NA ZADANÉ ROZMĚRY.....	77
	ZÁVĚR.....	80
	SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....	82
	PŘÍLOHY.....	1

Úvod

Asynchronní motory momentálně patří mezi nejpoužívanější elektrické točivé stroje. Pomyslné prvenství je zajištěno zejména jejich vlastnostmi, mezi které patří jednoduchá konstrukce, nenáročná údržba, vysoká spolehlivost, robustnost a relativně malá pořizovací cena. Tento stroj má i své nevýhody. Mezi hlavní nevýhody patří zejména odběr jalové energie ze sítě, která je nezbytná pro činnost těchto strojů, složitá a technicky náročná regulace rychlosti při maximálním využití stroje, která je závislá na napájecí frekvenci a značný proudový ráz při rozběhu. Tyto nedostatky byly odstraněny až s rozvojem polovodičových měničů, které umožňují plynulou regulaci frekvence, a tím plynule rozbíhat motor bez velkých proudových rázů [1].

S asynchronní motory se můžeme setkat v celém spektru aplikací od ventilátorů a čerpadel, přes výtahy a jeřáby, až po elektrickou trakci. Tyto elektrické stroje se vyrábějí v širokém spektru výkonů od několika wattů, až po několik desítek MW. Standardně se motory vyrábějí v jistých geometrických řadách výkonů, ale lze je navrhnout i individuálně na parametry nebo maximální zástavbový prostor podle požadavků zákazníka. Obvykle se lze setkat s nízko napěťovými motory s výkony od 0,18 kW až do 710 kW, stroje s výkonem vyšším než 710 kW se obvykle navrhují na vyšší napětí, nicméně se lze setkat i s motory s výkonem 5 MW a napětím 690 V [2].

Mezi hlavní kritéria při volbě motoru patří účinnost. Vzhledem k tlaku Evropské unie na snižování spotřeby elektrické energie a tím také na množství emisí CO₂ je zavedena směrnice pro asynchronní motory, která zavádí třídy účinnosti značené. V ČR se jedná o normu ČSN EN 60034-34 [3]. Kvůli této normě je tedy kladen důraz na snížení ztrát stroje, které lze například snížit použitím materiálu magnetického obvodu s nižším ztrátovým číslem. Tímto tématem se také zabývá první část práce.

V úvodu této práce je okrajově zmíněna konstrukce stroje a ztráty, které ve stroji vznikají a jsou zde také rozebrány materiály, které jsou vybrány pro magnetické obvody navržených strojů. Následuje postup návrhu stroje, podle kterého jsou navrženy i ostatní motory. V dalších dvou kapitolách je porovnání navržených strojů na štitkové parametry a na maximální rozměr paketu statoru, po kterých následuje část práce, kde jsou návrhy ověřeny pomocí metody konečných prvků.

Seznam symbolů a zkratk

$2u$	Počet vrstev vinutí [-]
A	Proudová hustota [A/m]
a	Počet paralelních větví [-]
B	Délka přímé části cívky při výstupu z drážky [mm]
B_{01}	Amplituda pulzací ve vzduch mezeře od statoru [-]
B_{02}	Amplituda pulzací ve vzduch mezeře od rotoru [-]
b_{1-5}	Šířka vztahující se k drážce [mm]
b_c	Střední vzdálenost mezi cívkami [mm]
B_δ	Skutečná indukce ve vzduchové mezeře [T]
B_{jr}	Indukce ve jhu rotoru [T]
B_{js}	Indukce ve jhu statoru [T]
b_{kn}	Šířka kruhu [mm]
B_{p1}	Amplituda pulzací v zubech statoru [T]
B_{p2}	Amplituda pulzací v zubech rotoru [T]
B_{zr}	Indukce v zubu rotoru [T]
b_{zr}	Šířka zubu rotoru [mm]
B_{zs}	Indukce v zubu statoru [T]
b_{zs}	Šířka zubu statoru [mm]
C_{mech}	Výkonová konstanta stroje [kWs/m ³]
$\cos \zeta$	Úhel natočení magnetického toku ve vzduchové mezeře [-]
$\cos\varphi_0$	Účinník naprázdno [-]
$\cos\varphi_k$	Účinník nakrátko [-]
D_e	Vnější průměr statoru [mm]
D_i	Vnitřní průměr rotoru [mm]
D_{kn}	Střední průměr kruhu nakrátko [mm]
D_r	Vnější průměr rotoru [mm]
D_s	Vnitřní průměr statoru [mm]
F_m	Celkové magnetizační napětí
h_{1-5}	Výška vztahující se k drážce [mm]
h_{jr}	Výška jha rotoru [mm]
H_{jr}	Intenzita magnetického pole ve jhu rotoru [A/m]
h_{js}	Výška jha statoru [mm]

H_{js}	Intenzita magnetického pole ve jhu statoru [A/m]
$h_{s,r}$	Výška drážky [mm]
H_{zr}	Intenzita magnetického pole zubu statoru [A/m]
H_{zs}	Intenzita magnetického pole zubu statoru [A/m]
I_0	Proud naprázdno [A]
I_{Fe}	Činná složka proud naprázdno [A]
I_k	Proud nakrátko [A]
I_{kruh}	Proud v kruhu [A]
I_μ	Magnetizační proud [A]
I_r	Rotorový proud [A]
I_s	Statorový proud [A]
J_r	Proudová hustota v tyči rotoru [A/mm ²]
J_{ring}	Proudová hustota v kruhu nakrátko [A/mm ²]
J_s	Proudová hustota ve statorovém vinutí [A/mm ²]
K	Počet cívek stroje [-]
k'_β	Činitel závislý na kroku vinutí [-]
k'_γ	Činitel závislý na zkrácení kroku [-]
K_1	Počet cívek v jednom svazku [-]
k_β	Činitel závislý na kroku vinutí [-]
k_C	Carterův činitel statoru [-]
k_{Cus}	Činitel plnění drážky [-]
K_ϵ	Koeficient prodloužení čel [-]
K_E	Činitele elektromotorické síly [-]
k_{Fe}	Činitel plnění železa [-]
k_{Fej1}	Činitel nerovnoměrnosti jha [-]
k_{Fez2}	Činitel nerovnoměrnosti zubů [-]
k_r	Činitel rozlohy [-]
k_{sq1}	Činitel natočení drážek [-]
k_v	Činitel vinutí [-]
K_v	Činitel čel [-]
k_y	Činitel kroku [-]
L	Celková délka vodičů jedné fáze [mm]
l'	Efektivní délka stroje [mm]

$L_{1\sigma}$	Rozptylová indukčnost drážky statoru [H]
l_{av}	Střední délka závitů [mm]
l_{ξ}	Délka čela [mm]
l_d	Délka drážkové části [mm]
L_{dif}	Indukčnost diferenčního rozptylu [H]
L_{μ}	Magnetizační indukce [mH]
l_s	Skutečná délka statoru [mm]
l_v	Vyložení čel [mm]
M	Moment stroje [Nm]
m	Počet fází [-]
m'	Počet matematických fází [-]
m_{Al}	Hmotnost klece nakrátko [kg]
m_c	Hmotnost aktivních částí stroje [kg]
m_{Cu}	Hmotnost statorového vinutí [kg]
m_{Fe_r}	Hmotnost železa rotoru [kg]
m_{Fe_s}	Hmotnost železa statoru [kg]
m_{js}	Hmotnost jha [kg]
M_{max}	Maximální moment [Nm]
m_{zr}	Hmotnost zubů rotoru [kg]
m_{zs}	Hmotnost zubů [kg]
N_s	Počet závitů v sérii [-]
N'_s	Skutečný počet závitů [-]
p_d	Výkonová hustota stroje [W/kg]
$p_{\delta p1}$	Povrchové ztráty vztažené na 1 m ² statoru [W/m ²]
$p_{\delta p2}$	Povrchové ztráty vztažené na 1 m ² rotoru [W/m ²]
P_{mech}	Výkon na pól [kW]
q	Počet drážek na pól a fázi [-]
Q_r	Počet drážek rotoru [-]
Q_s	Počet drážek statoru [-]
R'_2	Odpor rotoru přepočtený na stator [-]
R_1	Odpor jedné fáze statoru [Ω]
$R_{12-1113}$	Tepelný odpor mezi částmi stroje [K/W]
R_2	Odpor jedné fáze rotoru [Ω]

R_{Fe}	Odpor respektující ztráty v železe [Ω]
R_k	Odpor kruhu nakrátko [Ω]
R_t	Odpor tyče [Ω]
S_c	Počet svazků cívek [-]
S_{ckruh}	Průřez kruhu [mm ²]
S_{cr}	Průřez vodičů v drážce rotoru [mm ²]
S_{cs}	Průřez vodičů v drážce statoru [mm ²]
S_{cs}	Skutečný průřez vodiče [mm ²]
S_{Cus}	Aktivní plocha drážky [mm ²]
S_{dr}	Plocha všech drážek [m ²]
S_f	Počet svazků cívek na fázi [-]
s_n	Jmenovitý skluz [-]
S_{vz}	Plocha vzduchové mezery [m ²]
s_z	Skluz zvratu [-]
t_d	Drážková rozteč [mm]
t_{dr}	Drážková rozteč na rotoru [mm]
t_p	Pólová rozteč [mm]
$U_{m\delta}$	Magnetické napětí ve vzduchové mezeře [A]
U_{myr}	Magnetické napětí jha rotoru [A]
U_{mys}	Magnetické napětí jha statoru [A]
U_{mzr}	Magnetické napětí zubu rotoru [A]
U_{mzs}	Magnetické napětí zubu statoru [A]
$X'_{2\sigma}$	Rozptylová reaktance rotoru přepočtená [Ω]
$X_{1\sigma}$	Rozptylový reaktance vinutí statoru [Ω]
$X_{2\sigma}$	Rozptylový reaktance vinutí statoru [Ω]
X_k	Impedance nakrátko [Ω]
X_μ	Magnetizační reaktance [Ω]
y_1	Krok vinutí v počtu cívkových stran [-]
y_{1d}	Krok vinutí v počtu drážek [-]
y_2	Spojkový krok [-]
y_k	Krok mezi kontakty cívek [-]
y_Q	Vzdálenost pólů v počtu drážek [-]
z_{Qs}	Skutečný počet vodičů v drážce [-]

z_{Qs2}	Počet vodičů v drážce pro $a=2$ [-]
Δ	Koeficient pro přepočítání proudu z tyče do kruhu [-]
ΔP	Celkové ztráty stroje [W]
$\Delta p_{1,5}$	Ztrátový činitel plechů při 1,5T [W/kg]
$\Delta P_{\delta p1}$	Povrchové ztráty statoru [W]
$\Delta P_{\delta p2}$	Povrchové ztráty rotoru [W]
ΔP_{fe}	Ztráty v železe [W]
$\Delta P_{Fe d}$	Celkové dodatečné ztráty [W]
ΔP_{Fej1}	Ztráty v železe jha [W]
ΔP_{Fez1}	Ztráty v železe zubů [W]
ΔP_j	Celkové Joulovy ztráty [W]
ΔP_{j1}	Joulovy ztráty ve vinutí statoru [W]
ΔP_{j2}	Joulovy ztráty ve vinutí rotoru [W]
ΔP_m	Mechanické ztráty [W]
ΔP_{p1}	Pulzační ztráty v zubech statoru [W]
ΔP_{p2}	Pulzační ztráty v zubech rotoru [W]
ΔT_{1-11}	Oteplení částí stroje [°C]
Δ_z	Činitel v závislosti na b_0/δ a b_0/td_1 [-]
α	Součinitel přestupu tepla v δ [W/K.m ²]
α_z	Součinitel přestupu tepla z čel [W/K.m ²]
α_i	Činitel nasycení [-]
α_k	Součinitel přestupu tepla z kostry [W/K.m ²]
a_{kn}	Výška kruhu [mm]
α_s	Součinitel přestupu tepla ze štítu [W/K.m ²]
α_{v-k}	Součinitel přestupu tepla ze vzduchu stroje do kostry [W/K.m ²]
β	Zkrácení kroku vinutí [-]
δ	Velikost vzduchové mezery [mm]
δ_e	Ekvivalentní velikost vzduchové mezery [mm]
γ_{p1}	Činitel pro výpočet amplitudy pulzací v zubech statoru [-]
γ_{p2}	Činitel pro výpočet amplitudy pulzací v zubech rotoru [-]
κ	Činitel pro výpočet Carterova činitele [-]
η	Účinnost [-]

λ_{Al}	Tepelná vodivost hliníku [W/Km]
λ_{Cu}	Tepelná vodivost mědi [W/Km]
$\lambda_{\epsilon 1}$	Činitel magnetické vodivosti čel [-]
$\lambda_{\epsilon 2}$	Činitel magnetické vodivosti kruhu [-]
λ_{d1}	Činitel magnetické vodivosti statorové drážky [-]
λ_{d2}	Činitel magnetické vodivosti statorové drážky [-]
λ_{dif2}	Činitel magnetické vodivosti diferenčního rozptylu tyčí [-]
λ_{Fe}	Tepelná vodivost železa [W/Km]
λ_{iz}	Tepelná vodivost izolace [W/Km]
λ_{vzduch}	Tepelná vodivost vzduchu [W/Km]
σ_{Ftan}	Tangenciální napětí [kPa]
ω	Úhlová rychlost pole [rad/s]
ξ	Činitel závislý na q , β a na poměru b_0/δ [-]
ρ_{Al}	Měrný odpor hliníku [$\Omega \cdot m$]
ρ_{Cu}	Měrný odpor mědi [$\Omega \cdot m$]
ρ_{Fe}	Hustota železa [kg/m^3]
λ	Štíhlostní poměr [-]

Seznam použitých indexů

'	Prvotní zvolená veličina, přepočtená
0	Naprázdko
1, 2	Stator, rotor
1-5	Indexy vztahující se k výšce zubu
1-6	Indexy vztahující se k rozměrům drážky
j, z, d, δ	Jho, zub, drážka, vzduchová mezera
n	Jmenovitá hodnota
s, r	Stator, rotor
s, r	Stator, rotor
1-13	Části stroje (tepelná síť)

1 Asynchronní motory

1.1 Konstrukce

Asynchronní motor se skládá ze dvou hlavních částí, a to statoru a rotoru, které jsou odděleny vzduchovou mezerou. Velikost vzduchové mezery se pohybuje v rozmezí desetin milimetrů pro stroje malých výkonů, až po jednotky milimetrů pro stroje velkých výkonů. Její velikost je dána technologickými možnostmi, zejména průhybem hřídele. Magnetický obvod statoru i rotor je skládán ze vzájemně izolovaných plechů vyrobených z magneticky měkkých materiálů s tloušťkou nejčastěji 0,2, 0,35, 0,5, 0,65 a 1 mm. V případě vysokofrekvenčních aplikací se lze setkat i s plechy o tloušťkách 0,05 a 0,1 mm. Plechy jsou nejčastěji raženy nebo vyřezány pomocí laseru z pásů. Magnetický obvod je vyroben s drážkami, v nichž je uloženo vinutí, které je vyvedeno na svorkovnici. Statorové vinutí je pro malé motory provedeno z měděných vodičů kruhového průřezu. Takové vinutí se používá s polouzavřenými drážkami lichoběžníkového tvaru a nazýváme ho vsypávané vinutí. Pro motory větších výkonů jsou použity pásové měděné vodiče obdélníkových průřezů v kombinaci s otevřenými drážkami obdélníkového tvaru. Z hlediska provedení rotoru rozlišujeme dva typy asynchronních strojů, a to motory s klecí nakrátko a motory s vinutým rotorem. V případě motoru s klecí nakrátko je rotorové vinutí odlito z hliníků a na koncích spojeno hliníkovými kruhy. Lze se setkat i s variantou, kdy jsou tyče klece odlity z mědi a následně jsou kruhy k tyčím připájené nebo přivařené. Motory s vinutým rotorem mají v drážkách vinutí podobné statorovému, které je připojeno na kroužky. Magnetický obvod statoru je uložen v kostře, která je opatřena z každé strany ložiskovými štíty. V ložiskových štítech je uložena hřídel, na kterou je nasunutý magnetický obvod statoru. Na hřídeli se dále může nacházet ventilátor, který může být umístěn uvnitř i vně stroje [1] [2] [6].

1.2 Ztráty vznikající v asynchronním motoru

Ztráty vznikající v elektrických strojích:

- Jouleovy ztráty ve vodičích statoru a rotoru
- Ztráty v železe magnetického obvodu
- Dodatečné ztráty
- Mechanické ztráty

Co se týče vyčíslení ztrát, tak Joulovy ztráty tvoří přibližně 60 % celkových ztrát, kde 40 % jsou ztráty vznikající ve statorovém vinutí a 20 % jsou ztráty, které vznikají v kleci nakrátko. Ztráty v železe mají přibližně 20 % podíl na celkových ztrátách. Dodatečné ztráty se pohybují okolo 15 %. Nejmenší podíl na celkových ztrátách mají ztráty mechanické, přibližně je tato hodnota 5 % [2].

1.2.1 Jouleovy ztráty

Jouleovy ztráty u točivých strojů s m fázemi a proudem I se určí ze vztahu:

$$\Delta P_j = m \cdot R \cdot I^2 \quad (1.1)$$

kde R je odpor vodičů jedné fáze, který se určí z počtu závitů, délky závitů, průřezu vodiče a jeho měrného odporu.

Při výpočtu účinnosti jsou tyto ztráty počítány ze stejnosměrného odporu. Ztráty, které vznikají zvýšením odporu vlivem skin efektu, se zahrnují do dodatečných ztrát. Pro tepelný výpočet se tyto ztráty dále ještě dělí na ztráty vznikající v drážkové části a ztráty v čelech [2].

1.2.2 Ztráty v železe

Tyto ztráty vznikají v magnetické obvodu statoru i rotoru. Vzhledem ke skutečnosti, že je při jmenovitém zatížení frekvence v rotoru nízká a ztráty v železe jsou závislé na frekvenci, tak se ztráty v železe rotoru často zanedbávají.

Ztráty v železe lze rozdělit na ztráty hysterezní a ztráty vířivými proudy. Hysterezní ztráty jsou tvořeny přemagnetováním magnetického obvodu. Velikost těchto ztrát je dána plochou hysterezní smyčky materiálu a frekvencí. Hysterezní ztráty lze snížit použitím materiálu s užší hysterezní smyčkou.

Ztráty vířivými proudy vznikají v důsledku indukování střídavého napětí střídavým magnetickým tokem. V masivních částech jsou vířivé proudy velké a omezují pronikání magnetického toku do materiálu. Účinek těchto proudů se omezuje tak, že se magnetický obvod skládá z plechů nebo je do materiálu přidána příměs pro zvýšení jeho rezistivity.

Ztráty v železe se počítají pro obě jejich složky dohromady. To je dáno tím, že výrobci neuvádějí hysterezní ztráty a ztráty vířivými proudy odděleně, ale udávají ztrátové číslo plechů při určité hodnotě magnetické indukce a frekvence, které je vztaženo na jednotku hmotnosti. Například je uváděno ztrátové číslo $\Delta p_{1,5} = 4 \text{ W/kg}$, 50 Hz, což znamená, že při indukci 1,5 T a frekvenci 50 Hz jsou ztráty v jednom kg materiálu 4 W. Extrapolace ztrát na různé frekvence je komplikovaná, protože ztráty hysterezní a vířivými proudy mají různou závislost na frekvence. Při 50 Hz jsou hysterezní ztráty přibližně 75 % ztrát v železe.

Hysterezní ztráty jsou úměrné frekvenci, zatímco ztráty vířivými proudy jsou závislé na kvadrátu frekvence [2].

1.2.3 Dodatečné ztráty

Dodatečné ztráty jsou způsobeny několika jevy. Některé z těchto jevů lze snadno namodelovat nebo spočítat, ale některé jevy jsou velice složité a těžko spočítatelné. Do těchto ztrát například patří ztráty způsobované skin efektem. Dále se jedná o ztráty v železe, které jsou způsobeny harmonickými ve vzduchové mezeře. Jedná se o ztráty pulzační ve statorových a rotorových zubech, o povrchové ztráty vznikající na povrchu zubů, o ztráty v železe přítlačných desek na koncích statorového paketu a o ztráty v železe v kostře a štítech. Tyto ztráty jsou malé a při výpočtu ztrát se uvažují zavedením korekčního činitele k_{Fen} . Dále do těchto ztrát spadají dodatečné ztráty při zatížení. Tyto ztráty vznikají ve vinutí a jsou způsobeny prostorovými harmonickými proudy [2].

1.2.4 Mechanické ztráty

Mechanické ztráty vznikají v důsledku tření v ložiskách, tření rotoru o vzduch ve stroji a ztráty ventilační. Ztráty v ložiskách závisí na otáčkách hřídele, typu ložiska, vlastnostech maziva v ložiskách a na velikosti zatížení ložisek. Ztráty třením rotoru o vzduch se zvyšují spolu s frekvencí. Tyto ztráty lze rozdělit na části, která vzniká ve vzduchové mezeře a na část, která vzniká v oblasti kruhů nakrátko. Ventilační ztráty jsou způsobeny ventilátorem, který je připevněn na hřídeli. Další možností pro ventilátor je, že je poháněn jiným motorem, jak je obvyklé u pohonů s regulací otáček [2].

1.3 Možnosti snížení ztrát

Snížení ztrát asynchronního stroje lze několika způsoby. Ztráty vířivými proudy v magnetickém obvodu mohou být sníženy použitím tenčích plechů a ztráty hysterezní mohou být sníženy výběrem materiálu s vyšší kvalitou, a tím užší hysterezní smyčkou. Jouleovy ztráty v rotoru lze omezit odlitím rotorové klece z mědi, čímž se sníží odpor klece. Další možností je zvětšení velikosti motoru. Toto řešení vede na snížení magnetického toku v magnetickém obvodu a snížení proudové hustoty vinutí, a to má vliv na snížení ztrát v železe a Joulových ztrát vinutí. Kromě snížení ztrát má zvětšení stroje za následek zlepšení chladících podmínek. Snížení ztrát lze dále dosáhnout optimalizací tvaru drážek statoru a rotoru, případně použitím účinné konstrukce ventilátoru, která zlepší proudění vzduchu a sníží ventilační ztráty [2].

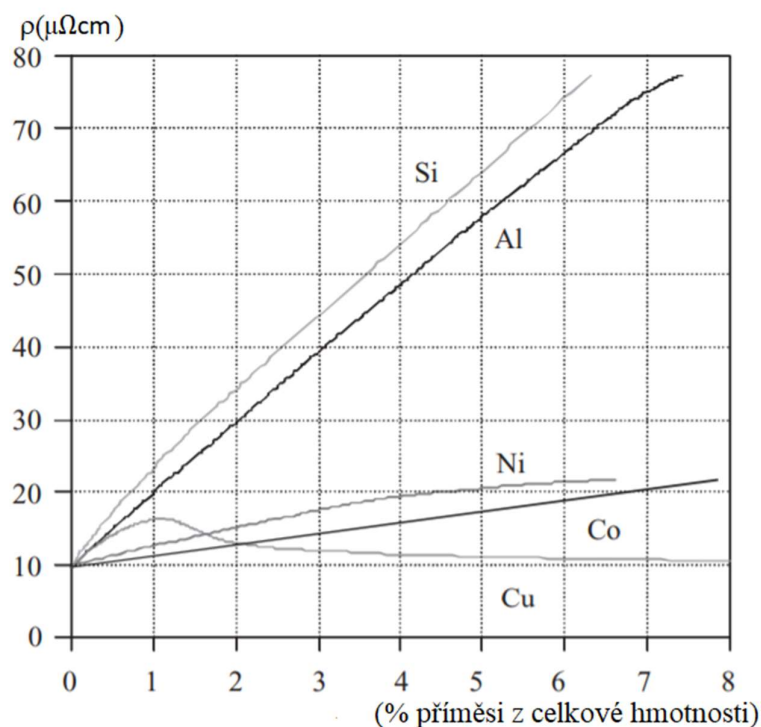
1.4 Materiály použité při návrhu motorů

Pro návrh motorů jsou použity dva materiály z elektrotechnický plechů a dva materiály ze slitiny kobaltu a železa. Konkrétně jsou použity plechy M210-35A, M350-50A, Vacoflux X1 a Hiperco 50A. Mezi základní parametry těchto materiálu patří ztrátové číslo, magnetizační charakteristika a činitel plnění železa. Tyto vlastnosti jsou závislé na několika jevech, kterým jsou věnovány další kapitoly.

1.4.1 Vlastnosti plechu z křemíkové oceli

Ztrátové číslo patří mezi hlavní parametry plechů. Tento parametry je udávaný pro specifickou hodnotu magnetické indukce a frekvence, jak je popsáno v kapitole 1.2.2. Ztrátové číslo lze najít v datasheetu materiálu nebo lze vyčíst z jeho značení. Značení plechů nám dále dává údaj o jakosti materiálu a o tloušťce plechu. První znak nám udává jakostní třídu materiálu, následující číslo říká, jaké jsou měrné ztráty materiálu při 1,5 T a 50 Hz. Číslo za pomlčkou pak udává tloušťku plechů. Pro příklad lze použít značení M210-35A, kde M znamená, že se jedná o standardní jakostní třídu M podle EN 10106, číslo 210 značí ztrátové číslo 2,1 W/kg při 1,5 T a 50 Hz a číslo 35 za pomlčkou říká, že plechy mají tloušťku 0,35 mm.

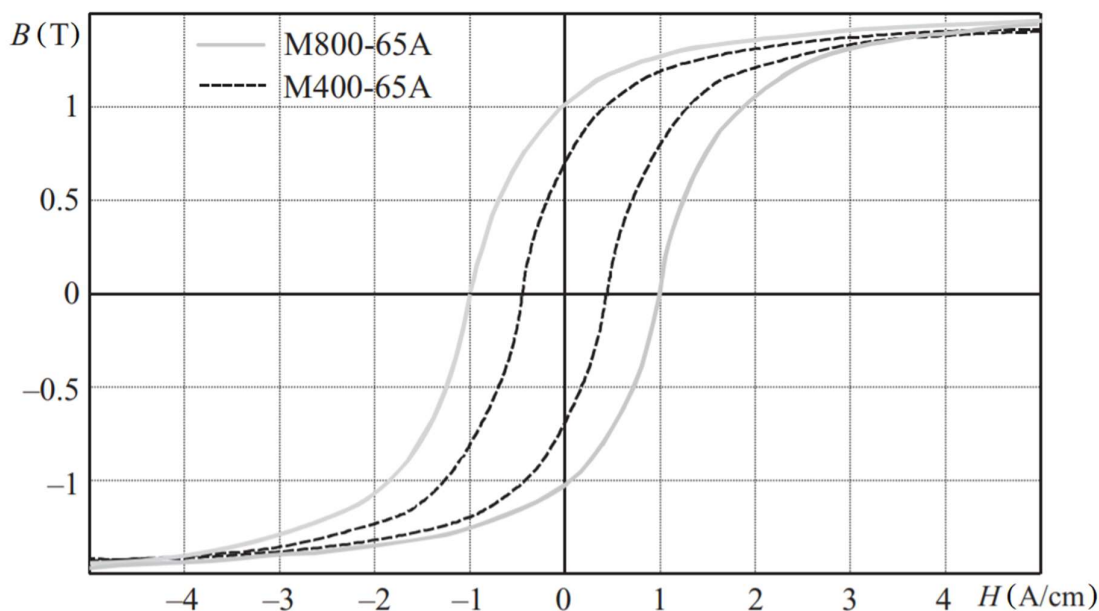
Snížení ztrátového čísla lze dosáhnout zúžením hysterezní smyčky materiálu, použitím laminované struktury nebo zvýšením odporu materiálu. Vzhledem k tomu, že se laminované struktury používají hlavně k omezení účinku vířivých proudů, je vhodné zvolit materiál s vysokým odporem. Jelikož se rezistivita čistých feromagnetických kovů obvykle pohybuje v řádech několik mikrohmů na centimetr, tak se do těchto materiálů přidávají příměsi, aby se odpor materiálu zvýšil. Tyto příměsi mají různý vliv na elektromagnetické vlastnosti železa [2].



Obr. 1.1: Efekt příměsí na rezistivitu železa, převzato z [2]

Na obrázku 1.1 je znázorněn nárůst odporu železa po přidání malého množství jiného prvku. Z tohoto obrázku je vidět, že měď, kobalt a nikl zvyšují rezistivitu železa jen nepatrně, zatímco hliník a křemík způsobují výrazné zvětšení odporu. Z toho vyplývá, že vhodnou kombinací materiálů pro elektrotechnické plechy jsou křemík se železem a hliník se železem. Křemík činí materiál velmi křehký, a proto je v praxi množství tohoto prvku omezeno pod 6 %. Slitina železa s hliníkem je naopak velmi tvrdá a vzhledem k tomu, že se používá materiál až s 16 % hliníku je odpor této slitiny vysoký, a tím se ukazuje jako zajímavá alternativa pro některé speciální aplikace. Další zajímavou variantou je použití hliníku současně s křemíkem. Pro komerční účely se obvykle používají plechy z železa s příměsí křemíku.

Následkem, ke kterému dojde po přidání křemíku do železa, je zúžení hysterezní smyčky. Tato závislost je patrná z obrázku 1.2, kde jsou porovnány plechy M400-65A a M800-65A. Tyto plechy mají stejnou tloušťku, ale plechy M400-65A obsahují vyšší množství křemíku, než plechy M800-65A, což má za následek zúžení magnetizační křivky, ale také negativní dopad na snížení hodnoty sycení materiálu [2].



Obr. 1.2: Porovnání hysterezní smyčky plechů M400-65A a M800-65A, převzato z [2]

Dalším aspektem, který má vliv na magnetické vlastnosti, je technologie zpracování. Technologie zpracování má značný vliv na krystalografickou strukturu materiálu. Plechy z křemíkové oceli lze podle způsobu zpracování rozdělit na izotropní plechy válcované za tepla, izotropní plechy válcované za studena a anizotropní plechy válcované za studena. Anizotropní plechy se vyznačují lepší magnetickou vodivostí ve směru válcování než v ostatních směrech. Toho se využívá především u transformátorů. Pro točivé stroje se používají izotropní plechy, které mají ve všech směrech stejné magnetické vlastnosti. Plechy válcované za tepla jsou dále charakteristické zoxidovaným povrchem, který se chová jako izolant. Na plechy válcované za studena je třeba aplikovat izolační vrstvu, protože jejich povrch je čistý, hladký a vodivý [9].

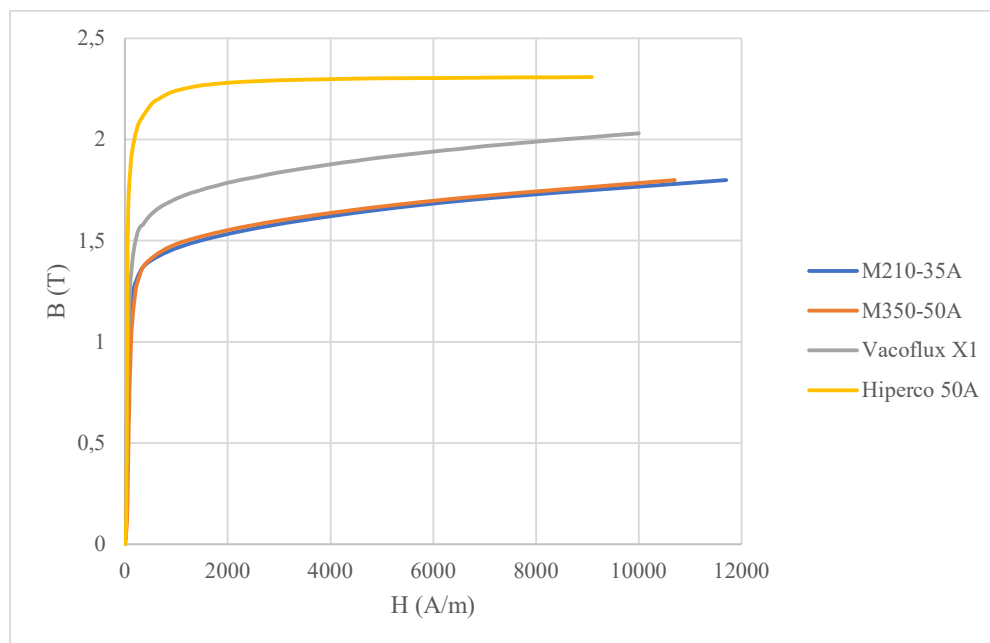
Izolování plechů je další jev, který ovlivní magnetický obvod. Izolování plechů se provádí kvůli snížení ztrát vířivými proudy. Aplikací izolace na plechy dojde ke zvětšení jejich tloušťky, a také k tomu, že materiál magnetického obvodu není vodivý po celé jeho délce. Tento jev je ve výpočtu respektován zavedením činitelem plnění železa, který udává poměr tloušťky samotného železa k celkové tloušťce plechu. Vzhledem k tomu, že je izolace plechů poměrně tenká, přibližně 0,002 mm, tak lze v praxi dosáhnout činitele plnění železa až 0,98. V případě použití tenkých plechů se tato hodnota snižuje. Obvykle se hodnota pohybuje v rozmezí 0,9 až 0,97 [2].

Negativní vliv na magnetické vlastnosti plechů má technologické opracování, a to hlavně stříhání. Vlivem stříhání dojde ke zvýšení měrných ztrát a k degradaci magnetizační

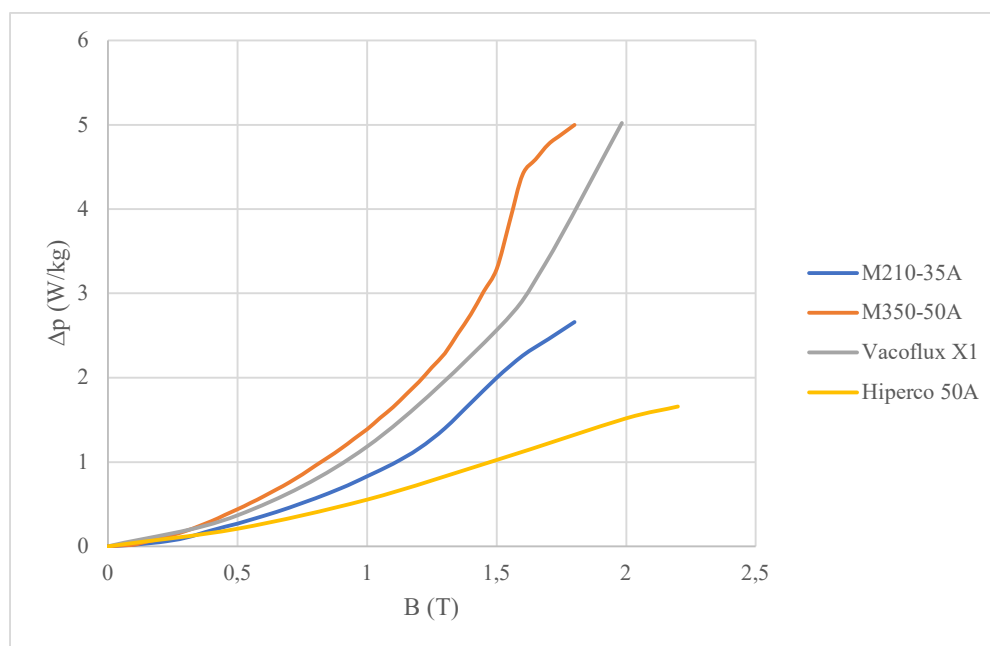
charakteristiky v oblasti stříhu. Magnetické vlastnosti plechů a pásů mohou být dále zhoršeny nárazy při přepravě a skladování. Takto vzniklé negativní vlivy lze odstranit regeneračním žiháním, čímž je však zvýšena cena materiálu [9].

1.4.2 Vlastnosti plechů ze slitiny kobaltu a železa

Materiály ze slitiny kobaltu a železa se vyznačují vysokou výkonovou hustotou a vysokou hodnotu sycení. Hlavní nevýhodou těchto materiálů je cena, která je až desetinásobná oproti plechů z křemíkové oceli. Z hlediska měrných ztrát jsou tyto materiály při 50 Hz srovnatelné s nejlepšími elektrotechnickými plechy ze slitiny křemíku a železa. Při použití těchto materiálů pro vyšší frekvence jsou měrné ztráty u těchto materiálů až o 40% nižší než u plechů z křemíkové oceli, jak plyne z [8]. Pro porovnání jsou přiloženy obrázky 1.3 a 1.4, na kterých jsou porovnány magnetizační charakteristiky a ztrátová čísla materiálů, které jsou použity pro navrhované stroje.

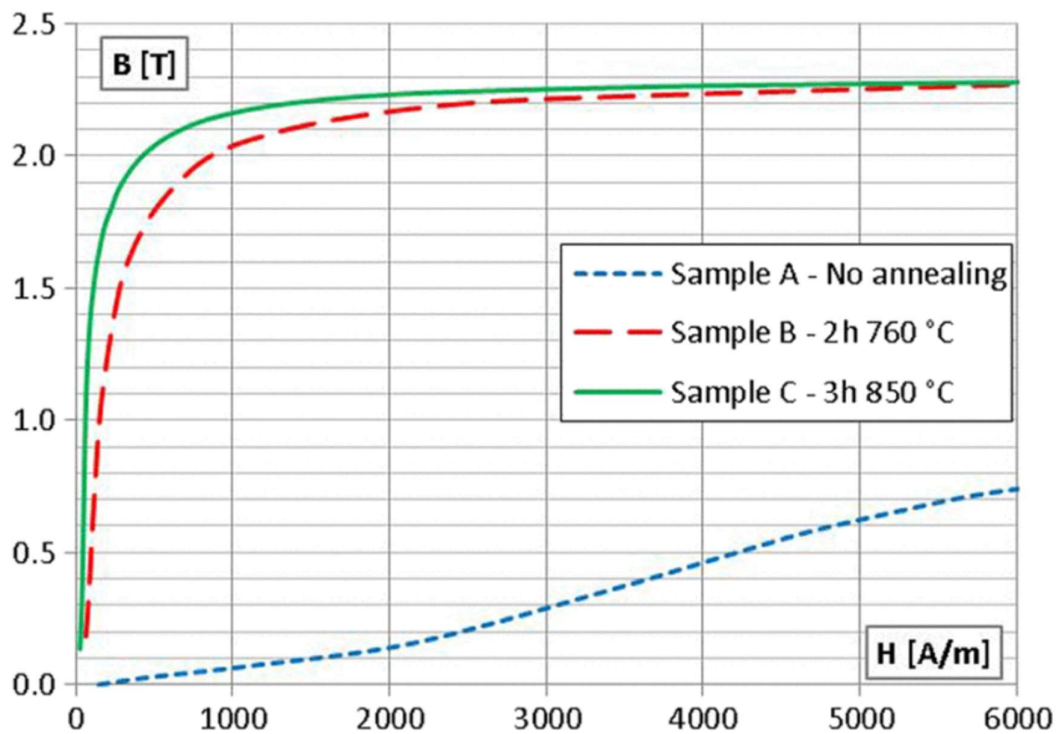


Obr. 1.3: Porovnání magnetizačních charakteristik použitých materiálů



Obr. 1.4: Porovnání ztrátových čísel použitých materiálů při frekvenci 50 Hz

Magnetické vlastnosti těchto materiálů jsou velmi závislé na technologii výroby, a to především na teplotě regenerativního žíhání materiálu, které se provádí po vyválnování a vystřížení plechů. Vliv teploty žíhání je podobněji popsán v [7], kde jsou porovnávány tři vzorky materiálu Hiperco 50A. Vzorek A je změřen bez žíhání, u vzorku B je zvolena teplota žíhání 760 °C po dobu dvou hodin, při které se dosáhne nejlepších mechanických vlastností materiálu a u vzorku C je zvolena teplota 850 °C po dobu tří hodin, při které je dosaženo nejlepších magnetických vlastností materiálu. U vzorku A se projevily velice slabé magnetické vlastnosti, jeho permeabilita je tak malá, že není vhodný pro použití v elektrických strojích. Z obrázku 1.5 lze vidět, že největší rozdíl mezi vzorkem B a C je v oblasti pod 2000 A/m. U obou vzorků je dosažena maximální indukce okolo 2,3 T. Z hlediska ztrátového čísla je na tom lépe vzorek C, u kterého vyšlo ztrátové číslo přibližně o 25% menší.



Obr. 1.5: Porovnání magnetizačních charakteristik jednotlivých vzorků, převzato z [7]

Plechý z těchto materiálů se vyrábí nejčastěji v tloušťkách 0,15, 0,2, 0,25 a 0,35 mm. Z toho plyne, že při použití těchto plechů je třeba počítat s nižším činitelem plnění železa, než v případě plechů z křemíkové oceli.

2 Elektromagnetický návrh asynchronního motoru s kotvou nakrátko na štitkové parametry

V této kapitole je přiblížen postup návrhu asynchronního motoru na zadané štitkové parametry. Pro výpočet stroje je třeba na základě zadaných hodnot nejprve určit hlavní rozměry stroje, a to vnitřní průměr statoru D a výpočtovou délku vzduchové mezery l_i . Tyto rozměry jsou svázány s výkonem, úhlovou rychlostí a elektromagnetickým zatížením. Při elektromagnetickém návrhu stroje jsou použity vztahy z kapitoly 6 [2].

2.1 Určení hlavních rozměrů

Zadané hodnoty:

$$P_n = 30 \text{ kW}$$

$$U_n = 400/690 \text{ V}$$

$$n_n = 1470 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$$

$$f = 50 \text{ Hz}$$

$$2p = 4$$

$$\cos \varphi = 0,87$$

$$\eta_{\min} = 92\%$$

Materiál plechů: M210-35A

Uzavřený stroj s vnějším vzduchovým chlazením

2.1.1 Vnitřní průměr statoru a výpočtová délka

Jelikož se jedná o návrh motoru se standardními rozměry jsou vnitřní průměr statoru a výpočtová délka určeny pomocí poměru těchto dvou parametrů:

$$\lambda = \frac{l'}{D} \cong \frac{\pi}{2 \cdot p} \cdot \sqrt[3]{p} = \frac{\pi}{2 \cdot 2} \cdot \sqrt[3]{2} = 0,9895 \quad (2.1)$$

Vnitřní průměr se určí ze vztahu:

$$D = \sqrt[3]{\frac{P_{\text{mech}}}{\lambda \cdot C_{\text{mech}} \cdot n_s}} = \sqrt[3]{\frac{30}{0,9895 \cdot 150 \cdot \frac{50}{2}}} = 200,7 \text{ mm} \quad (2.2)$$

Kde C_{mech} je výkonová konstanta stroje vztažená k výkonu na objemu stroje určená z grafu 6.3 [2] na základě výkonu na pól:

$$\frac{P}{2 \cdot p} = \frac{30}{2 \cdot 2} = 7,5 \text{ kW} \Rightarrow C_{\text{mech}} = 150 \text{ kW} \cdot \text{s} / \text{m}^3 \quad (2.3)$$

Výpočtová délka se určí z:

$$\lambda = \frac{l'}{D} \Rightarrow l' = \lambda \cdot D = 0,9895 \cdot 200,7 = 198,6 \text{ mm} \quad (2.4)$$

2.1.2 Moment stroje a tangenciální napětí

Na základě výkonu stroje a jmenovitých otáček lze dopočítat jmenovitý moment stroje:

$$M_n = \frac{P}{\omega_n} = \frac{60 \cdot P}{2\pi \cdot n_n} = \frac{60 \cdot 30000}{2\pi \cdot 1470} = 194,9 \text{ Nm} \quad (2.5)$$

Následně pak tangenciální napětí:

$$\sigma_{Ftan} = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot D^2 \cdot l'} = \frac{2 \cdot 30000}{\pi \cdot 0,2007^2 \cdot 0,1986} = 15,508 \text{ kPa} \quad (2.6)$$

2.1.3 Vzduchová mezera a délka statoru

Výpočet vzduchové mezery:

$$\begin{aligned} \delta &= 1,6 \cdot \frac{0,18 + 0,006 \cdot P^{0,4}}{1000} = 1,6 \cdot \frac{0,18 + 0,006 \cdot 30000^{0,4}}{1000} \\ &= 0,88 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 0,9 \text{ mm} \end{aligned} \quad (2.7)$$

kde konstanta 1,6 značí 60% zvětšení vzduchové mezery v důsledku zhoršeného chlazení uzavřeného stroje.

Výpočtová délka stroje je zmenšena v důsledku okrajového jevu, kdy je na koncích stroje magnetická indukce vytlačována ven ze stroje. Stroj se tedy z elektromagnetického hlediska jeví delší, než ve skutečnosti je, a proto je tato délka zmenšena o 2δ .

Reálná délka statoru:

$$l_s = l' - 2 \cdot \delta = 198,6 - 2 \cdot 0,9 = 196,8 \text{ mm} = 197 \text{ mm} \quad (2.8)$$

Vnitřní průměr statoru a vnější průměr rotoru

Na základě průměru vzduchové mezery je zvolen vnitřní průměr statoru, a to $D_s = 202 \text{ mm}$, a dále pak dopočteme vnější průměr rotoru z:

$$D_r = D_s - 2 \cdot \delta = 202 - 2 \cdot 0,9 = 200,2 \text{ mm} \quad (2.9)$$

2.2 Určení parametrů vinutí

V následující části je zvoleno vhodné vinutí pro stator a rotor. Vinutí je navrženo jako dvouvrstvé.

2.2.1 Počet drážek statoru

Vzhledem ke skutečnosti, že se motor s výkonem 30kW řadí do kategorie středních strojů, zvolíme parametr počtu drážek na pól a fázi $q = 4$. V tomto případě se jedná o střední cestu mezi počtem drážek a pólovou roztečí, kdy větší počet drážek znamená více počet cívek a tím i vyšší cenu.

Počet drážek je pak:

$$Q_s = 2 \cdot p \cdot m \cdot q = 2 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4 = 48 \quad (2.10)$$

2.2.2 Parametry vinutí

Počet cívek stroje

$$K = \frac{Q}{u} = \frac{48}{1} = 48 \quad (2.11)$$

kde $2 \cdot u$ je počet vrstev vinutí

Vzdálenost pólů v počtu drážek

$$t_{pd} = \frac{Q}{2 \cdot p} = \frac{48}{4} = 12 \quad (2.12)$$

Krok vinutí v počtu drážek

$$y_{1d} = t_{pd} \cdot \beta = 12 \cdot \frac{5}{6} = 10 \quad (2.13)$$

Krok vinutí v počtu cívkových stan

$$y_1 = 2 \cdot y_{1d} + 1 = 2 \cdot 10 + 1 = 21 \quad (2.14)$$

Spojkový krok

$$y_2 = 2 \cdot y_k - y_1 = 2 \cdot 1 - 21 = -19 \quad (2.15)$$

Kde y_k je krok mezi kontakty cívek

Počet svazků cívek

$$S_c = m' \cdot a = 6 \cdot 2 = 12 \quad (2.16)$$

kde m' je matematický počet fází

Počet cívek na fázi

$$S_f = \frac{S_c}{m} = \frac{12}{3} = 4 \quad (2.17)$$

Počet cívek v jednom svazku

$$K_1 = \frac{K}{S_c} = \frac{48}{12} = 4 \quad (2.18)$$

2.2.3 Drážková rozteč

$$t_d = \frac{\pi \cdot D_s}{Q_s} = \frac{\pi \cdot 202}{48} = 13,2 \text{ mm} \quad (2.19)$$

2.2.4 Pólová rozteč

$$t_p = \frac{\pi \cdot D_s}{2 \cdot p} = \frac{\pi \cdot 202}{4} = 158,7 \text{ mm} \quad (2.20)$$

2.2.5 Činitel vinutí

Kvůli potlačení vlivu vyšších harmonických zvolíme vinutí se zkráceným krokem $\beta = 5/6$.

$$\begin{aligned} k_v &= k_r \cdot k_y = \sin\left(\beta \cdot \frac{\pi}{2}\right) \cdot \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot m}\right)}{q \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot m \cdot q}\right)} \\ &= \sin\left(\frac{5}{6} \cdot \frac{\pi}{2}\right) \cdot \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot 3}\right)}{4 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot 3 \cdot 4}\right)} = 0,9659 \cdot 0,9577 = 0,925 \end{aligned} \quad (2.21)$$

2.2.6 Počet drážek rotoru a činitel natočení

Počet drážek rotoru je zvolen podle tabulek 7.3 a 7.5 [2], tak aby se eliminovali nežádoucí jevy jako vibrace a vznik nežádoucích momentů. Z tabulky 7.3 [2] je zvoleno $Q_r = 44$. Při této při kombinaci počtu drážek vznikají nežádoucí momenty v režimu brzda, a proto je zvoleno natočení drážky o jednu drážkovou rozteč statoru $s_{sp} = 1$. Natočení drážek potlačí vliv nežádoucího momentu v brzděném režimu, vyšších harmonických a sníží hluk motoru. Další možné počty drážek jsou znázorněny pomocí tabulky 7.5 [2]. V případě natočení je třeba počítat s činitelem natočení drážek podle:

$$k_{sq} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{s_{sp}}{m \cdot q}\right)}{\frac{\pi}{2} \cdot \frac{s_{sp}}{m \cdot q}} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{1}{3 \cdot 4}\right)}{\frac{\pi}{2} \cdot \frac{1}{3 \cdot 4}} = 0,997 \quad (2.22)$$

2.2.7 Určení parametrů magnetického obvodu

V následujícím kroku je zvolena magnetická indukce ve vzduchové mezeře a následně dypočítaná lineární proudová hustota. Magnetická indukce je volena z rozmezí 0,7-0,8T. V tomto případě je zvolena hodnota $B'_\delta = 0,8T$.

2.3 Lineární proudová hustota

$$A = \frac{\sqrt{2} \cdot \sigma_{Ftan}}{B_\delta \cdot \cos\xi} = \frac{\sqrt{2} \cdot 15508}{0,8 \cdot 0,8} = 34268 \text{ A/m} \quad (2.23)$$

Kde $\cos\xi$ je cosinus úhlu natočení mezi lineární proudovou hustotou a magnetickou indukci ve vzduchové mezeře.

2.3.1 Počet závitů v sérii

$$N_s = \frac{\sqrt{2} \cdot K_E \cdot U_n}{\omega \cdot k_v \cdot t_p \cdot \alpha_i \cdot B_\delta} = \frac{\sqrt{2} \cdot 0,97 \cdot 690}{\sqrt{3} \cdot 2\pi \cdot 50 \cdot 0,925 \cdot 0,1587 \cdot 0,66 \cdot 0,8} = 113 \quad (2.24)$$

kde:

K_E je činitel elektromotorické síly, který je se určí jako poměr mezi indukovaným napětím v motoru a svorkovým napětím, zde je zvolena hodnota $K_E = 0,97$.

α_i je činitel pólového krytí s hodnotou $\alpha_i = 0,66$.

2.3.2 Počet vodičů v drážce

V tomto kroku je třeba zvolit počet paralelních větví. Je zvolena hodnota $a = 2$.

$$z_{Qs} = \frac{2 \cdot a \cdot m}{Q_s} \cdot N_s = \frac{2 \cdot 2 \cdot 3}{48} \cdot 113 = 28,25 \quad (2.25)$$

Vzhledem k tomu, že vinutí ve stroji je dvouvrstvé, musí být počet vodičů v drážce celé sudé číslo, proto volíme hodnotu $z_{Qs} = 28$.

2.3.3 Skutečná počet závitů v sérii

$$N_s = \frac{Q_s \cdot z_{Qs}}{2 \cdot a \cdot m} = \frac{48 \cdot 28}{2 \cdot 2 \cdot 3} = 112 \quad (2.26)$$

2.3.4 Skutečná magnetická indukce ve vzduchové mezeře

$$B_{\delta} = \frac{\sqrt{2} \cdot K_E \cdot U_n}{\omega \cdot k_v \cdot t_p \cdot \alpha_i \cdot N_s} = \frac{\sqrt{2} \cdot 0,97 \cdot 690}{\sqrt{3} \cdot 2\pi \cdot 50 \cdot 0,925 \cdot 0,1587 \cdot 0,66 \cdot 112} = 0,81 \text{ T} \quad (2.27)$$

2.3.5 Určení šířky zubu statoru a rotoru

K dopočítání šířky obou zubů je třeba zvolit magnetickou indukci v zubu statoru v rozmezí 1,4-2,1T, v zubu rotoru v rozmezí 1,5-2,2T a činitel plnění železa $k_{Fe} = 0,97$. Pro stator je zvolena hodnota $B'_{ds} = 1,6 \text{ T}$ a pro rotor $B'_{dr} = 1,6 \text{ T}$. Šířka zubu statoru se určí ze vzorce:

$$b_{zs} = \frac{l' \cdot t_d}{k_{Fe} \cdot l} \cdot \frac{B_{\delta}}{B'_{ds}} + 0,1 = \frac{198,8 \cdot 14,3}{0,97 \cdot 197} \cdot \frac{0,81}{1,6} + 0,1 = 6,94 \text{ mm} \quad (2.28)$$

Analogicky pak šířka zubu rotoru:

$$b_{zr} = \frac{l' \cdot t_{dr}}{k_{Fe} \cdot l} \cdot \frac{B_{\delta}}{B'_{dr}} + 0,1 = \frac{198,8 \cdot 14,3}{0,97 \cdot 197} \cdot \frac{0,81}{1,6} + 0,1 = 7,5 \text{ mm} \quad (2.29)$$

Kde t_{dr} je drážková rozteč rotoru z:

$$t_{dr} = \frac{\pi \cdot D_r}{Q_r} = \frac{\pi \cdot 200,2}{44} = 14,3 \text{ mm} \quad (2.30)$$

2.4 Výpočet rozměrů drážky statoru

V první kroku se určí proud statorového vinutí, proud v tyči rotoru a proud v kruhu nakrátko. Dále se pomocí těchto hodnot dopočte průřez jednoho vodiče v drážce statoru, průřez tyče a průřez kruhu nakrátko. Pomocí hodnoty dopočtené v (2.34) se zvolí vhodný průměr žil jednoho vodiče a jejich počet. Dále se určí skutečný průřez jednoho vodiče a potřebná plocha drážky.

2.4.1 Proud ve statoru

$$I_s = \frac{P}{m \cdot \eta \cdot U_s \cdot \cos \varphi} = \frac{\sqrt{3} \cdot 30000}{3 \cdot 0,92 \cdot 690 \cdot 0,87} = 31,4 \text{ A} \quad (2.31)$$

2.4.2 Proud v tyčích rotoru

$$I_r = \frac{z_{Qs} \cdot Q_s}{a \cdot Q_r} \cdot I_s \cdot \cos \varphi = \frac{28 \cdot 48}{2 \cdot 44} \cdot 31,4 \cdot 0,87 = 416,7 \text{ A} \quad (2.32)$$

2.4.3 Proud v kruhu nakrátko

$$I_{kruh} = \frac{I_r}{2 \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot p}{Q_r}\right)} = \frac{109,6}{2 \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot 2}{44}\right)} = 1464,1 \text{ A} \quad (2.33)$$

2.4.4 Průřez jednoho vodiče v drážce

$$S_{cs0} = \frac{I_s}{a \cdot J_{sz}} = \frac{31,4}{2 \cdot 3,8} = 4,12 \text{ mm}^2 \quad (2.34)$$

kde J_{sz} je proudová hustota ve vodičích statoru. Tato hodnota je volena z rozmezí 3 – 8 A/mm². Jelikož se jedná o uzavřený stroj s vysokou účinností je zvolena hodnota $J_{sz} = 3,8 \text{ A/mm}^2$.

2.4.5 Skutečný průřez vodiče

Jeden vodič statoru je tvořen z 5 žil s průměrem $d_0 = 1 \text{ mm}$. Průměr 1 mm je zvolen z důvodů snadného tvarování do konečného tvaru cívky. Výsledný průřez je pak:

$$S_{cs} = 5 \cdot \frac{\pi \cdot d_0^2}{4} = 5 \cdot \frac{\pi \cdot 1^2}{4} = 3,927 \text{ mm}^2 \quad (2.35)$$

Skutečná proudová hustota je pak:

$$J_s = \frac{I_s}{a \cdot S_{cs}} = \frac{31,4}{2 \cdot 3,927} = 4 \text{ A/mm}^2 \quad (2.36)$$

2.4.6 Celkový průřez aktivní části drážky

$$S_{cuc} = \frac{z_{qs} \cdot S_{cs}}{k_{Cu}} = \frac{28 \cdot 3,927}{0,62} = 177,3 \text{ mm}^2 \quad (2.37)$$

Kde k_{Cu} je činitel plnění drážky s hodnotu $k_{Cu} = 0,62$

2.4.7 Průřez tyče rotoru

$$S_{cr} = \frac{I_r}{J_r} = \frac{416,7}{3,8} = 109,7 \text{ mm}^2 \quad (2.38)$$

kde J_r je proudová hustota v tyčích rotoru. Zde je hodnota volena v rozmezí 3 – 6 A/mm². Zde volíme hodnotu $J_r = 3,8 \text{ A/mm}^2$.

2.4.8 Průřez kruhu nakrátko

$$S_{ckruh} = \frac{I_{kruh}}{J_{kruh}} = \frac{1464,1}{4} = 366,1 \text{ mm}^2 \quad (2.39)$$

kde J_{kruh} je proudová hustota ve vodičích statoru. Hodnota je zvolena ze stejného rozmezí jako v předchozím kroku a volíme hodnotu $J_{kruh} = 4 \text{ A/mm}^2$.

2.4.9 Rozměry drážky statoru

Na statoru je zvolena drážka typu K. Před samotným výpočtem rozměrů drážky je třeba zvolit její určité rozměry. Zvolené rozměry jsou: $b_1 = 3 \text{ mm}$, $h_1 = 0,5 \text{ mm}$, $h_2 = 2,5 \text{ mm}$, $h_3 = 2 \text{ mm}$, $h_6 = 0,5 \text{ mm}$, $h' = 0,5 \text{ mm}$.

$$b_{4c} = \frac{\pi \cdot [(D_s + 2 \cdot (h_1 + h_2 + h_3))]}{Q_s} - 2 \cdot h_6 - b_{ds} \quad (2.40)$$

$$= \frac{\pi \cdot [202 + 2 \cdot (0,5 + 2,5 + 2)]}{48} - 2 \cdot 0,5 - 7,05 = 5,8 \text{ mm}$$

$$h_5 = 21,3 \text{ mm} \quad (2.41)$$

$$b_{5c} = b_{4c} + \frac{2 \cdot \pi \cdot h_5}{Q_s} = 5,8 \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot 21,3}{48} = 8,5 \text{ mm} \quad (2.42)$$

$$S_{Cuc} = \frac{b_{4c} + b_{5c}}{2} \cdot (h_6 + h') + \frac{\pi}{8} \cdot b_{5c}^2 = \frac{5,8 + 8,5}{2} \cdot (21,3 + 0,5) + \frac{\pi}{8} \cdot 8,5^2 \quad (2.43)$$

$$= 177,3 \text{ mm}^2$$

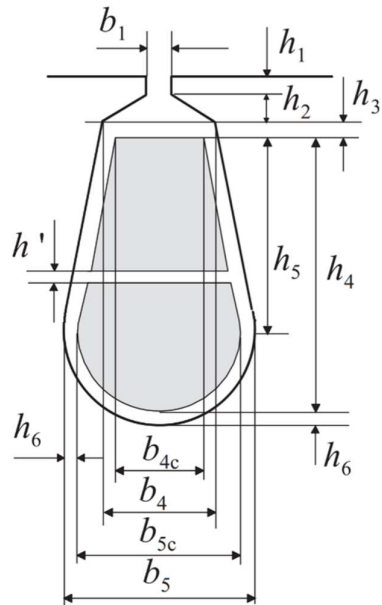
$$b_4 = \frac{\pi \cdot [(D_s + 2 \cdot (h_1 + h_2))]}{Q_s} - b_{ds} = \frac{\pi \cdot [202 + 2 \cdot (0,5 + 2,5)]}{48} - 7,05 \quad (2.44)$$

$$= 6,5 \text{ mm}$$

$$b_5 = b_{5c} + 2 \cdot h_6 = 8,5 + 2 \cdot 0,5 = 9,5 \text{ mm} \quad (2.45)$$

$$h_4 = h_5 + \frac{b_{5c}}{2} = 21,3 + \frac{8,5}{2} = 25,6 \text{ mm} \quad (2.46)$$

$$h_s = h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + h_6 = 31 \text{ mm} \quad (2.47)$$



Obr. 2.1: Drážka statoru, převzato z [2]

2.4.10 Rozměry drážky rotoru

Analogicky jako v kapitole 2.4.9 je třeba před výpočtem zvolit některé rozměry drážky. Zvolené rozměry jsou: $b_1 = 3 \text{ mm}$, $h_1 = 1 \text{ mm}$, $h_2 = 2 \text{ mm}$.

$$b_4 = \frac{\pi \cdot [(D_r - 2 \cdot (h_1 + h_2))]}{Q_r} - b_{zr} = \frac{\pi \cdot [200,2 - 2 \cdot (1 + 2)]}{44} - 7,6$$

$$= 6,4 \text{ mm}$$

$$h_5 = 21,3 \text{ mm} \quad (2.49)$$

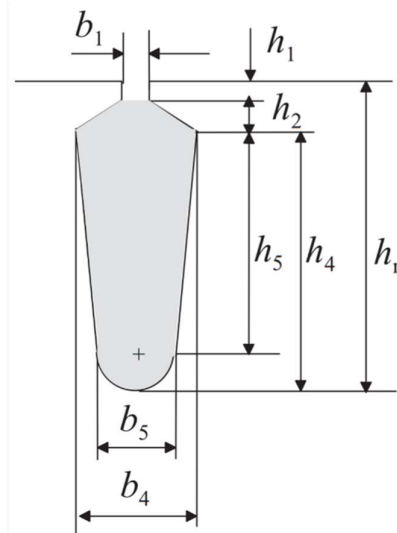
$$b_5 = b_4 - \frac{2 \cdot \pi \cdot h_5}{Q_r} = 6,4 - \frac{2 \cdot \pi \cdot 20}{44} = 3,5 \text{ mm} \quad (2.50)$$

$$S_{Cuc} = \frac{b_4 + b_5}{2} \cdot h_5 + \frac{\pi}{8} \cdot b_5^2 + \frac{b_1 + b_4}{2} \cdot h_2$$

$$= \frac{7,6 + 3,4}{2} \cdot 21,3 + \frac{\pi}{8} \cdot 3,5^2 + \frac{1 + 7,6}{2} \cdot 2 = 110,5 \text{ mm}^2 \quad (2.51)$$

$$h_4 = h_5 + \frac{b_5}{2} = 20 + \frac{3,5}{2} = 21,8 \text{ mm} \quad (2.52)$$

$$h_r = h_1 + h_2 + h_4 = 1 + 2 + 21,8 = 24,8 \text{ mm} \quad (2.53)$$



Obr. 2.2: Drážka rotoru, převzato z [2]

2.5 Výpočet magnetického obvodu

V následujících krocích se dopočítají magnetická napětí ve stroji. Pro určení magnetického napětí ve vzduchové mezeře je třeba určit hodnoty Carterova činitele statoru, rotoru a velikost ekvivalentní vzduchové mezery. Pro určení magnetických napětí v částech železa se nejdříve musí určit hodnoty magnetické indukce a následně odečíst hodnoty intenzity magnetického pole z magnetizační charakteristiky použitého materiálu. V případě tohoto stroje se jedná o materiál M210-35A [5].

2.5.1 Carterův činitel statoru

$$k_{Cs} = \frac{t_d}{t_d - \kappa_r \cdot b_1} = \frac{13,2}{13,2 \cdot 0,4021 \cdot 3} = 1,1 \quad (2.54)$$

kde hodnota κ se určí z:

$$\begin{aligned} \kappa_s &= \frac{2}{\pi} \cdot \left(\arctan \frac{b_1}{2 \cdot \delta} - \frac{2 \cdot \delta}{b_1} \cdot \ln \sqrt{1 + \left(\frac{b_1}{2 \cdot \delta} \right)^2} \right) \\ &= \frac{2}{\pi} \cdot \left(\arctan \frac{3}{2 \cdot 0,9} - \frac{2 \cdot 0,9}{3} \cdot \ln \sqrt{1 + \left(\frac{3}{2 \cdot 0,9} \right)^2} \right) = 0,402 \end{aligned} \quad (2.55)$$

Pomocí hodnoty dopočtené v (2.54) lze dopočítat velikost ekvivalentní vzduchové mezery z pohledu statoru pomocí vztahu:

$$\delta_{es} = k_{Cs} \cdot \delta = 1,1 \cdot 0,9 = 0,99 \text{ mm}$$

2.5.2 Carterův činitel rotoru

$$k_{Cr} = \frac{t_{dr}}{t_{dr} - \kappa_r \cdot b_1} = \frac{14,3}{14,3 \cdot 0,402 \cdot 3} = 1,086 \quad (2.56)$$

kde hodnota κ se určí z:

$$\begin{aligned} \kappa_r &= \frac{2}{\pi} \cdot \left(\arctan \frac{b_1}{2 \cdot \delta_{es}} - \frac{2 \cdot \delta_{es}}{b_1} \cdot \ln \sqrt{1 + \left(\frac{b_1}{2 \cdot \delta_{es}} \right)^2} \right) a \\ &= \frac{2}{\pi} \cdot \left(\arctan \frac{3}{2 \cdot 0,99} - \frac{2 \cdot 0,99}{3} \cdot \ln \sqrt{1 + \left(\frac{3}{2 \cdot 0,99} \right)^2} \right) \\ &\quad \cdot \ln \sqrt{1 + \left(\frac{3}{2 \cdot 0,99} \right)^2} = 0,402 \end{aligned} \quad (2.57)$$

Za pomoci znalosti Carterova činitele je možné určit ekvivalentní velikost vzduchové mezery podle:

$$\delta_e = k_{Cr} \cdot \delta_{es} = 1,086 \cdot 0,99 = 1,076 \text{ mm} \quad (2.58)$$

2.5.3 Magnetické napětí ve vzduchové mezeře

$$U_{m\delta} = \frac{B_\delta}{\mu_0} \cdot \delta_e = \frac{0,81}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot 1,076 = 691,1 \text{ A} \quad (2.59)$$

2.5.4 Magnetické napětí statoru

K určení magnetický napětí přes zuby použijeme Simpsonovo pravidlo. Tímto pravidle nahradíme integrál pro výpočet magnetického napětí vztahy pro rovnou část zubu a patu zubu ve tvaru:

$$U_{mzsr} = h_{d1} \cdot \frac{H_{z1} + 4 \cdot H_{z2} + H_{z3}}{6} \quad (2.60)$$

a

$$U_{mzsk} = h_{d2} \cdot \frac{H_{z3} + 4 \cdot H_{z4} + H_{z5}}{6} \quad (2.61)$$

kde H_{z1} je intezita magnetického pole odečtena z magnetizační křivky materiálu na základě hodnoty magnetické indukce B_{z1} v první části zubu.

H_{z2} je pak totožně jako H_{z1} , ale v druhé části zubu atd.

Výsledné magnetické napětí je pak součet hodnot z (2.60) a (2.61) ve tvaru:

$$U_{mzs} = U_{mzsr} + U_{mzsk} \quad (2.62)$$

Zdánlivá magnetická indukce v zubu se určí z:

$$B'_{z1} = \frac{l' \cdot t_{ds}}{k_{Fe} \cdot l \cdot b_{z1}} \cdot B_{\delta} = \frac{198,8 \cdot 13,2}{0,97 \cdot 197 \cdot 6,94} \cdot 0,81 = 1,6 \text{ T} \quad (2.63)$$

kde b_{z1} je šířka zubu v bodě 1 určena z:

$$b_{z1} = \frac{\pi \cdot (D_s + 2 \cdot (h_1 + h_2))}{Q_s} - b_4 - 0,1 \quad (2.64)$$

$$= \frac{\pi \cdot (202 + 2 \cdot (0,5 + 2,5))}{48} - 6,6 - 0,1 = 6,94 \text{ mm}$$

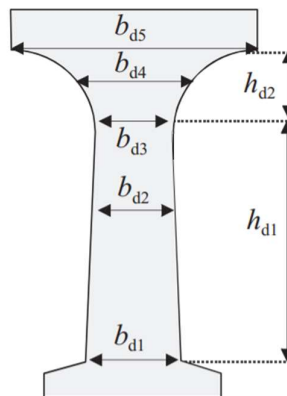
Jelikož část magnetického toku v důsledku nasycení magnetického obvodu je vytlačována do méně vodivé drážky, je třeba provést korekci magnetické indukce v zubu. Proto se zavádí činitel odlehčení k_d , který respektuje vliv nasycení magnetického obvodu. Výsledná magnetická indukce se určí ze vztahu:

$$B_z = B'_z - k_d \cdot \mu_0 \cdot H_z \quad (2.65)$$

kde k_d se určí jako poměr příčných řezů drážky a zubu z:

$$k_d = \frac{b_d \cdot l_s}{b_z \cdot l_s \cdot k_{Fe}} \quad (2.66)$$

Hodnota intenzity magnetického pole z BH charakteristiky materiálu M210-35A je $H_{z1} = 3450 \text{ A/m}$. Pro opakující výpočet je vytvořena tabulka s hodnotami v jednotlivých bodech zubů podle obr. 2.3.



Obr. 2.3: Zub s body, ve kterých je odečtena intenzita magnetického pole, převzato z [2]

Tab. 2.1: Hodnoty pro zub statoru

x	$b_{zx} [\text{mm}]$	$B_{zx} [\text{T}]$	$H_{zx} [\text{A/m}]$
1	6,94	1,6	3450
2	6,94	1,6	3450
3	6,94	1,6	3450
4	8,7	1,28	16
5	17,3	0,64	50

Nyní lze dosadit do rovnice (2.60) a (2.61), kde dostaneme:

$$U_{mzsr} = h_5 \cdot \frac{H_{z1} + 4 \cdot H_{z2} + H_{z3}}{6} = 21,3 \cdot \frac{3450 + 4 \cdot 3450 + 3450}{6} = 80,4 \text{ A} \quad (2.67)$$

a

$$U_{mzsk} = \frac{b_5}{2} \cdot \frac{H_{z3} + 4 \cdot H_{z4} + H_{z5}}{6} = \frac{9,6}{2} \cdot \frac{3450 + 4 \cdot 160 + 50}{6} = 3,3 \text{ A} \quad (2.68)$$

Výsledné magnetické napětí zubu rotoru je součet předchozích hodnot:

$$U_{mzs} = U_{mzsr} + U_{mzsk} = 80,4 + 3,3 = 83,7 \text{ A} \quad (2.69)$$

2.5.5 Magnetická napětí rotoru

Analogicky jako pro zub statoru je určeno magnetické napětí zubu rotoru.

Tab. 2.2: Hodnoty pro zub rotoru 1

x	$b_{dx} [mm]$	$B_{zx} [T]$	$H_{zx} [A/m]$
1	7,6	1,58	3150
2	7,6	1,58	3150
3	7,6	1,58	3150
4	8,09	1,48	1600
5	10,77	1,12	130

Magnetické napětí zubu rotoru je:

$$U_{mzrr} = (h_5 + h_2) \cdot \frac{H_{z1} + 4 \cdot H_{z2} + H_{z3}}{6} = (20 + 2) \cdot \frac{3150 + 4 \cdot 3150 + 3150}{6} = 69,3 \text{ A} \quad (2.70)$$

a

$$U_{mzrk} = \frac{b_5}{2} \cdot \frac{H_{z3} + 4 \cdot H_{z4} + H_{z5}}{6} = \frac{3,3}{2} \cdot \frac{3150 + 4 \cdot 1600 + 130}{6} = 0,3 \text{ A} \quad (2.71)$$

Výsledné magnetické napětí zubu rotoru je součet předchozích hodnot:

$$U_{mzr} = U_{mzrr} + U_{mzrk} = 69,6 + 0,3 = 69,6 \text{ A} \quad (2.72)$$

2.5.6 Ověření činitele pólového krytí

V tomto kroku je ověřena zvolená hodnota činitele pólového krytí.

$$\alpha_i = \frac{1,24 \cdot k_{sat} + 1}{1,42 \cdot k_{sat} + 1,57} = \frac{1,24 \cdot 0,217 + 1}{1,42 \cdot 0,217 + 1,57} = 0,6786 \quad (2.73)$$

kde k_{sat} je činitel saturace

$$k_{sat} = \frac{U_{mzs} + U_{mzr}}{U_{m\delta}} = \frac{83,7 + 69,6}{691,6} = 0,217 \quad (2.74)$$

Vzhledem k odlišnosti mezi zvoleným činitelem pólového krytí a činitelem pólového krytí vypočteného v tomto kroku je třeba zopakovat postup od kapitoly 2.3.2 s novou hodnotou činitele pólového krytí. Tento iterační proces se opakuje, dokud oba činitele nebudou stejné. Hodnoty po tomto cyklu jsou zobrazeny v příložené tabulce.

Tab. 2.3: Výsledek po iteracích

$\alpha_i [-]$	$B_\delta [T]$	$B_{zs1-3} [T]$	$B_{zs4} [T]$	$B_{zs5} [T]$
0,68	0,78	1,63	1,27	0,64

2.5.7 Magnetické napětí jha statoru

V tomto kroku je zvolena magnetická indukce ve jhu statoru $B_{js} = 1,4T$ podle tabulky 6.2 [2]. K určení magnetického napětí jha je nutné dopočítat výšku jha statoru.

$$h_{js} = \frac{\alpha_i \cdot B_\delta \cdot t_{ps} \cdot l'}{2 \cdot k_{Fe} \cdot l \cdot B_{js}} = \frac{0,66 \cdot 0,78 \cdot 13,2 \cdot 198,8}{2 \cdot 0,97 \cdot 197 \cdot 1,4} = 31,4 \text{ mm} \quad (2.75)$$

Před vypočtením magnetické napětí je odečtena z BH charakteristiky materiálu hodnota intenzity magnetického pole pro zvolenou indukci ve jhu $H_{js} = 490 \text{ A/m}$. Magnetické napětí je pak:

$$U_{mjs} = c \cdot H_{js} \cdot \frac{\pi \cdot (D_s + 2 \cdot h_s + h_{js})}{2 \cdot p} \quad (2.76)$$

$$= 0,27 \cdot 490 \cdot \frac{\pi \cdot (202 + 2 \cdot 31 + 31,4)}{2 \cdot 2} = 30,7 \text{ A}$$

kde c je konstanta odečtená z grafu 3.17 [2] s hodnotou $c = 0,27$.

2.5.8 Magnetické napětí jha rotoru

Analogicky jako pro jho statoru lze dopočítat magnetické napětí pro rotor. Indukce zvolená ve jhu rotoru je $B_{jr} = 1,4T$.

$$h_{jr} = \frac{\alpha_i \cdot B_\delta \cdot t_{ps} \cdot l'}{2 \cdot k_{Fe} \cdot l \cdot B_{jr}} = \frac{0,66 \cdot 0,78 \cdot 13,2 \cdot 198,8}{2 \cdot 0,97 \cdot 197 \cdot 1,4} = 31,4 \text{ mm} \quad (2.77)$$

Hodnota intenzity magnetického pole z BH charakteristiky materiálu je jhu $H_{jr} = 490 \text{ A/m}$. Magnetické napětí je pak:

$$\begin{aligned}
 U_{mjs} &= c \cdot H_{js} \cdot \frac{\pi \cdot (D_r - 2 \cdot h_s - h_{jr})}{2 \cdot p} \\
 &= 0,27 \cdot 490 \cdot \frac{\pi \cdot (200,2 - 2 \cdot 24,7 - 31,4)}{2 \cdot 2} = 22,9 \text{ A}
 \end{aligned}
 \tag{2.78}$$

2.5.9 Vnější průměr statoru a vnitřní průměr rotoru

Nyní jsou určeny všechny dílčí velikosti statoru a rotoru, a proto lze dopočítat vnější průměr statoru a vnitřní průměr rotoru podle:

$$D_e = D_s + 2 \cdot (h_s + h_{js}) = 202 + 2 \cdot (31 + 31,4) = 237 \text{ mm} \tag{2.79}$$

$$D_i = D_r - 2 \cdot (h_r + h_{jr}) = 200,2 - 2 \cdot (24,7 + 31,4) = 88 \text{ mm} \tag{2.80}$$

2.6 Určení parametrů náhradního schématu

Při výpočtu asynchronního motoru je nutné znát parametry náhradního schématu stroje. Pomocí těchto parametrů lze určit vlastností stroje, ztráty stroje a následně jeho účinnost. Parametry náhradního schématu jsou určeny pomocí postupu z [2] a [4].

2.6.1 Magnetizační reaktance

$$X_\mu = \omega \cdot L_\mu = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 84,26 = 26,47 \ \Omega \tag{2.81}$$

Kde L_μ je magnetizační indukce jedné fáze:

$$\begin{aligned}
 L_\mu &= \alpha_i \cdot \frac{2 \cdot \mu_0 \cdot t_p}{\pi \cdot p \cdot \delta_e} \cdot (k_v \cdot N_s)^2 \\
 &= 0,66 \cdot \frac{2 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 158,65}{\pi \cdot 2 \cdot 1,076} \cdot (0,925 \cdot 112)^2 \\
 &= 84,26 \text{ mH}
 \end{aligned}
 \tag{2.82}$$

Magnetizační proud je:

$$I_\mu = \frac{U_{nf} \cdot k_E}{X_\mu} = \frac{400 \cdot 0,97}{26,47} = 14,44 \text{ A} \tag{2.83}$$

2.6.2 Odpor respektující ztráty v železe

$$R_{Fe} = \frac{3 \cdot (k_E \cdot U^2)}{\Delta P_{Fe}} = \frac{3 \cdot (0,97 \cdot 400^2)}{247} = 1827 \ \Omega \tag{2.84}$$

2.6.3 Odpor vinutí statoru

K určení odporu vinutí statoru je nutné nejdříve dopočítat délku jednotlivých částí vinutí.

Střední šířka cívky:

$$b_c = \frac{\pi \cdot (D_i + h_s)}{2 \cdot p} \cdot \beta = \frac{\pi \cdot (202 + 31)}{4} \cdot \frac{5}{6} = 152,6 \text{ mm} \quad (2.85)$$

Délka čela

$$l_\xi = K_\xi \cdot b_c + 2 \cdot B = 1,55 \cdot 152,6 + 2 \cdot 10 = 256,5 \text{ mm} \quad (2.86)$$

kde B je délka přímé části cívky při výstupu z drážky s hodnotu $B = 10 \text{ mm}$

K_ξ je činitel pro výpočet rozměrů čel vsypávaného vinutí určený z tab. 6.19 [4]

Vyložení čela

$$l_v = K_v \cdot b_c + 2 \cdot B = 0,5 \cdot 152,6 + 2 \cdot 5 = 86,3 \text{ mm} \quad (2.87)$$

kde K_v je činitel pro výpočet rozměrů čel vsypávaného vinutí určený z tab. 6.19 [4]

Střední délka závitu

$$l_{av} = 2 \cdot (l_d + l_\xi) = 2 \cdot (197 + 256,5) = 906,6 \text{ mm} \quad (2.88)$$

kde l_d je délka drážky a rovna délce statoru $l_d = l_s = 197 \text{ mm}$

Celková délka vodičů jedné fáze

$$L = l_{av} \cdot N = 906,6 \cdot 112 = 101,54 \text{ m} \quad (2.89)$$

Odpor jedné fáze statoru

$$R_1 = \rho \cdot \frac{L}{S_{ef} \cdot a} = 1,69 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{101,54}{3,92 \cdot 10^{-6} \cdot 2} = 0,219 \Omega \quad (2.90)$$

2.6.4 Odpor jedné fáze rotoru

Odpor jedné fáze rotoru je součtem odporu jedné tyče a části kruhu nakrátko mezi dvěma tyčemi. Klec je vyrobena z hliníku

Odpor tyče

$$R_t = \rho_{Al} \cdot \frac{l_t}{S_{cr}} \cdot k = 2,8 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,197}{109,7 \cdot 10^{-6}} \cdot 1 = 50,4 \cdot 10^{-6} \Omega \quad (2.91)$$

kde l_t je délka tyče rotoru rovna délce statoru $l_t = l_s = 197 \text{ mm}$

Odpor části kruhu mezi dvěma tyčemi

$$R_k = \rho \cdot \frac{\pi \cdot D_{kn}}{Q_k \cdot S_k} = 2,8 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{\pi \cdot 0,1765}{44 \cdot 366 \cdot 10^{-6}} = 0,96 \cdot 10^{-6} \Omega \quad (2.92)$$

kde D_{kn} je střední průměr kruhu nakrátko určený z:

$$D_{kn} = D_2 - a_k = 200,2 - 23,7 = 176,5 \text{ mm} \quad (2.93)$$

kde a_k je výška kruhu nakrátko, která je rovna výšce tyče

Odpor jedné fáze rotoru

$$R_2 = R_t + 2 \cdot \frac{R_k}{\Delta^2} = 50,4 \cdot 10^{-6} + 2 \cdot \frac{0,96 \cdot 10^{-6}}{0,284^2} = 74,16 \cdot 10^{-6} \Omega \quad (2.94)$$

kde Δ koeficient pro přepočítání proudu v tyči na proud v kruhu z:

$$\Delta = 2 \cdot \sin \frac{\pi \cdot p}{Q_r} = 2 \cdot \sin \frac{\pi \cdot 2}{44} = 0,284 \quad (2.95)$$

Hodnota získaná v (2.94) je hodnota vztažená k rotoru, a pro použití hodnoty odporu rotoru je třeba přepočítat tento odpor a statorovou stranu:

$$\begin{aligned} R'_2 &= R_2 \cdot p = R_2 \cdot 4 \cdot m \cdot \frac{(N_1 \cdot k_v)^2}{Q_2} = 74,15 \cdot 10^{-6} \cdot 4 \cdot 3 \cdot \frac{(112 \cdot 0,925)^2}{44} \\ &= 0,217 \Omega \end{aligned} \quad (2.96)$$

2.6.5 Rozptylová reaktance statoru

K výpočtu rozptylové reaktance je nejdříve potřeba určit hodnoty činitele magnetické vodivosti drážky λ_d a čel λ_c . Další potřebnou hodnotou je diferenční rozptyl, který je určen pomocí magnetizační indukčnosti stroje a Göergesova obrazce vinutí stroje.

Činitel magnetické vodivosti drážky statoru

$$\begin{aligned} \lambda_{d1} &= \frac{h_4}{3 \cdot b_4} \cdot k_\beta + \left(0,785 - \frac{b_1}{b_4} + \frac{3 \cdot h_2}{2 \cdot b_4} + \frac{h_1}{b_1} \right) \cdot k'_\beta \\ &= \frac{25,6}{3 \cdot 6,6} \cdot 0,906 + \left(0,785 - \frac{3}{6,6} + \frac{3 \cdot 2,5}{2 \cdot 6,6} + \frac{0,5}{3} \right) \cdot 0,875 \\ &= 2,111 \end{aligned} \quad (2.97)$$

kde k_β a k'_β jsou činitele respektující zkrácení kroku a určí se z:

$$k_\beta = 0,25 \cdot (1 + 3 \cdot k'_\beta) = 0,25 \cdot (1 + 3 \cdot 0,875) = 0,906 \quad (2.98)$$

$$k'_\beta = 0,25 \cdot (1 + 3 \cdot \beta) = 0,25 \cdot \left(1 + 3 \cdot \frac{5}{6} \right) = 0,875 \quad (2.99)$$

Činitel magnetické vodivosti čel statoru

$$\begin{aligned} \lambda_{c1} &= 0,34 \cdot \frac{q}{l} \cdot (l_c - 0,64 \cdot \beta \cdot t_p) \\ &= 0,34 \cdot \frac{4}{197} \cdot (256,5 - 0,64 \cdot \frac{5}{6} \cdot 158,65) = 1,756 \end{aligned} \quad (2.100)$$

Činitel diferenční rozptylu vinutí statoru z Göergesova obrazce vychází $\tau_{dif} = 0,0064$. Indukčnost diferenčního rozptylu se pak určí z:

$$L_{dif} = \tau_{dif} \cdot L_{\mu} = 0,0064 \cdot 84,26 = 0,547 \text{ mH} \quad (2.101)$$

Rozptylová reaktance statoru je:

$$\begin{aligned} X_{1\sigma} &= 2\pi \cdot f \cdot (2 \cdot \mu_0 \cdot N_s^2 \cdot \frac{l_s}{p \cdot q} \cdot (\lambda_{d1} + \lambda_{\xi 1}) + L_{dif}) \\ &= 2\pi \cdot 50 \cdot (2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 112^2 \cdot \frac{197}{2 \cdot 4} \cdot (2,111 + 1,756) \\ &\quad + 0,547) = 1,1 \Omega \end{aligned} \quad (2.102)$$

2.6.6 Rozptylová reaktance rotoru

Podobně jako v předchozí kapitole je třeba určit jednotlivé činitele magnetické vodivosti.

Činitel magnetické vodivosti drážky rotoru

$$\begin{aligned} \lambda_{d2} &= \frac{h_2}{3 \cdot b_4} \cdot \left(1 - \frac{\pi \cdot b_4^2}{8 \cdot S_{cr}}\right)^2 \cdot k_d + \frac{h_1}{b_1} = \\ &= \frac{2}{3 \cdot 6,3} \cdot \left(1 - \frac{\pi \cdot 6,3^2}{8 \cdot 109,7}\right)^2 \cdot 1 + \frac{1}{3} = 0,832 \end{aligned} \quad (2.103)$$

kde $k_d = 1$ pro jmenovitý chod

Činitel magnetické vodivosti kruhu

$$\begin{aligned} \lambda_{\xi 2} &= \frac{2,3 \cdot D_{kn}}{Q_r \cdot l' \cdot \Delta^2} \cdot \log \frac{4,7 \cdot D_{kn}}{2 \cdot a_k + b_k} \\ &= \frac{2,3 \cdot 176,5}{44 \cdot 198,8 \cdot 0,285^2} \cdot \log \frac{4,7 \cdot 176,5}{2 \cdot 23,7 + 15,4} = 0,643 \end{aligned} \quad (2.104)$$

Kde b_k je šířka kruhu nakrátko určená z:

$$b_k = \frac{S_{Ckruh}}{a_k} = \frac{366}{23,7} \quad (2.105)$$

Činitel magnetické vodivosti diferenčního rozptylu klece nakrátko

$$\lambda_{diff1} = \frac{t_{dr}}{12 \cdot \delta \cdot k_c} \cdot \xi_2 = \frac{14,3}{12 \cdot 0,9 \cdot 1,086} \cdot 0,954 = 1,163 \quad (2.106)$$

kde ξ_2 je z:

$$\xi = 1 + \frac{1}{5} \cdot \left(\frac{\pi \cdot p}{Q_r}\right)^2 - \frac{\Delta_z}{1 - \left(\frac{p}{Q_r}\right)^2} = 1 + \frac{1}{5} \cdot \left(\frac{\pi \cdot 2}{44}\right)^2 - \frac{0,285}{1 - \left(\frac{2}{44}\right)^2} = 0,954 \quad (2.107)$$

Rozptylová reaktance klece nakrátko vztažená na rotor

$$\begin{aligned} X_{2\sigma} &= 2\pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot l' \cdot (\lambda_{d1} + \lambda_{\zeta 1} + \lambda_{diff1}) \\ &= 2\pi \cdot 50 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 198,8 \cdot (0,832 + 0,643 + 1,163) \\ &= 0,235 \cdot 10^{-3} \Omega \end{aligned} \quad (2.108)$$

Rozptylová reaktance klece nakrátko

$$\begin{aligned} X'_{2\sigma} &= X_{2\sigma} \cdot 4 \cdot m \cdot \frac{(N_s \cdot k_v)^2}{Q_2} = 0,235 \cdot 10^{-3} \cdot 4 \cdot 3 \cdot \frac{(112 \cdot 0,925)^2}{44} \\ &= 0,688 \Omega \end{aligned} \quad (2.109)$$

2.6.7 Ověření činitele elektromotorické síly

V tomto kroku je ověřen činitel elektromotorické síly k_E .

$$\begin{aligned} \Delta u &= \sqrt{(R_1 \cdot I_\mu)^2 + (X_{1\sigma} \cdot I_\mu)^2} = \sqrt{(0,219 \cdot 14,66)^2 + (1,306 \cdot 14,66)^2} \\ &= 18,1 V \end{aligned} \quad (2.110)$$

$$k_E = \frac{U_i}{U_f} = \frac{U_f - \Delta u}{U_f} = \frac{400 - 18,1}{400} = 0,955 \quad (2.111)$$

Nyní, když je určen skutečný činitel elektromotorické síly, je třeba přepočítat celý návrh s novou hodnotou k_E , který je vypočten v tomto kroku.

2.7 Ztráty a účinnost

V této kapitole se na základě dopočtení ztrát ve stroji ověří zadaná hodnota účinnosti. Určení ztrát stroje je převzato z [4].

2.7.1 Hlavní ztráty v železe

Tyto ztráty se vztahují pouze na magnetický obvod statoru. Z důvodu závislosti těchto ztrát na frekvenci v mocnině a nízké frekvence v magnetickém obvodu rotoru můžeme tyto ztráty v rotou zanedbat. K určení hlavních ztrát v železe je nutné znát hmotnosti jednotlivých částí magnetického obvodu.

Hmotnost jha statoru

$$\begin{aligned}
 m_{js} &= \frac{\pi}{4} \cdot (D_e^2 - (D_e - 2 \cdot h_{js})^2) \cdot l_s \cdot k_{Fe} \cdot \rho_{FE} \\
 &= \frac{\pi}{4} \cdot (327^2 - (327 - 2 \cdot 31,4)^2) \cdot 197 \cdot 0,97 \cdot 7600 \\
 &= 42,3 \text{ kg}
 \end{aligned} \tag{2.112}$$

Ztráty v želez jha

$$\begin{aligned}
 \Delta P_{Fej} &= \Delta p_{1,5} \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^\beta \cdot \left(\frac{B_{js}}{1,5}\right)^2 \cdot k_{dj} \cdot m_{js} \\
 &= 2 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1,5} \cdot \left(\frac{1,4}{1,5}\right)^2 \cdot 1,6 \cdot 42,3 = 118 \text{ W}
 \end{aligned} \tag{2.113}$$

Kde k_{dj} je činitel uvažující vliv nerovnoměrnosti rozložení toku v částek magnetického obvodu a vliv technologie výroby statorového svazku

Hmotnost zubů statoru

$$\begin{aligned}
 m_{zs} &= h_s \cdot b_{zs} \cdot Q_s \cdot l_s \cdot k_{Fe} \cdot \rho_{FE} \\
 &= 31 \cdot (7,04 + 0,3) \cdot 48 \cdot 197 \cdot 0,97 \cdot 7600 = 15,9 \text{ kg}
 \end{aligned} \tag{2.114}$$

Ztráty v železe zubů statoru

$$\begin{aligned}
 \Delta P_{Fez} &= \Delta p_{1,5} \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^\beta \cdot \left(\frac{B_{zs}}{1,5}\right)^2 \cdot k_{dz} \cdot m_{zs} = 2 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^2 \cdot \left(\frac{1,4}{1,5}\right)^2 \cdot 1,8 \cdot 15,9 \\
 &= 65,14 \text{ W}
 \end{aligned} \tag{2.115}$$

2.7.2 Povrchové ztráty

Povrchové ztráty ve statoru

$$\begin{aligned}
 \Delta P_{\delta ps} &= p_{\delta ps} \cdot (t_d - b_1) \cdot Q_s \cdot l_s = 97,36 \cdot (13,2 - 3) \cdot 48 \cdot 197 \\
 &= 6,12 \text{ W}
 \end{aligned} \tag{2.116}$$

kde $p_{\delta ps}$ jsou povrchové ztráty vztažené na 1 m^2 určené z:

$$\begin{aligned}
 p_{\delta ps} &= 0,5 \cdot k_{01} \cdot \left(\frac{Q_r \cdot n}{10000}\right)^{1,5} \cdot (B_{01} \cdot t_d \cdot 10^3)^2 \\
 &= 0,5 \cdot 1,6 \cdot \left(\frac{44 \cdot 1500}{10000}\right)^{1,5} \cdot (0,195 \cdot 13,2 \cdot 10^3)^2 \\
 &= 97,36 \text{ W/m}^2
 \end{aligned} \tag{2.117}$$

kde k_{01} je činitel respektující opracování povrchu hlav zubů s hodnotu $k_{01} = 1,6$

B_{01} je amplituda pulzací ve vzuchové mezeře určené z:

$$B_{01} = \beta_{01} \cdot k_{cs} \cdot B_\delta = 0,22 \cdot 1,1 \cdot 0,81 = 0,195 \tag{2.118}$$

Povrchové ztráty v rotoru

$$\begin{aligned}\Delta P_{\delta pr} &= p_{\delta pr} \cdot (t_{dr} - b_1) \cdot Q_r \cdot l_s = 173,1 \cdot (14,3 - 3) \cdot 44 \cdot 197 \\ &= 16,93 \text{ W}\end{aligned}\quad (2.119)$$

kde $p_{\delta pr}$ jsou povrchové ztráty vztažené na 1 m^2 určené z:

$$\begin{aligned}p_{\delta pr} &= 0,5 \cdot k_{02} \cdot \left(\frac{Q_s \cdot n}{10000}\right)^{1,5} \cdot (B_{02} \cdot t_{dr} \cdot 10^3)^2 \\ &= 0,5 \cdot 1,6 \cdot \left(\frac{48 \cdot 1500}{10000}\right)^{1,5} \cdot (0,316 \cdot 14,3 \cdot 10^3)^2 \\ &= 173,1 \text{ W/m}^2\end{aligned}\quad (2.120)$$

kde k_{02} je činitel respektující opracování povrchu hlav zubů s hodnotu $k_{01} = 1,6$

B_{02} je amplituda pulzací ve vzuchové mezeře určené z:

$$B_{02} = \beta_{02} \cdot k_{cr} \cdot B_{\delta} = 0,36 \cdot 1,086 \cdot 0,81 = 0,316 \quad (2.121)$$

2.7.3 Pulzační ztráty

Pulzační ztráty v zubech statoru

$$\begin{aligned}\Delta P_{pzs} &= 0,11 \cdot \left(\frac{Q_r \cdot n}{10000} \cdot B_{ps}\right)^2 \cdot m_{zs} = 0,11 \cdot \left(\frac{44 \cdot 1500}{10000} \cdot 0,059\right)^2 \cdot 15,9 \\ &= 26,44 \text{ W}\end{aligned}\quad (2.122)$$

kde B_{p1} je amplita pulzací v zubech statoru určená z:

$$B_{ps} = \frac{\gamma_s \cdot \delta}{2 \cdot t_d} \cdot B_{zs} = \frac{1,236 \cdot 0,9}{2 \cdot 13,2} \cdot 1,6 = 0,059$$

kde γ_s je určeno z:

$$\gamma_s = \frac{\left(\frac{b'_1}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{b'_1}{\delta}} = \frac{\left(\frac{2,86}{0,9}\right)^2}{5 + \frac{2,86}{0,9}} = 1,236 \quad (2.123)$$

Pulzační ztráty v zubech rotoru

$$\begin{aligned}\Delta P_{pZR} &= 0,11 \cdot \left(\frac{Q_s \cdot n}{10000} \cdot B_{pr}\right)^2 \cdot m_{zr} \\ &= 0,11 \cdot \left(\frac{48 \cdot 1500}{10000} \cdot 0,063\right)^2 \cdot 7,05 = 16,16 \text{ W}\end{aligned}\quad (2.124)$$

kde B_{p1} je amplita pulzací v zubech statoru určená z:

$$B_{pr} = \frac{\gamma_r \cdot \delta}{2 \cdot t_{dr}} \cdot B_{zr} = \frac{1,33 \cdot 0,9}{2 \cdot 14,3} \cdot 1,57 = 0,063 \quad (2.125)$$

kde γ_r je určeno z:

$$\gamma_r = \frac{\left(\frac{b_1}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{b_1}{\delta}} = \frac{\left(\frac{3}{0,9}\right)^2}{5 + \frac{3}{0,9}} = 1,333 \quad (2.126)$$

2.7.4 Celkové ztráty v železe

Celkové dodatečné ztráty

$$\begin{aligned} \Delta P_{Fep} &= \Delta P_{\delta ps} + \Delta P_{\delta pr} + \Delta P_{ps} + \Delta P_{pr} = 6,11 + 16,93 + 26,44 + 16,16 \\ &= 65,64 \text{ W} \end{aligned} \quad (2.127)$$

Celkové ztráty v železe

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_{Fej} + \Delta P_{Fez} + \Delta P_{Fep} = 118 + 65,15 + 65,64 = 248,79 \text{ W} \quad (2.128)$$

2.7.5 Jouleovy ztráty

Jouleovy ztráty ve vinutí statoru

$$\Delta P_{js} = m_1 \cdot I_1^2 \cdot R_1 = 3 \cdot 31,4^2 \cdot 0,219 = 644,8 \text{ W} \quad (2.129)$$

Jouleovy ztráty ve vinutí rotoru

$$\begin{aligned} \Delta P_{jr} &= m_2 \cdot (I_r^2 \cdot R_t + I_{kruh}^2 \cdot R_k) \\ &= 44 \cdot (416,7^2 \cdot 50,4 \cdot 10^{-6} + 1464,1^2 \cdot 9,6 \cdot 10^{-7}) \\ &= 475,7 \text{ W} \end{aligned} \quad (2.130)$$

2.7.6 Mechanické ztráty

$$\Delta P_m = K_T \cdot \left(\frac{n}{1000}\right)^2 \cdot (10 \cdot D_s)^3 = 6 \cdot \left(\frac{1500}{1000}\right)^2 \cdot (10 \cdot 202)^3 = 111,27 \text{ W} \quad (2.131)$$

2.7.7 Dodatečné ztráty

Dodatečné ztráty jsou vypočteny jako 1 % z jmenovitého výkonu stoje. V tomto případě je hodnota těchto ztrát zvětšena oproti normě, která udává že odpovídají 0,5 % z jmenovitého výkonu, a to z důvodu použití klece nakrátko s natočenými drážkami.

$$\Delta P_d = \frac{1}{100} \cdot P_2 = \frac{1}{100} \cdot 30000 = 300 \text{ W} \quad (2.132)$$

2.7.8 Účinnost

Celkové ztráty ve stroji

$$\begin{aligned}\Delta P &= \Delta P_{Fe} + \Delta P_j + \Delta P_m + \Delta P_d = 248,79 + 1120 + 111,27 + 300 \\ &= 1780,8 \text{ W}\end{aligned}\quad (2.133)$$

Účinnost

$$\eta = \frac{P_n}{P_n + \Delta P} \cdot 100 = \frac{30000}{30000 + 1897,9} \cdot 100 = 94,1\% \quad (2.134)$$

Vypočtená účinnost v tomto kroku se od zvolené liší, je třeba provést několik iterací a přepočítat celý návrh s touto účinností. Po třech iteracích se účinnost mění již jen minimálně a ustálila se na hodnotě $\eta = 94,54\%$, satorový proud má konečnou hodnotu $I_1 = 30,5 \text{ A}$.

2.7.9 Výkonová hustota stroje

Výkonová hustota stroje je vypočtena jako podíl mechanického výkonu a hmotnosti aktivních částí stroje. Hmotnost jednotlivých částí je určena pomocí programu ANSYS RMXprt.

$$p_d = \frac{P_2}{m_c} = \frac{30000}{110,8} = 270,8 \text{ W/kg} \quad (2.135)$$

kde m_c je hmotnost aktivních částí stroje určená z:

$$m_c = m_{Fes} + m_{Fer} + m_{Cu} + m_{Al} = 57,6 + 29 + 20,5 + 3,7 = 110,8 \text{ kg} \quad (2.136)$$

kde m_{Fes} je hmotnost železa statoru

m_{Fer} je hmotnost železa rotoru

m_{Cu} je hmotnost statorového vinutí

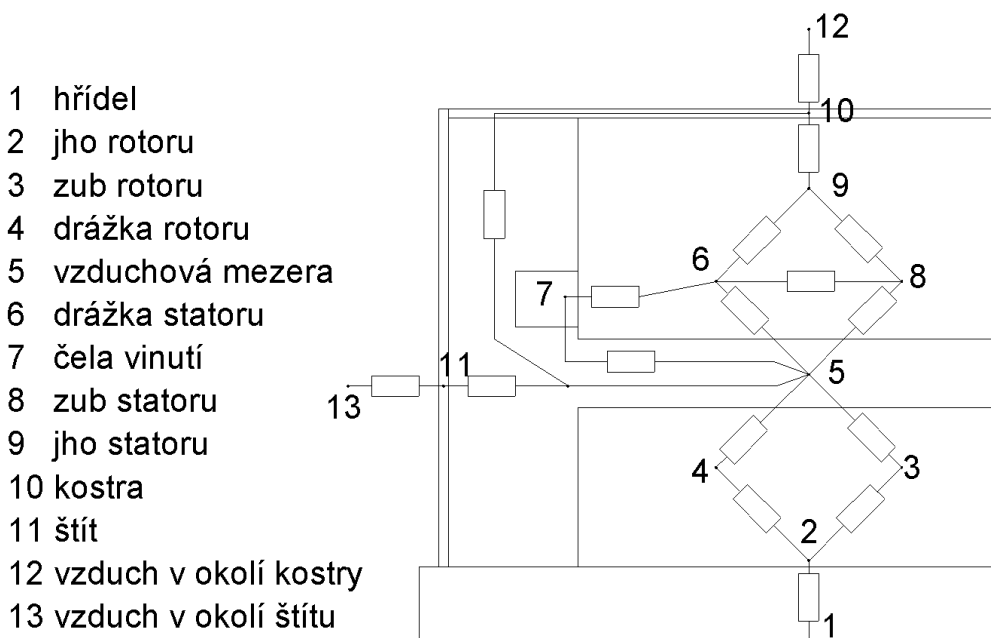
m_{Al} je hmotnost klece nakrátko

3 Tepelný a ventilační výpočet stroje

Pro výpočet oteplení stroje je použita metoda tepelné sítě. Pro výpočet ventilace stroje je použita přibližná metoda, která je založena na porovnání průtoku vzduchu potřebného pro chlazení motoru a průtoku, který je možné získat při daných rozměrech a konstrukci. Při tepelném a ventilačním výpočtu je postupováno podle [4] a [6].

3.1 Model náhradní tepelné sítě

Pro vypočtený stroj je sestaven model tepelné sítě respektující tepelné vazby ve stroji. Model sítě je sestaven pro čtvrtinu stroje a slouží především k výpočtu oteplení vinutí, které je důležité pro volbu teplotní třídy izolace. Na přiloženém obrázku 3.1 je znázorněna sestavená tepelná síť.



- 1 hřídel
- 2 jho rotoru
- 3 zub rotoru
- 4 drážka rotoru
- 5 vzduchová mezera
- 6 drážka statoru
- 7 čela vinutí
- 8 zub statoru
- 9 jho statoru
- 10 kostra
- 11 štít
- 12 vzduch v okolí kostry
- 13 vzduch v okolí štítu

Obr. 3.1: Tepelná síť

Odpory mezi jednotlivými body jsou vypočteny podle vzorce:

$$R_{xy} = \frac{l}{\lambda \cdot S} \quad (3.1)$$

kde λ je tepelná vodivost materiálu

a následně je pro každý bod sestavena rovnice ve tvaru:

$$\frac{T_x - T_y}{R_{xy}} = \Delta P. \quad (3.2)$$

Z rovnice je následně sestavena matice a pomocí programu MATLAB jsou získány hodnoty oteplení jednotlivých uzlů. Sestavná matice je znázorněna v příloze.

3.2 Výpočet tepelných odporů

Tepelný odpor mezi hřídelí a jhem rotoru

$$R_{12} = \frac{\frac{D_i + h_{jr}}{2}}{\lambda_{Fe} \cdot \pi \cdot \frac{D_i}{2} \cdot \frac{l_s}{2}} = \frac{2 \cdot (D_i + h_{jr})}{\lambda_{Fe} \cdot \pi \cdot D_i \cdot l_s} = \frac{2 \cdot (87 + 32,1)}{45 \cdot \pi \cdot 87 \cdot 197} = 0,0985 \text{ K/W} \quad (3.3)$$

Tepelný odpor mezi jhem rotoru a zubem rotoru

$$R_{23} = \frac{2 \cdot h_{jr}}{3 \cdot \lambda_{Fe} \cdot \pi \cdot (D_i + h_{jr}) \cdot l_s} + \frac{2 \cdot h_r}{3 \cdot \lambda_{Fe} \cdot b_{zr} \cdot l_s \cdot Q_r}$$

$$= \frac{2 \cdot 32,1}{3 \cdot 45 \cdot \pi \cdot (87 + 32,1) \cdot 197} + \frac{2 \cdot 24,8}{3 \cdot 45 \cdot 7,5 \cdot 197 \cdot 44}$$

$$= 0,0122 \text{ K/W} \quad (3.4)$$

Tepelný odpor mezi jhem rotoru a tyčí rotoru

$$R_{24} = \frac{2 \cdot h_{jr}}{3 \cdot \lambda_{Fe} \cdot \pi \cdot (D_i + h_{jr}) \cdot l_s} + \frac{2 \cdot h_r}{3 \cdot \lambda_{Al} \cdot b_{dr} \cdot l_s \cdot Q_r}$$

$$= \frac{2 \cdot 32,1}{3 \cdot 45 \cdot \pi \cdot (87 + 32,1) \cdot 197}$$

$$+ \frac{2 \cdot 24,8}{3 \cdot 220 \cdot \frac{(3,5 + 6,4)}{2} \cdot 197 \cdot 44} = 0,0082 \text{ K/W} \quad (3.5)$$

Tepelný odpor mezi zubem rotoru a vzduchovou mezerou

$$R_{35} = \frac{2 \cdot h_r}{3 \cdot \lambda_{Fe} \cdot b_{zr} \cdot l_s \cdot Q_r} + \frac{4}{\alpha \cdot b_{zr} \cdot l_s \cdot Q_r}$$

$$= \frac{2 \cdot 24,8}{3 \cdot 45 \cdot 7,5 \cdot 197 \cdot 44} + \frac{4}{150 \cdot 7,5 \cdot 197 \cdot 44} = 0,4228 \text{ K/W} \quad (3.6)$$

kde α je součinitel přestupu tepla do vzduchové mezery určený na základě domluvy a zkušeností s konzultantem diplomové práce pro teplo s hodnotou $\alpha = 150 \text{ W/K} \cdot \text{m}^2$

Tepelný odpor mezi tyčí rotoru a vzduchovou mezerou

$$R_{45} = \frac{2 \cdot h_r}{3 \cdot \lambda_{Al} \cdot b_{dr} \cdot l_s \cdot Q_r} + \frac{4}{\alpha \cdot b_{dr} \cdot l_s \cdot Q_r}$$

$$= \frac{2 \cdot 24,8}{3 \cdot 220 \cdot 4,45 \cdot 197 \cdot 44} + \frac{4}{150 \cdot 4,45 \cdot 197 \cdot 44}$$

$$= 0,4768 \text{ K/W} \quad (3.7)$$

Tepelný odpor mezi vzduchovou mezerou a drážkou statoru

$$\begin{aligned}
 R_{56} &= \frac{2 \cdot h_s}{3 \cdot \lambda_{ekv} \cdot b_{ds} \cdot l_s \cdot Q_s} + \frac{4 \cdot h_{iz}}{\lambda_{iz} \cdot b_{ds} \cdot l_s \cdot Q_s} + \frac{4}{\alpha \cdot b_{ds} \cdot l_s \cdot Q_s} \\
 &= \frac{2 \cdot 31}{3 \cdot 1,2 \cdot \frac{(6,7 + 9,7)}{2} \cdot 197 \cdot 48} + \frac{4 \cdot (0,5 + 2,5 + 2)}{3 \cdot 0,3 \cdot 8,2 \cdot 197 \cdot 48} \\
 &\quad + \frac{4}{150 \cdot \pi \cdot 8,2 \cdot 197 \cdot 48} = 2,5884 \text{ K/W}
 \end{aligned} \tag{3.8}$$

kde λ_{ekv} je ekvivalentní tepelná vodivost vsypávaného vinutí určena podle obr. 6.62 [4] s hodnotou $\lambda_{ekv} = 1,2 \text{ W/K}$

Tepelný odpor mezi čelem vinutí a vzduchem ve stroji

$$\begin{aligned}
 R_{57} &= \frac{4 \cdot h_s}{3 \cdot \lambda_{ekv} \cdot b_{ds} \cdot l_{\check{c}} \cdot Q_s} + \frac{4 \cdot h_{iz}}{\lambda_{iz} \cdot O_{\check{c}} \cdot l_{\check{c}} \cdot Q_s} + \frac{4}{\alpha_{\check{c}} \cdot O_{\check{c}} \cdot l_{\check{c}} \cdot Q_s} \\
 &= \frac{4 \cdot 31}{3 \cdot 1,2 \cdot 8,2 \cdot 256,5 \cdot 48} + \frac{4 \cdot 5}{2 \cdot 0,3 \cdot 64,6 \cdot 256,5 \cdot 48} \\
 &\quad + \frac{4}{2 \cdot 20 \cdot 64,6 \cdot 256,5 \cdot 48} = 0,9358 \text{ K/W}
 \end{aligned} \tag{3.9}$$

Tepelný odpor mezi vzduchovou mezerou a zubem statoru

$$\begin{aligned}
 R_{58} &= \frac{2 \cdot h_r}{3 \cdot \lambda_{Fe} \cdot b_{zs} \cdot l_s \cdot Q_s} + \frac{4}{\alpha \cdot b_{zs} \cdot l_s \cdot Q_s} \\
 &= \frac{2 \cdot 31}{3 \cdot 45 \cdot 7 \cdot 197 \cdot 48} + \frac{4}{150 \cdot 7 \cdot 197 \cdot 48} = 0,4188 \text{ K/W}
 \end{aligned} \tag{3.10}$$

Tepelný odpor mezi vzduchem ve stroji a kostrou stroje

$$R_{510} = \frac{2}{\alpha_{v-k} \cdot \pi \cdot D_e \cdot 1,3 \cdot l_v} = \frac{2}{30 \cdot \pi \cdot 328 \cdot 1,3 \cdot 86} = 0,5774 \text{ K/W} \tag{3.11}$$

kde α_{v-k} je koeficient přestupu tepla ze vzduchu ve stroji do kostry s hodnotou $\alpha_{v-k} = 30 \text{ W/K} \cdot \text{m}^2$

Tepelný odpor mezi vzduchem ve stroji a štítem

$$\begin{aligned}
 R_{511} &= \frac{2}{\alpha_{v-k} \cdot \pi \cdot \left(\left(\frac{D_e}{2} \right)^2 - \left(\frac{D_i}{2} \right)^2 \right)} = \frac{2}{30 \cdot \pi \cdot \left(\left(\frac{328}{2} \right)^2 - \left(\frac{87}{2} \right)^2 \right)} \\
 &= 0,8482 \text{ K/W}
 \end{aligned} \tag{3.12}$$

Tepelný odpor mezi drážkou a čelem vinutí

$$R_{67} = \frac{l_s + l_{\check{c}}}{3 \cdot \lambda_{Cu} \cdot S_{Cuc} \cdot Q_s} = \frac{197 + 256,5}{3 \cdot 380 \cdot 177,4 \cdot 48} = 0,0326 \text{ K/W} \tag{3.13}$$

Tepelný odpor mezi drážkou statoru a zubem statoru

$$\begin{aligned}
 R_{68} &= \frac{2 \cdot b_{ds}}{3 \cdot \lambda_{ekv} \cdot 2 \cdot h_s \cdot l_s \cdot Q_s} + \frac{4 \cdot h_{iz}}{2 \cdot \lambda_{izd} \cdot h_s \cdot l_s \cdot Q_s} + \frac{2 \cdot b_{zs}}{3 \cdot \lambda_{Fe} \cdot 2 \cdot h_s \cdot l_s \cdot Q_s} \\
 &= \frac{2 \cdot 8,2}{3 \cdot 1,2 \cdot 2 \cdot 31 \cdot 197 \cdot 48} + \frac{4 \cdot 5}{2 \cdot 0,16 \cdot 31 \cdot 197 \cdot 48} \\
 &\quad + \frac{2 \cdot 8,2}{3 \cdot 45 \cdot 2 \cdot 31 \cdot 197 \cdot 48} = 0,0312 \text{ K/W}
 \end{aligned} \tag{3.14}$$

Tepelný odpor mezi drážkou statoru a jhem statoru

$$\begin{aligned}
 R_{69} &= \frac{2 \cdot h_s}{3 \cdot \lambda_{ekv} \cdot b_{ds} \cdot l_s \cdot Q_s} + \frac{4 \cdot h_{iz}}{\lambda_{izd} \cdot b_{ds} \cdot l_s \cdot Q_s} + \frac{2 \cdot h_{js}}{3 \cdot \lambda_{Fe} \cdot (D_e - h_{js}) \cdot l_s} \\
 &= \frac{2 \cdot 31}{3 \cdot 1,2 \cdot 8,2 \cdot 197 \cdot 48} + \frac{4 \cdot 5}{0,16 \cdot 8,2 \cdot 197 \cdot 48} \\
 &\quad + \frac{2 \cdot 32,1}{3 \cdot 45 \cdot (328 - 32,1) \cdot 197 \cdot 48} = 0,3137 \text{ K/W}
 \end{aligned} \tag{3.15}$$

Tepelný odpor mezi zubem statoru a jhem statoru

$$\begin{aligned}
 R_{89} &= \frac{2 \cdot h_s}{3 \cdot \lambda_{Fe} \cdot b_{zs} \cdot l_s \cdot Q_r} + \frac{2 \cdot h_{js}}{3 \cdot \lambda_{Fe} \cdot (D_e - h_{js}) \cdot l_s} \\
 &= \frac{2 \cdot 31}{3 \cdot 45 \cdot 7 \cdot 197 \cdot 48} + \frac{4}{3 \cdot 45 \cdot (328 - 32,1) \cdot 197 \cdot 48} \\
 &= 0,001 \text{ K/W}
 \end{aligned} \tag{3.16}$$

Tepelný odpor mezi jhem statoru a kostrou stroje

$$\begin{aligned}
 R_{910} &= \frac{2 \cdot h_{js}}{3 \cdot \lambda_{Fe} \cdot \pi \cdot D_e \cdot l_s} + \frac{2 \cdot t_k}{\lambda_{Fe} \cdot O_k \cdot l_s} \\
 &= \frac{2 \cdot 32,1}{3 \cdot 45 \cdot \pi \cdot 328 \cdot 197} + \frac{2 \cdot (380 - 328)}{45 \cdot 380 \cdot 197} = 0,0382 \text{ K/W}
 \end{aligned} \tag{3.17}$$

Kde O_k je obvod kostry určený z obr. 6.63 [4] podle vnějšího průměru statoru s hodnotou $O_k = 380 \text{ mm}$.

Tepelný odpor mezi kostrou a okolním vzduchem

$$\begin{aligned}
 R_{1012} &= \frac{4}{\alpha_k \cdot \pi \cdot O_k \cdot (l_s + 1,3 \cdot 2 \cdot l_v)} = \frac{4}{50 \cdot \pi \cdot 380 \cdot (197 + 1,3 \cdot 2 \cdot 86,3)} \\
 &= 0,1592 \text{ K/W}
 \end{aligned} \tag{3.18}$$

Kde α_k je koeficient přestupu tepla z kostry stroje do okolního vzduchu s hodnotu $\alpha_k = 50 \text{ W/K} \cdot \text{m}^2$

Tepelný odpor mezi štítem a okolním vzduchem

$$R_{1113} = \frac{2}{\alpha_{\xi} \cdot \pi \cdot \left(\left(\frac{D_e}{2} \right)^2 - \left(\frac{D_i}{2} \right)^2 \right)} = \frac{2}{75 \cdot \pi \cdot \left(\left(\frac{328}{2} \right)^2 - \left(\frac{87}{2} \right)^2 \right)} \quad (3.19)$$

$$= 0,3392 \text{ K/W}$$

Kde α_{ξ} je koeficient přestupu tepla ze štítu do okolního vzduchu s hodnotou $\alpha_{\xi} = 75 \text{ W/K} \cdot \text{m}^2$

Tab. 3.1 Tepelné odpory mezi uzly

<i>Tepelný odpor</i>	<i>Značení</i>	<i>Velikost [K/W]</i>
<i>Odpor mezi hřídelí a jhem rotoru</i>	<i>R₁₂</i>	<i>0,0986</i>
<i>Odpor mezi jhem rotoru a zubem rotoru</i>	<i>R₂₃</i>	<i>0,0122</i>
<i>Odpor mezi jhem rotoru a tyčemi rotoru</i>	<i>R₂₄</i>	<i>0,0082</i>
<i>Odpor mezi zuby rotoru a vzduchovou mezerou</i>	<i>R₃₅</i>	<i>0,4228</i>
<i>Odpor mezi tyčemi rotoru a vzduchovou mezerou</i>	<i>R₄₅</i>	<i>0,4768</i>
<i>Odpor mezi vzduchovou mezerou a drážky statoru</i>	<i>R₅₆</i>	<i>2,5884</i>
<i>Odpor mezi čely vinutí a vzduchem ve stroji</i>	<i>R₅₇</i>	<i>0,9358</i>
<i>Odpor mezi vzduchovou mezerou a zuby statoru</i>	<i>R₅₈</i>	<i>0,4188</i>
<i>Odpor mezi vzduchem ve stroji a kostrou</i>	<i>R₅₁₀</i>	<i>0,5774</i>
<i>Odpor mezi vzduchem ve stroji a štítem</i>	<i>R₅₁₁</i>	<i>0,8482</i>
<i>Odpor mezi vinutím statoru a čely vinutí</i>	<i>R₆₇</i>	<i>0,0326</i>
<i>Odpor mezi drážkami statoru a zuby statoru</i>	<i>R₆₈</i>	<i>0,0312</i>
<i>Odpor mezi vinutí statoru a jhem statoru</i>	<i>R₆₉</i>	<i>0,3137</i>
<i>Odpor mezi zuby statoru a jhem statoru</i>	<i>R₈₉</i>	<i>0,0100</i>
<i>Odpor mezi jhem statoru a kostrou stroje</i>	<i>R₉₁₀</i>	<i>0,0382</i>
<i>Odpor mezi kostrou stroje a okolním vzduchem</i>	<i>R₁₀₁₂</i>	<i>0,1592</i>
<i>Odpor mezi štítem a okolním vzduchem</i>	<i>R₁₁₁₃</i>	<i>0,3393</i>

Tab. 3.2: Ztráty a oteplení částí stroje

<i>Uzel</i>	<i>Část stroje</i>	<i>Ztráty v uzlu [W]</i>	<i>Oteplení části stroje [°C]</i>
<i>1</i>	<i>Hřídel</i>	<i>13,9</i>	<i>104</i>
<i>2</i>	<i>Jho rotoru</i>	<i>0</i>	<i>103</i>
<i>3</i>	<i>Zuby rotoru</i>	<i>12,9</i>	<i>102</i>
<i>4</i>	<i>Klec nakrátko</i>	<i>137,9</i>	<i>104</i>
<i>5</i>	<i>Vzduch ve stroji</i>	<i>0</i>	<i>71</i>
<i>6</i>	<i>Drážková část vinutí</i>	<i>81,2</i>	<i>63</i>
<i>7</i>	<i>Čela vinutí</i>	<i>105,7</i>	<i>67</i>
<i>8</i>	<i>Zuby statoru</i>	<i>28,1</i>	<i>59</i>
<i>9</i>	<i>Jho statoru</i>	<i>34,2</i>	<i>57</i>
<i>10</i>	<i>Kostra</i>	<i>0</i>	<i>47</i>
<i>11</i>	<i>Štít</i>	<i>0</i>	<i>20</i>

Ztráty zapsané v tabulce jsou čtvrtinové oproti ztrátám vypočteným při návrhu stroje, a to z důvodu, že je model tepelné sítě vytvořen pro čtvrtinu stroje. Ztráty v tabulce jsou dále vynásobeny koeficientem, který zahrnuje přídavné ztráty. Na základě oteplení vinutí stroje lze považovat podmínku pro použití tepelné třídy izolace F za splněnou s rezervou přibližně 40 °C. Tato rezerva umožňuje navrhnout stroj buď s menšími rozměry nebo s větším výkonem. U tohoto stroje spadá oteplení do třídy izolace třídy E.

3.3 Ventilační výpočet

Potřebný průtok chladiva

$$Q_v = \frac{k_m \cdot \Delta P'_v}{1100 \cdot \Delta \vartheta_v} = \frac{5,54 \cdot 1348,6}{1100 \cdot 71} = 0,096 \text{ m}^3/\text{s} \quad (3.20)$$

kde $\Delta P'_v$ jsou ztráty odváděné do vzduchu ve stroji určené z:

$$\begin{aligned} \Delta P'_v &= \Delta P - (1 - K) \cdot (\Delta P_{js} + \Delta P_{Fej} + \Delta P_{Fez}) - 0,9 \cdot \Delta P_m \\ &= 1731 - (1 - 0,2) \cdot (610 + 118 + 64,2) - 0,9 \cdot 111,3 \\ &= 1348,6W \end{aligned} \quad (3.21)$$

k_m je činitel uvažující změnu chladících podmínek po délce povrchu kostry, který je ofukovám vnější ventilátorem, určený z:

$$k_m = m \cdot \sqrt{\frac{n}{100}} \cdot D_e = 2,5 \cdot \sqrt{\frac{1470}{100}} \cdot 0,328 = 5,54 \quad (3.22)$$

Potřebný průtok chladiva

$$Q'_v = 0,6 \cdot D_e^3 \cdot \frac{n}{100} = 0,6 \cdot 0,328^3 \cdot \frac{1470}{100} = 0,311 \text{ m}^3/\text{s} \quad (3.23)$$

Získatelný průtok chladiva je vyšší než potřebný průtok chladiva, a tím lze brát podmínku pro dostatečné chlazení za splněnou.

4 Porovnání strojů navržených na štítkové parametry

4.1 Výpočtové a provozní parametry

V této kapitole jsou navrženy čtyři motory, kdy u každého motoru je použit jiný materiál statorových plechů. Při návrhu všech motorů je postupováno jako ve 2. a 3. kapitole. Všechny stroje jsou navrženy jako čtyřpólové v konstrukčním provedení IP44, IM 1001, IC 01-41 s jmenovitým výkonem 30kW a jmenovitým napětím 400/690 V. Pro motor I jsou stejně jako pro motor navržený v 2. a 3. kapitole použity plechy z křemíkové oceli se značením M210-35A. Rozdíl mezi těmito stroji je ve výkonové konstantě stroje C_{mech} , která se volí na začátku výpočtu při určování hlavních rozměrů stroje, kdy u motoru M I je hodnota C_{mech} vyšší o 25 kW/m³, má tedy hodnotu 175 kW/m³. Zvýšením této konstanty se zmenší stoj, což má za následek snížení účinnosti a zvýšení oteplení cívek stroje. Materiály použité pro stroje M II, M III a M IV jsou sepsány v tabulce 4.1. Tabulka 4.2 znázorňuje provozní parametry strojů.

Tab. 4.1: Základní údaje pro návrh motorů

Číslo motoru	M I	M II	M III	M IV	
Materiál plechů	M210-35A	M350-50A	Vacoflux X1	Hiperco 50A	
Jmenovitý výkon	30000				W
Synchronní rychlost	1500				ot/min
Jmenovité napětí	400/690				V
IP, IM, IC	IP 44, IM 1001, IC 01-41				

Tab. 4.2: Provozní parametry

	M I	M II	M III	M IV	
Jmenovitý příkon	31,83	31,94	31,89	31,75	kW
Jmenovitý proud	30,6	30,7	30,7	30,5	A
Jmenovitý skluz	0,0188	0,0188	0,0189	0,0191	
Jmenovité otáčky	1470	1470	1470	1470	Ot./min
Jmenovitý moment	194,9	194,9	194,9	194,9	Nm
Účinnost	94,28	93,95	94,07	94,50	%
Maximální moment	652,4	652,4	668,5	688,2	Nm
Skluz zvratu	0,117	0,117	0,121	0,126	
Proud naprázdno	13,9	13,9	14,1	14,3	A

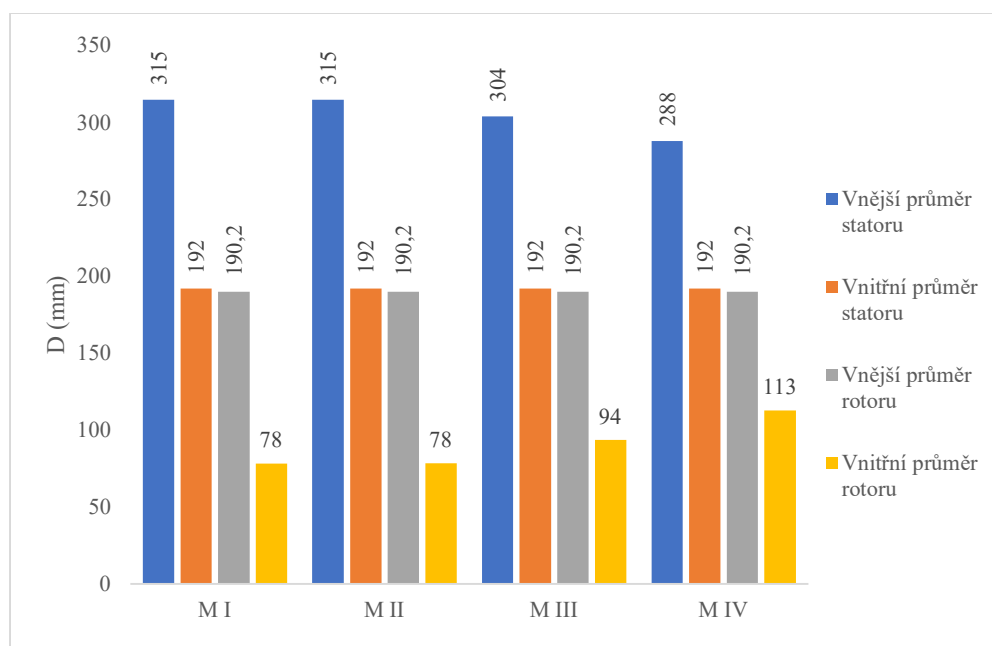
4.2 Hlavní rozměry

Stroje porovnávané v této kapitole jsou navrženy se stejnou výkonovou konstantou C_{mech} , pomocí které je určen vnitřní průměr statoru a délka paketu stroje. Stejná je také velikost vzduchové mezery, která je vypočtena na základě jmenovitého výkonu stroje, a

vnější průměr rotoru. Rozdíl v rozměrech motorů je na vnitřním průměru rotoru a vnějším průměru statoru, kdy stroje M I a M II mají největší vnější průměr a nejmenší vnitřní průměr. Naopak je tomu u stroje M IV. Rozdílnost těchto rozměrů je dána zvolenou magnetickou indukcí v zubech a jhu, kdy na základě zvolených hodnot indukce je určena výška jha a šířka zubu, ze které je odvozena šířka a výška drážky. Vnější průměr statoru a vnitřní průměr rotoru je určen jakou součet výšky jha a výšky drážky. Konkrétní rozměry strojů jsou uvedeny v tabulce 4.3.

Tab. 4.3: Hlavní rozměry strojů

	<i>M I</i>	<i>M II</i>	<i>M III</i>	<i>M IV</i>	
<i>Délka železa</i>	187	187	187	187	<i>mm</i>
<i>Velikost vzduchové mezery</i>	0,9	0,9	0,9	0,9	<i>mm</i>
<i>Stator</i>					
<i>Vnější průměr</i>	315	315	304	288	<i>mm</i>
<i>Vnitřní průměr</i>	192	192	192	192	<i>mm</i>
<i>Výška jha statoru</i>	31	31	27	21	
<i>Šířka zubu statoru</i>	6,7	6,7	6,1	5,1	<i>mm</i>
<i>Rotor</i>					
<i>Vnější průměr</i>	190,2	190,2	190,2	190,2	<i>mm</i>
<i>Vnitřní průměr</i>	78	78	94	113	<i>mm</i>
<i>Výška jha rotoru</i>	31	31	27	21	<i>mm</i>
<i>Šířka zubu rotoru</i>	7,3	7,3	6,6	5,5	<i>mm</i>



Obr. 4.1: Grafické porovnání jednotlivých průměrů

4.3 Parametry vinutí, klece a drážek

V tabulce 4.4 jsou zapsány hodnoty pro konstrukci navrženého vinutí. Vinutí je navrženo pro všechny stroje stejně. Vinutí je provedeno jako smyčkové, dvouvrstvé se zkráceným krokem.

Tab. 4.4: Zapojení vinutí

	<i>MI</i>	<i>MII</i>	<i>MIII</i>	<i>MIV</i>
Počet pólů	4			
Počet vrstev vinutí	2			
Počet cívek stroje	48			
Počet fází	3			
Matematický počet fází	6			
Krok v počtu drážek	10			
Zkrácení kroku vinutí	0,833333333			
Přední cívkový krok	21			
Spojkový krok	-19			
Počet svazků cívek	12			
Počet svazků na fázi	4			
Počet cívek ve svazku	4			

Tabulka 4.5 znázorňuje parametry vinutí. Vinutí jsou provedena s dvěma paralelními větvemi. V každé vrstvě vinutí je 15 vodičů. Každý vodič je dále složen z 5 dílčích vodičů s průměrem 0,95 mm kvůli omezení skinefektu. Parametry vinutí jsou u všech motorů téměř stejné až na malé odchylky, které jsou dány rozměry drážek nebo velikostí statorového proudu.

Tab. 4.5: Parametry vinutí statoru

	<i>MI</i>	<i>MII</i>	<i>MIII</i>	<i>MIV</i>	
Počet závitů	120	120	120	120	
Počet vodičů v drážce	30	30	30	30	
Počet paralelních větví	2	2	2	2	
Aktivní plocha drážky	163,6	163,6	163,6	163,6	mm ²
Průměr vodiče	5 x 0,95	5 x 0,95	5 x 0,95	5 x 0,95	mm
Izolace drážky	0,5	0,5	0,5	0,5	mm
Proudová hustota	4,32	4,33	4,32	4,31	A/mm ²
Činitel vinutí	0,925	0,925	0,925	0,925	
Délka čela	236	236	234	232	mm
Střední délka závitu	845	845	842	837	mm
Délka vodičů jedné fáze	101,45	101,45	101,01	100,48	m

V tabulce 4.6 jsou sepsány parametry rotorové klece nakrátko. Rozdíl mezi jednotlivými stroji je především v rozměrech kruhů, kdy rozměr kruhu udává výška rotorové drážky a zvolená proudová hustota v kruhu.

Tab. 4.6: Parametry rotorové klece

	<i>M I</i>	<i>M II</i>	<i>M III</i>	<i>M IV</i>	
Proud tyče	435,8	437	437	435	<i>A</i>
Průřez tyče	103	103	103	104	mm^2
Proudová hustota tyče	4,23	4,25	4,25	4,20	A/mm^2
Proud kruhem	1531,2	1536	1534	1527	<i>A</i>
Proudová hustota kruhu	4	4	4	4	A/mm^2
Výška kruhu	24	24	20	17	<i>mm</i>
Šířka kruhu	16	16	19	23	<i>mm</i>

V následujících tabulkách s čísly 4.7 a 4.8 jsou zapsány rozměry drážek statoru a rotoru. Všechny stroje mají shodný počet drážek statoru i rotoru. Rotorové drážky jsou navrženy jako pootočené o jednu drážkovou rozteč. Statorové drážky jsou typu S a rotorové drážky jsou typu W. Jednotlivé drážky jsou rozdílné z hlediska výšky a šířky, to je dáno různou šířkou zubu, která je z části určena zvolenou indukci v zubech, jak již bylo napsáno v kapitole 4.2. Naopak shodné rozměry pro všechny drážky jsou otevření drážky b_1 , výška h_1 a h_2 . U statorové drážky je to navíc rozměr h_3 , který udává tloušťku izolace mezi klínem a vodiči.

Tab. 4.7: Rozměry drážky statoru

	<i>M I</i>	<i>M II</i>	<i>M III</i>	<i>M IV</i>	
Počet drážek	48	48	48	48	
b_1	3				<i>mm</i>
b_4	6,2	6,2	6,9	7,9	<i>mm</i>
b_5	9,2	9,2	9,6	10,3	<i>mm</i>
h_1	0,5				<i>mm</i>
h_2	2,5				<i>mm</i>
h_3	2				<i>mm</i>
h_4	25	25	23	21	<i>mm</i>
h_5	21	21	19	17	<i>mm</i>
h_s	31	31	29	27	<i>mm</i>

Tab. 4.8: Rozměry drážky rotoru

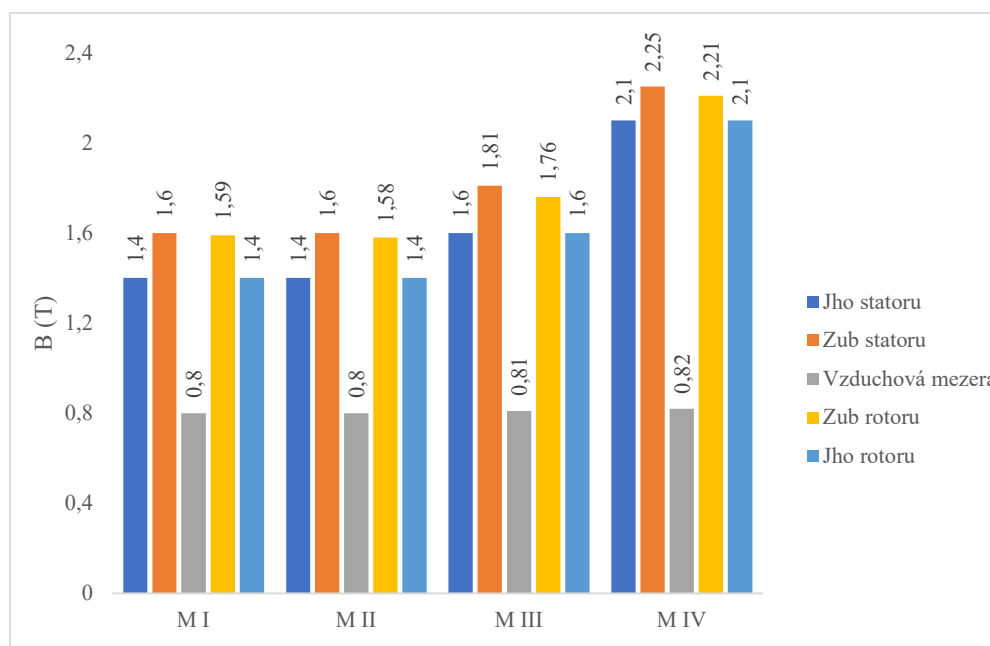
	<i>MI</i>	<i>MII</i>	<i>MIII</i>	<i>MIV</i>	
Počet drážek	44	44	44	44	
b_1	3				mm
b_4	5,9	5,9	6,5	7,7	mm
b_5	3,0	3,0	4,2	6,0	mm
h_1	1				mm
h_2	2				mm
h_4	22	22	18	15	mm
h_5	20,5	20,5	16	11,5	mm
h_r	25	25	21	17,5	mm

4.4 Hodnoty magnetické indukce

Hodnoty magnetické indukce se liší zejména v zubech a jhu statoru a rotoru. Odlišnost těchto hodnot je dána vlastnostmi použitých materiálů, kdy plechy z křemíkové oceli M210-35A a M350-50A se sytí v okolí hodnoty 1,6 T, zatímco u plechů na bázi slitiny železa s kobaltem se tato hodnota pohybuje v okolí 1,8 T pro materiál Vacoflux X1, respektive 2,2 T u materiálu Hiperco 50A. Konkrétní hodnoty magnetické indukce lze vyčíst z tabulky 4.9.

Tab. 4.9: Magnetická indukce v částech magnetického obvodu

	<i>MI</i>	<i>MII</i>	<i>MIII</i>	<i>MIV</i>	
<i>Stator</i>					
<i>V zubech</i>	1,6	1,6	1,81	2,25	T
<i>Ve jhu</i>	1,4	1,4	1,6	2,1	T
<i>Ve vzduchové mezeře</i>	0,8	0,8	0,81	0,82	T
<i>Rotor</i>					
<i>V zubech</i>	1,59	1,58	1,76	2,21	T
<i>Ve jhu</i>	1,4	1,4	1,6	2,1	T
<i>Výsledné magnetické napětí</i>	690,2	690,2	699,5	710	A
<i>Magnetizační proud</i>	13,87	13,87	14,06	14,27	A



Obr. 4.2: Grafické porovnání magnetických indukci v jednotlivých částech stroje

4.5 Parametry náhradního schématu

Téměř všechny parametry náhradního schématu se u všech motorů shodují, až na odpor respektující ztráty v železe, což je dáno rozdílnými ztráty v železe, které se odvíjí od ztrátového čísla použitých plechů a na hmotnosti železa stroje. Hodnoty odporů a reaktancí náhradního schématu znázorňuje tabulka 4.10.

Tab. 4.10: Parametry náhradního schématu

	MI	MII	MIII	MIV	
Odpor vinutí statoru	0,242	0,242	0,241	0,240	Ω
Odpor klece nakrátko	7,32E-05	7,29E-05	7,35E-05	7,43E-05	Ω
Odpor klece přepočtený	0,246	0,245	0,247	0,250	Ω
Rozptylová reaktance statoru	1,207	1,207	1,135	1,054	Ω
Rozptylová reaktance rotoru	2,00E-04	2,00E-04	2,05E-04	2,09E-04	Ω
Rozptyl rotoru přepočtený	0,673	0,673	0,688	0,703	Ω
Magnetizační reaktance	27,54	27,54	27,18	26,77	Ω
Odpor železa	1966,8	1340,1	1504,8	2832,2	Ω

4.6 Ztráty, účinnost a výkonová hustota

V následujících tabulkách s čísly 4.11, 4.12 a 4.13 jsou znázorněny jednotlivé ztráty ve statoru a rotoru, celkové ztráty s účinností a výkonovou hustotou. Rozdíly ve velikosti ztrát lze zaznamenat především ve ztrátách v železe. Rozdíly jsou dány různou hmotností železa stroje a různým ztrátovým číslem plechů. Ztrátové číslo plechů je navíc závislé na velikosti magnetické indukci. Nejmenší ztráty v železe má stroj M IV, následuje stroj M I, dále pak

stoj M III a největší ztráty v železe jsou u stroje M II. Stejně jako v případě velikosti ztrát v železe je tomu u celkových ztrát stejné. Z toho vyplývá, že stroj M IV má největší účinnost. Výkonová hustota vyšla nejvyšší také u motoru M IV. Rozdíl ve výkonové hustotě strojů je dán rozdílnou hmotností aktivních částí stroje.

Tab. 4.11: Ztráty vznikající ve statoru

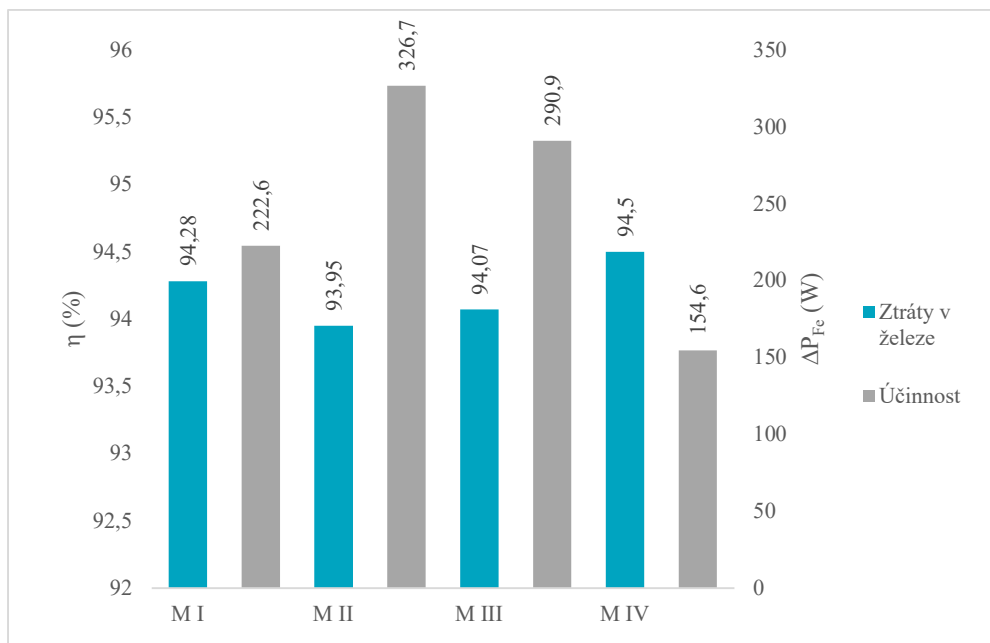
	<i>M I</i>	<i>M II</i>	<i>M III</i>	<i>M IV</i>	
Ztráty ve vinutí	680	684,5	679,7	670	<i>W</i>
Celkové ztráty v železe	222,6	326,7	290,9	154,6	<i>W</i>
Hlavní ztráty v železe	168,5	265,8	232,5	97,8	<i>W</i>
Povrchové ztráty	5,2	5,2	4,8	3,7	<i>W</i>
Pulzní ztráty	22,3	22,4	23,2	24,6	<i>W</i>

Tab. 4.12: Ztráty vznikající v rotoru

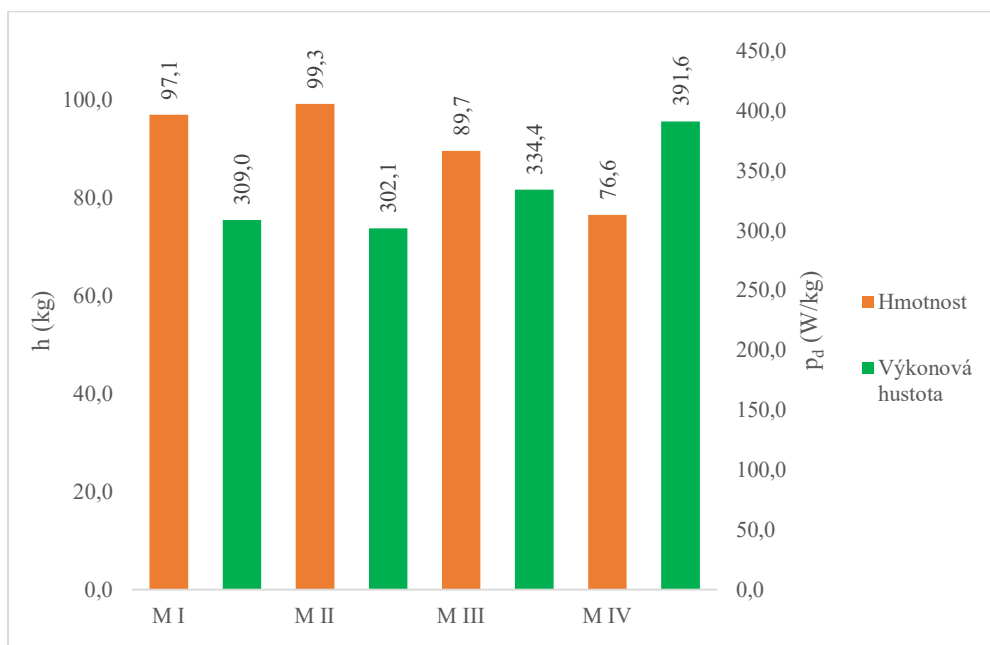
	<i>M I</i>	<i>M II</i>	<i>M III</i>	<i>M IV</i>	
Ztráty v kleci nakrátko	521,9	523,7	525,0	525	<i>W</i>
Ztráty v železe	33,1	33,2	30,4	28	<i>W</i>
Povrchové ztráty	14,2	14,2	14,4	14,6	<i>W</i>
Pulzní ztráty	18,9	19,0	16,0	13,5	<i>W</i>
Mechanické ztráty	95,6	95,6	95,6	95,6	<i>W</i>
Přídavné ztráty	300	300	300	300	<i>W</i>

Tab. 4.13: Celkové ztráty stroje, účinnosti a výkonová hustota

	<i>M I</i>	<i>M II</i>	<i>M III</i>	<i>M IV</i>	
Příkon	31820	31930	31891	31745	<i>W</i>
Výkon	30000	30000	30000	30000	<i>W</i>
Celkové ztráty	1820,1	1930,4	1891,2	1744,7	<i>W</i>
Účinnost	94,28	93,95	94,07	94,50	%
Hmotnost železa statoru	51,6	53,1	46,1	36,8	<i>kg</i>
Hmotnost železa rotoru	25,6	26,3	23,6	19,6	<i>kg</i>
Hmotnost vinutí statoru	16,5	16,5	16,6	16,8	<i>kg</i>
Hmotnost klece nakrátko	3,4	3,4	3,4	3,4	<i>kg</i>
Hmotnost aktivních částí	97,1	99,3	89,7	76,6	<i>kg</i>
Výkonová hustota	309,0	302,1	334,4	391,6	<i>W/kg</i>



Obr. 4.3: Grafické porovnání ztrát v železe a účinnosti



Obr. 4.4: Grafické porovnání hmotností a výkonových hustot

4.7 Oteplení

Tabulka 4.14 znázorňuje oteplení částí strojů a potřebné průtoky vzduchu ve stroji. Pro určení konečné teploty jednotlivých částí je třeba k těmto hodnotám oteplení přičíst teplotu okolí, která je v tomto případě brána jako 40°C. Nejvyšší oteplení vyšlo u motoru M IV, ve kterém vznikají nejmenší ztráty, ale motor je nejmenší, a tudíž má i nejmenší ochlazovací plochu. Maximálního oteplení u všech strojů splňuje podmínky pro použití izolace třídy F, kdy oteplení všech strojů se pohybuje v třídě B. Tato rezerva v oteplení strojů lze například

využít při přetěžování strojů. Případně druhá možnost je zmenšit rozměry strojů, čímž by se oteplení jednotlivých částí zvýšilo. Problém u těchto strojů je v oteplení hřídele, které překračuje dovolené oteplení pro ložiska. Tento problém lze vyřešit použitím vysokoteplotních ložisek. Podmínka dostatečného chlazení je splněna u všech strojů, kdy potřebný průtok chladícího vzduchu je menší než maximální průtok vzduchu, který lze získat.

Tab. 4.14: Oteplení částí stroje

<i>Oteplení:</i>	<i>M I</i>	<i>M II</i>	<i>M III</i>	<i>M IV</i>	
<i>Hřídel</i>	113	118	119	124	°C
<i>Jho rotoru</i>	113	118	119	124	°C
<i>Zub rotoru</i>	113	117	118	124	°C
<i>Drážka rotoru</i>	114	119	119	124	°C
<i>Vzduch ve stroji</i>	79	83	84	90	°C
<i>Drážka statoru</i>	72	75	74	78	°C
<i>Čela vinutí</i>	75	79	78	82	°C
<i>Zub statoru</i>	65	70	69	72	°C
<i>Jho statoru</i>	63	68	67	70	°C
<i>Kostra stroje</i>	53	58	57	58	°C
<i>Štít</i>	23	24	24	26	°C
<i>Potřebný průtok chladiva</i>	0,091	0,088	0,143	0,075	m ³ /s
<i>Získatelný průtok chladiva</i>	0,277	0,276	0,248	0,210	m ³ /s

5 Porovnání strojů navržených na zástavbové rozměry

5.1 Výpočtové, provozní parametry a hlavní rozměry strojů

V této kapitole jsou navrženy další čtyři motory se stejnými materiály magnetického obvodu a stejným konstrukčním provedením, jako v kapitole 4. Další shodné parametry jsou počet pólů a jmenovité napětí. Stroje navřené v této kapitole se liší zadanými vstupními parametry pro výpočet, kdy jsou zadány maximální rozměry magnetického obvodu statoru. Zadané hodnoty jsou vnější průměr statoru $D_e = 350 \text{ mm}$ a délka železa statoru $l_s = 250 \text{ mm}$.

Vzhledem k jiným vstupním parametrům se změní postup výpočtu stroje, a to zejména určení hlavních rozměrů a výkonu. Výkon stroje lze určit z rovnice (2.2), kde je za štíhlostní poměr dosazena rovnice (2.1):

$$P_{mech} = D_s^3 \cdot \lambda \cdot C_{mech} \cdot n_s = D_s^2 \cdot l' \cdot C_{mech} \cdot \frac{f}{p} \quad (5.1)$$

kde D_s je vnitřní průměr statoru určený z rovnice (2.79):

$$D_s = D_e - 2 \cdot (h_s + h_{js}) \quad (5.2)$$

l' je výpočtová délka stroje určena z rovnice (2.8):

$$l' = l_s + 2 \cdot \delta \quad (5.3)$$

C_{mech} je mechanická konstanta stroje určena z grafu 6.3 [2].

Samotný postup výpočtu v této části byl takový, že se nejdříve orientačně zvolila mechanická konstanta stroje C_{mech} a na základě již vypočtených strojů výška drážky a výška jha stroje. Následně byl proveden postup výpočtu podle kapitoly 2, ze kterého byly získány výsledky, pomocí nichž byly upraveny velikosti výšky jha a výšky drážky a mechanické konstanty C_{mech} . Celý postup se tedy skládal z několika iterací, po kterých byla určena hodnota $C_{mech} = 200 \text{ kWs/m}^3$ a základní rozměry strojů, které jsou znázorněny v tabulce 5.1. Pomocí těchto rozměrů jsou určeny výkony strojů viz tabulka 5.2. V tabulce 5.3 jsou zapsány provozní parametry strojů.

U stroje s označením M VIII vyšel největší vnitřní průměr statoru a tím má stroj i největší výkon v porovnání s ostatními stroji. Největší vnitřní průměr statoru je u toho stroje dán nejvyšší zvolenou magnetickou indukci v zubu a jhu, což vede na nejkratší jho a nejširší a nejkratší drážku statoru ze všech strojů. Analogicky je to u stroje s označením M VII, kde je zvolena magnetická indukce nižší než u M VIII, ale větší než u strojů M V a M VI, kdy výkon toho stroje je vyšší než v případě strojů M V a M VI, ale nižší než u stroje M VIII.

Největší vzduchová mezera vyšla u stroje M VIII, a to z důvodu, že je počítána z výkonu stroje.

Tab. 5.1: Hlavní rozměry strojů

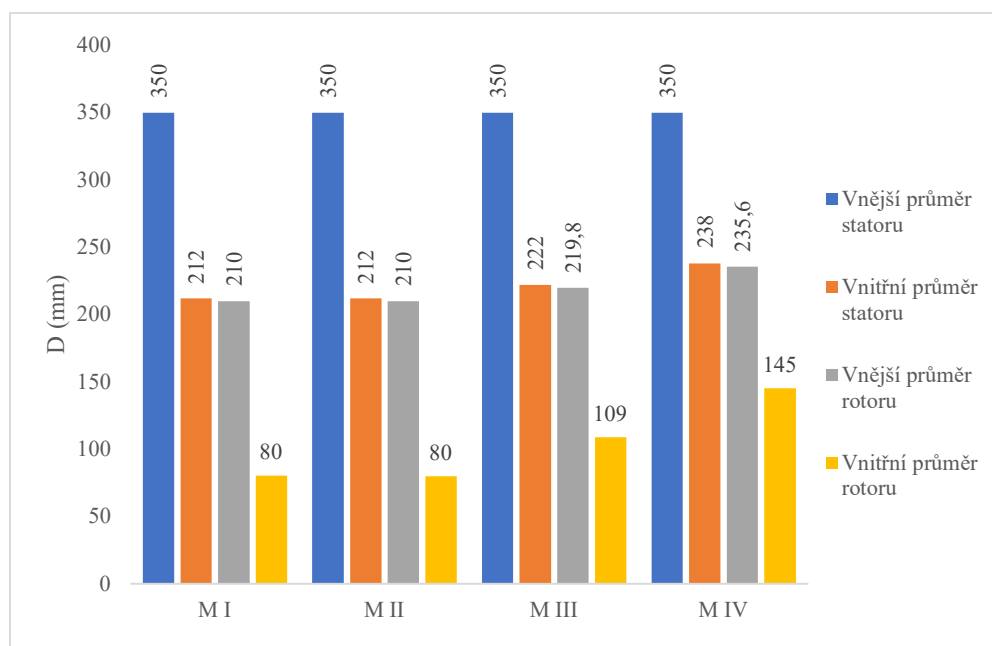
	<i>M V</i>	<i>M VI</i>	<i>M VII</i>	<i>M VIII</i>	
<i>Délka železa</i>	250	250	250	250	<i>mm</i>
<i>Velikost vzduchové mezery</i>	1	1,0	1,1	1,2	<i>mm</i>
<i>Stator</i>					
<i>Vnější průměr</i>	350	350	350	350	<i>mm</i>
<i>Vnitřní průměr</i>	212	212	222	238	<i>mm</i>
<i>Výška jha statoru</i>	34	34	31	25	<i>mm</i>
<i>Šířka zubu statoru</i>	7,5	7,6	6,8	6,0	<i>mm</i>
<i>Rotor</i>					
<i>Vnější průměr</i>	210	210	219,8	235,6	<i>mm</i>
<i>Vnitřní průměr</i>	80	80	109	145	<i>mm</i>
<i>Výška jha rotoru</i>	34	34	31	25	<i>mm</i>
<i>Šířka zubu rotoru</i>	8,1	8,2	7,3	6,5	<i>mm</i>

Tab. 5.2: Základní údaje pro návrh motorů

	M V	M VI	M VII	M VIII	
Materiál plechů	M210-35A	M350-50A	Vacoflux X1	Hiperco 50A	
Jmenovitý výkon	56600	56600	62100	71500	W
Synchronní rychlost	1500				ot/min
Jmenovité napětí	400/690				V
IP, IM, IC	IP 44, IM 1001, IC 01-41				

Tab. 5.3: Provozní parametry

	<i>M V</i>	<i>M VI</i>	<i>M VII</i>	<i>M VIII</i>	
<i>Jmenovitý příkon</i>	59,74	59,93	65,42	74,80	<i>kW</i>
<i>Jmenovitý proud</i>	57,5	57,6	597,1	71,9	<i>A</i>
<i>Jmenovitý skluz</i>	0,0156	0,0156	0,0149	0,0156	
<i>Jmenovité otáčky</i>	1470	1470	1470	1470	<i>Ot./min</i>
<i>Jmenovitý moment</i>	367,9	367,9	403,7	464,4	<i>Nm</i>
<i>Účinnost</i>	95,17	94,87	95,01	95,57	%
<i>Maximální moment</i>	1187,9	1178,5	1303,0	1493,1	<i>Nm</i>
<i>Skluz zvratu</i>	0,091	0,090	0,088	0,091	
<i>Proud naprázdno</i>	22,6	22,9	24,9	28,3	<i>A</i>



Obr. 5.1: Grafické porovnání jednotlivých průměrů stroje

5.2 Parametry vinutí, klece a drážek

Tabula 5.4 znázorňuje hodnoty pro konstrukci navrženého vinutí. Vinutí je navrženo pro všechny stroje stejně a konstrukčně se neliší od vinutí pro stroje navržené v kapitole 4.

Tab. 5.4: Zapojení vinutí

	<i>M V</i>	<i>M VI</i>	<i>M VII</i>	<i>M VIII</i>
Počet pólů	4			
Počet vrstev vinutí	2			
Počet cívek stroje	48			
Počet fází	3			
Matematický počet fází	6			
Krok v počtu drážek	10			
Zkrácení kroku vinutí	0,833333333			
Přední cívkový krok	21			
Spojkový krok	-19			
Počet svazků cívek	12			
Počet svazků na fázi	4			
Počet cívek ve svazku	4			

V tabulce 5.5 jsou zapsány parametry vinutí. Vinutí jsou navržena jako dvouvrstvá se dvěma paralelními větvemi. Největší plocha drážky je stroje M VIII, protože stroj má největší výkon, a tedy odebírá i největší proud. Dalším parametrem, který ovlivňuje plochu drážky je proudová hustota, která je zvolena nejmenší ze všech strojů z důvodu oteplení.

Tab. 5.5: Parametry vinutí statoru

	<i>M V</i>	<i>M VI</i>	<i>M VII</i>	<i>M VIII</i>	
Počet závitů	80	80	78	74	
Počet vodičů v drážce	20	20	20	18	
Počet paralelních větví	2	2	2	2	
Aktivní plocha drážky	210,5	210,5	226,6	244,7	mm ²
Průměr vodiče	5 x 1,32	5 x 1,32	6 x 1,25	5 x 1,5	mm
Izolace drážky	0,5	0,5	0,5	0,5	mm
Proudová hustota	4,20	4,21	4,07	4,07	A/mm ²
Činitel vinutí	0,925	0,925	0,925	0,925	
Délka čela	260	261	268	282	mm
Střední délka závitu	1019	1021	1037	1064	mm
Délka vodičů jedné fáze	81,54	81,71	80,86	78,77	m

V tabulce 5.6 jsou znázorněny parametry rotorové klece nakrátko. Rozdíl mezi jednotlivými stroji je opět v ploše drážky, která je dána proudem tyče a zvolenou proudovou hustotou, a v rozměrech kruhů, kdy rozměr kruhu je odvozen od výšky rotorové drážky a zvolené proudové hustoty v kruhu.

Tab. 5.6: Parametry rotorové klece

	<i>M V</i>	<i>M VI</i>	<i>M VII</i>	<i>M VIII</i>	
Proud tyče	545,3	547	597	614	A
Průřez tyče	132	131	147	154	mm ²
Proudová hustota tyče	4,14	4,17	4,08	4,01	A/mm ²
Proud kruhem	1916	1922	2100	2170	A
Proudová hustota kruhu	4	4	4	4	A/mm ²
Výška kruhu	29	30	24	19	mm
Šířka kruhu	16	16	22	29	mm

V následujících tabulkách s čísly 5.7 a 5.8 jsou zapsány rozměry drážek statoru a rotoru. Stejně jako u strojů v kapitole 4 mají všechny stroje shodný počet drážek statoru i rotoru. Rotorové drážky jsou navrženy jako natočené o jednu drážkovou rozteč. Statorové drážky jsou typu S a rotorové drážky jsou typu W. Jednotlivé drážky jsou rozdílné z hlediska výšky a šířky. Nejširší a nejkratší drážky má stroj M VIII a to z důvodu největší indukce v zubu, která z části udává šířku zubu. Shodné rozměry pro všechny drážky jsou otevření drážky b_1 , výška h_1 a h_2 . U statorové drážky je to navíc rozměr h_3 , který udává tloušťku izolace mezi klínem a aktivní částí.

Tab. 5.7: Rozměry drážky statoru

	<i>M V</i>	<i>M VI</i>	<i>M VII</i>	<i>M VIII</i>	
Počet drážek	48	48	48	48	
b_1	3				mm
b_4	6,7	6,7	8,1	9,9	mm
b_5	10,1	10,2	11,3	12,7	mm
h_1	0,5				mm
h_2	2,5				mm
h_3	2				mm
h_4	29	30	27	25	mm
h_5	24	25	22	19	mm
h_s	34	35	33	30	mm

Tab. 5.8: Rozměry drážky rotoru

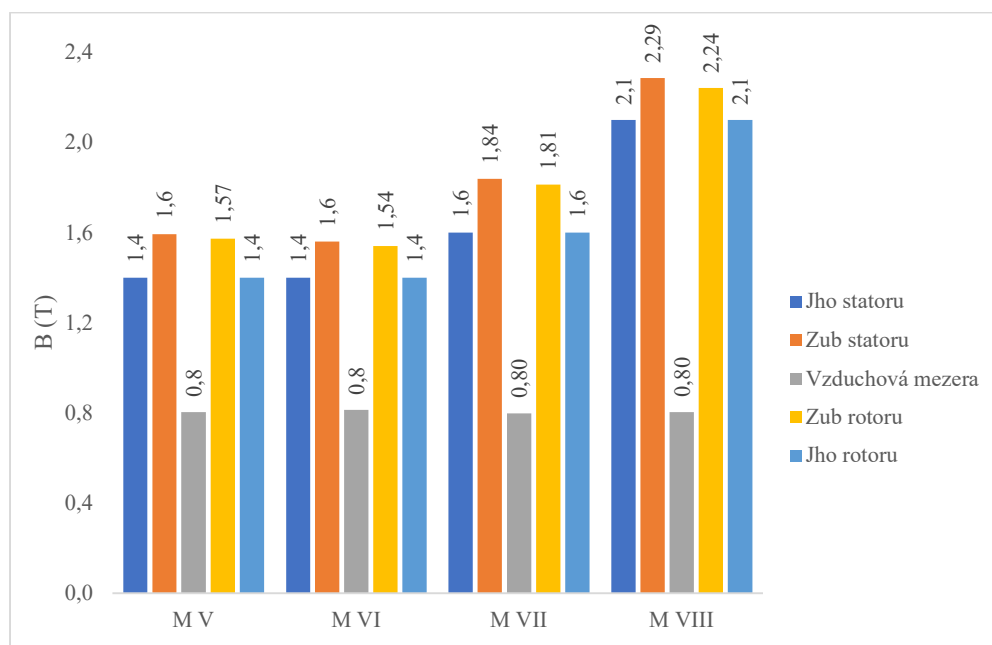
	<i>M V</i>	<i>M VI</i>	<i>M VII</i>	<i>M VIII</i>	
Počet drážek	44	44	44	44	
b_1	3				mm
b_4	6,4	6,3	7,9	9,8	mm
b_5	2,7	2,5	5,2	8,0	mm
h_1	1				mm
h_2	2				mm
h_4	27,4	28,2	21,6	17,0	mm
h_5	26	27	19,0	13,0	mm
h_r	30,4	31,2	24,6	20,0	mm

5.3 Hodnoty magnetické indukce

Hodnoty magnetické indukce se liší zejména v zubech a jhu statoru a rotoru. Odlišnost těchto hodnot je dána vlastnostmi použitých materiálů, kdy plechy z křemíkové oceli M210-35A a M350-50A se sytí v okolí hodnoty 1,6 T, zatímco u plechů na bázi slitiny železa s kobaltem se tato hodnota pohybuje v okolí 1,8 T pro materiál Vacoflux X1, respektive 2,2 T u materiálu Hiperco 50A. Konkrétní hodnoty magnetické indukce lze vyčíst z tabulky 5.9.

Tab. 5.9: Magnetická indukce v částech magnetického obvodu

	<i>M V</i>	<i>M VI</i>	<i>M VII</i>	<i>M VIII</i>	
<i>Stator</i>					
<i>V zubech</i>	1,6	1,6	1,84	2,29	<i>T</i>
<i>Ve jhu</i>	1,4	1,4	1,6	2,1	<i>T</i>
<i>Ve vzduchové mezeře</i>	0,8	0,8	0,80	0,80	<i>T</i>
<i>Rotor</i>					
<i>V zubech</i>	1,57	1,54	1,81	2,24	<i>T</i>
<i>Ve jhu</i>	1,4	1,4	1,6	2,1	<i>T</i>
<i>Výsledné magnetické napětí</i>	749,0	757,9	804,1	869	<i>A</i>
<i>Magnetizační proud</i>	22,58	22,84	24,86	28,31	<i>A</i>



Obr. 5.2: Grafické porovnání magnetických indukcí v částech stroje

5.4 Parametry náhradního schématu

Hodnoty odporů a reaktancí náhradního schématu znázorňuje tabulka 5.10. Nejmenší odpor vinutí vyšel u motoru M VIII, naopak největší odpor vinutí vyšel u motorů M V a M VI. Odpor vinutí je dán průřezem vodiče a jeho délkou. Stroj M VIII je navržen s největší aktivní plochou drážky a s nejmenším počtem závitů, což vede na nejkratší vodiče vinutí a tím i nejmenší odpor. Co se týče velikosti, tak podobně je tomu u všech ostatních parametrů až na odpor železa, který se odvíjí od ztrát v železe.

Tab. 5.10: Parametry náhradního schématu

	<i>M V</i>	<i>M VI</i>	<i>M VII</i>	<i>M VIII</i>	
<i>Odpor vinutí statoru</i>	0,101	0,101	0,093	0,075	Ω
<i>Odpor klece nakrátko</i>	7,26E-05	7,23E-05	6,65E-05	6,74E-05	Ω
<i>Odpor klece přepočtený</i>	0,108	0,108	0,094	0,086	Ω
<i>Rozptylová reaktance statoru</i>	0,676	0,687	0,590	0,492	Ω
<i>Rozptylová reaktance rotoru</i>	2,58E-04	2,56E-04	2,64E-04	2,75E-04	Ω
<i>Rozptyl rotoru přepočtený</i>	0,385	0,383	0,375	0,352	Ω
<i>Magnetizační reaktance</i>	16,76	16,56	15,19	13,30	Ω
<i>Odpor železa</i>	1205,0	804,1	1029,0	1071,3	Ω

5.5 Ztráty, účinnost a výkonová hustota

V následujících tabulkách s čísly 5.11, 5.12 a 5.13 jsou znázorněny jednotlivé ztráty ve statoru a rotoru, celkové ztráty s účinností a výkonovou hustotou. Největší Jouleovy ztráty, které jsou přímo úměrné odporu vinutí a kvadrátu proudu, vyšli u motoru M VIII, který má nejmenší odpor vinutí i klece, ale vinutím teče největší proud. Hlavní ztráty v železe vyšly nejmenší u stroje M V i přesto, že mají spolu se strojem M VI největší hmotnost. Dodatečné ztráty v železe vyšly se zanedbatelnými rozdíly stejně u všech strojů. I přes největší ztráty ze všech strojů vyšla u stroje M VIII účinnost nejvyšší, což je dáno poměrem ztrát k celkovému výkonu, který je přibližně o 25% větší než u strojů M V a M VI. U strojů M V a M VII vyšla účinnost přibližně stejně. Nejhorší účinnost vyšla u stroje M VI. Z hlediska výkonové hustoty je na tom opět stroj M VIII nejlépe, protože má největší výkon a nejmenší hmotnost. Co se týče hmotností jednotlivých strojů, tak nejtěžší vyšli stroje M V a M VI, poté následuje stroj M VII a nejlehčí je stroj M VIII. Rozdíly v hmotnosti jsou dány objemem magnetických obvodů a hustotou použitého materiálu. Hustota materiálu je u materiálů Vacoflux X1 a Hiperco 50A větší, a to přibližně o 4 % v případě Vacoflux X1 a o 7 % v případě Hiperco 50A.

Tab. 5.11: Ztráty vznikající ve statoru

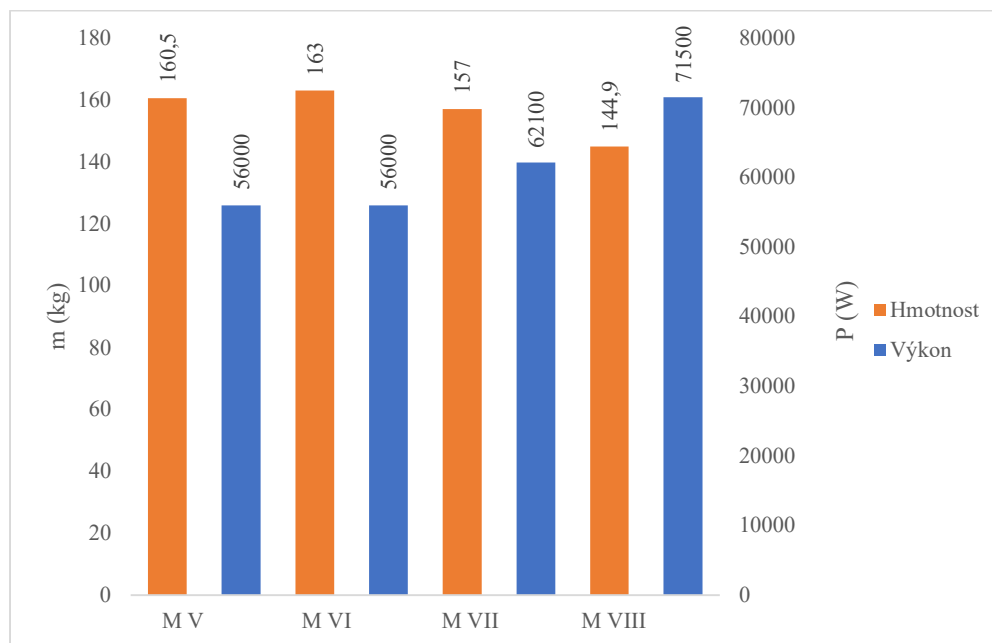
	<i>M V</i>	<i>M VI</i>	<i>M VII</i>	<i>M VIII</i>	
<i>Ztráty ve vinutí</i>	997	1005,5	1102,0	1169,5	<i>W</i>
<i>Celkové ztráty v železe</i>	356,5	534,2	495,7	282,8	<i>W</i>
<i>Hlavní ztráty v železe</i>	267,8	442,0	410,5	194,9	<i>W</i>
<i>Povrchové ztráty</i>	8,6	8,8	7,9	7,9	<i>W</i>
<i>Pulzní ztráty</i>	34,8	36,7	37,5	40,9	<i>W</i>

Tab. 5.12: Ztráty vznikající v rotoru

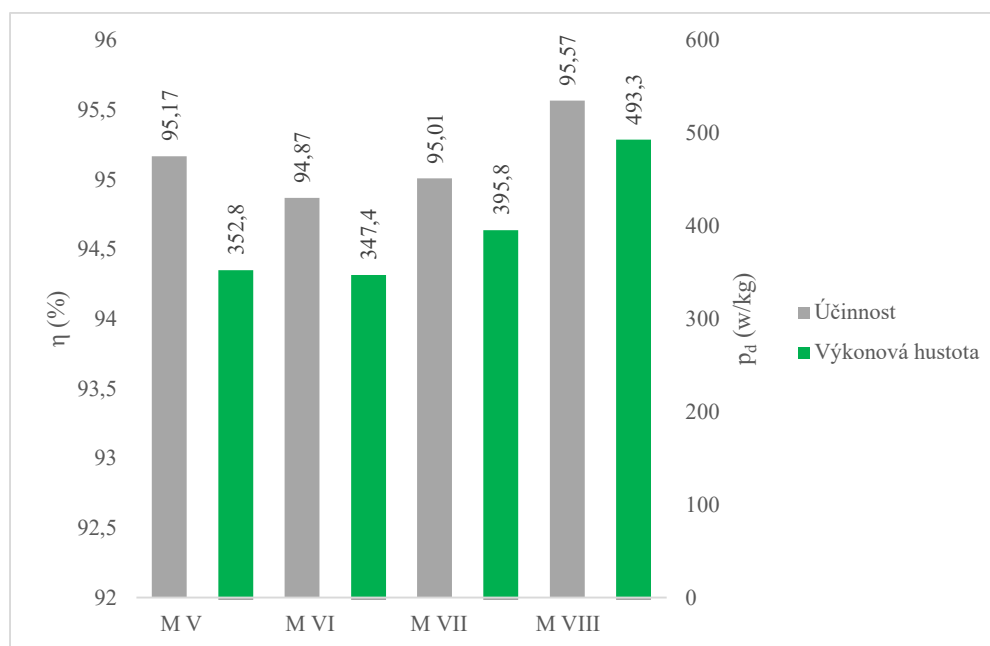
	<i>M V</i>	<i>M VI</i>	<i>M VII</i>	<i>M VIII</i>	
Ztráty v kleci nakrátko	828,2	830,2	900,2	961	<i>W</i>
Ztráty v železe	45,3	46,7	39,7	40	<i>W</i>
Povrchové ztráty	23,6	23,9	25,8	30,1	<i>W</i>
Pulzní ztráty	21,7	22,8	13,9	9,4	<i>W</i>
Mechanické ztráty	128,6	128,6	147,7	182,0	<i>W</i>
Přídavné ztráty	566,3	566,3	621,5	714,8	<i>W</i>

Tab. 5.13: Celkové ztráty stroje, účinnosti a výkonová hustota

	<i>M V</i>	<i>M VI</i>	<i>M VII</i>	<i>M VIII</i>	
Příkon	59477	59665	65367	74810	<i>kW</i>
Výkon	56600	56600	62100	71500	<i>kW</i>
Celkové ztráty	2877	3065	3267	3310	<i>W</i>
Účinnost	95,17	94,87	95,01	95,57	%
Hmotnost železa statoru	86,4	87,8	81,0	68,8	<i>kg</i>
Hmotnost železa rotoru	42,8	44,0	41,3	38,0	<i>kg</i>
Hmotnost vinutí statoru	25,9	25,9	28,6	31,5	<i>kg</i>
Hmotnost klece nakrátko	5,4	5,3	6,1	6,6	<i>kg</i>
Hmotnost aktivních částí	160,5	163,0	157,0	144,9	<i>kg</i>
Výkonová hustota	352,8	347,4	395,8	493,3	<i>W/kg</i>



Obr. 5.3: Grafické porovnání hmotností a výkonů



Obr. 5.4: Grafické porovnání účinností a výkonových hustot

5.6 Oteplení

Tabulka 5.14 znázorňuje oteplení částí strojů a potřebné průtoky vzduchu ve stroji. Opět je třeba pro určení konečné teploty jednotlivých částí k těmto hodnotám oteplení přičíst teplotu okolí, která je v tomto případě brána jako 40°C. Nejvyšší oteplení vyšlo u motoru M VIII, a to z důvodu nejvyšších ztráty ze všech strojů a stejné ochlazovací. Maximální oteplení u všech strojů splňuje podmínky pro použití izolace třídy F. Problém u těchto strojů je v oteplení hřídele, které překračuje dovolené oteplení pro ložiska. Tento problém lze vyřešit použitím vysokoteplotních ložisek. Podmínka dostatečného chlazení je splněna u všech strojů, kdy potřebný průtok chladícího vzduchu je menší než maximální průtok vzduchu, který lze získat.

Tab. 5.14: Oteplení částí stroje

<i>Oteplení:</i>	<i>M V</i>	<i>M VI</i>	<i>M VII</i>	<i>M VIII</i>	
<i>Hřídél</i>	<i>129</i>	<i>135</i>	<i>140</i>	<i>145</i>	<i>°C</i>
<i>Jho rotoru</i>	<i>129</i>	<i>135</i>	<i>140</i>	<i>145</i>	<i>°C</i>
<i>Zub rotoru</i>	<i>128</i>	<i>134</i>	<i>139</i>	<i>145</i>	<i>°C</i>
<i>Drážka rotoru</i>	<i>130</i>	<i>136</i>	<i>140</i>	<i>146</i>	<i>°C</i>
<i>Vzduch ve stroji</i>	<i>92</i>	<i>98</i>	<i>102</i>	<i>108</i>	<i>°C</i>
<i>Drážka statoru</i>	<i>80</i>	<i>86</i>	<i>89</i>	<i>93</i>	<i>°C</i>
<i>Čela vinutí</i>	<i>84</i>	<i>90</i>	<i>93</i>	<i>98</i>	<i>°C</i>
<i>Zub statoru</i>	<i>74</i>	<i>81</i>	<i>82</i>	<i>85</i>	<i>°C</i>
<i>Jho statoru</i>	<i>72</i>	<i>78</i>	<i>79</i>	<i>82</i>	<i>°C</i>
<i>Kostra stroje</i>	<i>63</i>	<i>69</i>	<i>69</i>	<i>72</i>	<i>°C</i>
<i>Štít</i>	<i>26</i>	<i>28</i>	<i>29</i>	<i>31</i>	<i>°C</i>
<i>Potřebný průtok chladiva</i>	<i>0,213</i>	<i>0,124</i>	<i>0,216</i>	<i>0,097</i>	<i>m³/s</i>
<i>Získatelný průtok chladiva</i>	<i>0,378</i>	<i>0,378</i>	<i>0,378</i>	<i>0,378</i>	<i>m³/s</i>

6 Ověření strojů pomocí metody konečných prvků

V této kapitole jsou porovnány výsledky získané pomocí analytického výpočtu strojů s výsledky získanými pomocí balíku programů ANSYS, konkrétně pomocí nástroje RMXprt a Maxwell 2D. Pro výpočet motorů museli být ručně zadány materiály M210-35A a Vacoflux X1, které se nenacházejí v knihovně těchto programů. Další dva materiály jsou v základní knihovně, konkrétně byly použity materiály Cogent Power – M350-50A a Carpenter – Hiperc 50A o tloušťce plechu 0,15 mm.

Hodnoty porovnávané v této kapitole jsou moment a výkon stroje, který je získán z tranzientní analýzy zatížených strojů a hodnoty magnetické indukce v zubech a jhu strojů, které jsou získány z tranzientní analýzy naprázdno. Jako okrajová podmínka je nastavený nulový magnetický potenciál na vnější obvod statoru.

6.1 Stroje navržené na šítkové parametry

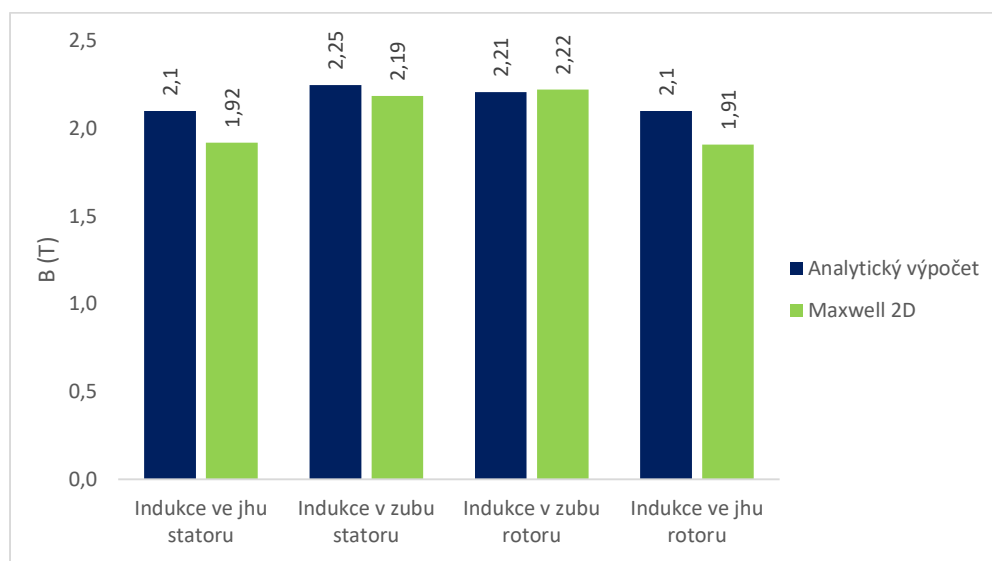
V následujících tabulkách s čísly 6.1 a 6.2 jsou porovnány výsledky získané analytickým výpočtem, výpočtem pomocí RMXprt a výsledky získané z Maxwellu 2D. Na základě těchto dvou tabulek lze prohlásit, že se výsledky získané různými způsoby shodují. Maximální rozdíl mezi jednotlivými provozními parametry se pohybuje pod 3 %. Maximální rozdíl mezi magnetickými indukcemi je u motoru M I, M II a M III okolo 5 %, u motoru M IV je to rozdíl větší, kdy se liší magnetická indukce ve jhu, a to přibližně o 9 %. Na obrázcích 6.1, 6.2, 6.3 a 6.4 jsou mapy magnetických indukcí pro jednotlivé motory. Pro indukci bylo zvoleno stejné měřítko, aby byl lépe patrný rozdíl mezi jednotlivými motory.

Tab. 6.1: Porovnání provozních parametrů

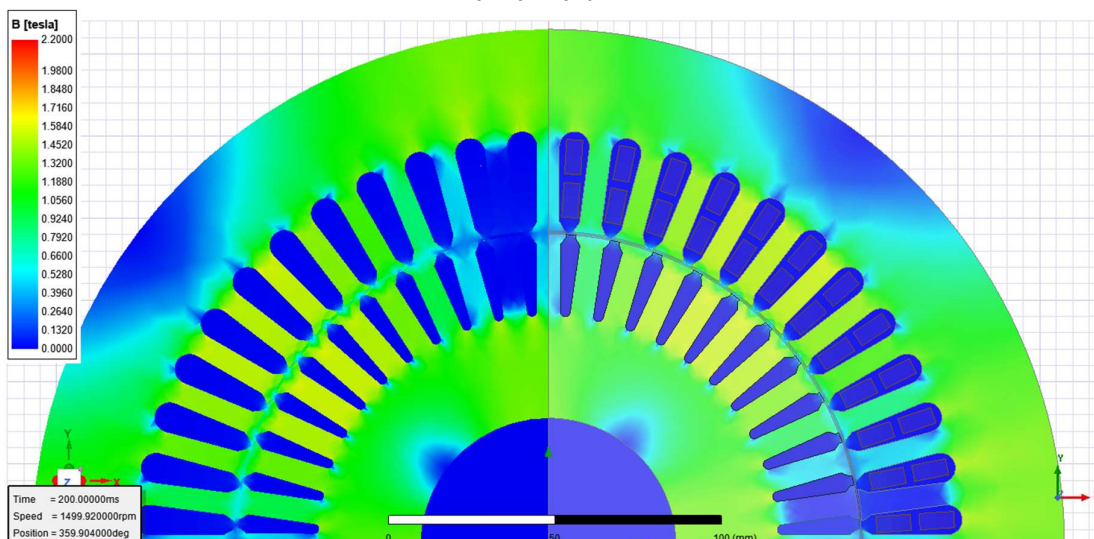
	<i>M I</i>	<i>M II</i>	<i>M III</i>	<i>M IV</i>	
<i>Analytický výpočet</i>					
<i>Příkon</i>	31820	31930	31891	31745	<i>W</i>
<i>Výkon</i>	30000	30000	30000	30000	<i>W</i>
<i>Účinnost</i>	94,28	93,95	94,07	94,50	%
<i>Moment</i>	194,9	194,9	194,9	194,9	<i>Nm</i>
<i>RMxpert</i>					
<i>Příkon</i>	31965	31996	31976	31705	<i>W</i>
<i>Výkon</i>	30000	30000	30000	30000	<i>W</i>
<i>Účinnost</i>	93,87	93,75	93,83	94,62	%
<i>Moment</i>	194	194	194	194	<i>Nm</i>
<i>Maxwell 2D</i>					
<i>Příkon</i>	31924	31882	31850	31814	<i>W</i>
<i>Výkon</i>	30666	30620	30655	30498	<i>W</i>
<i>Moment</i>	198,5	198,2	198,5	197,5	<i>Nm</i>

Tab. 6.2: Porovnání magnetických indukcí

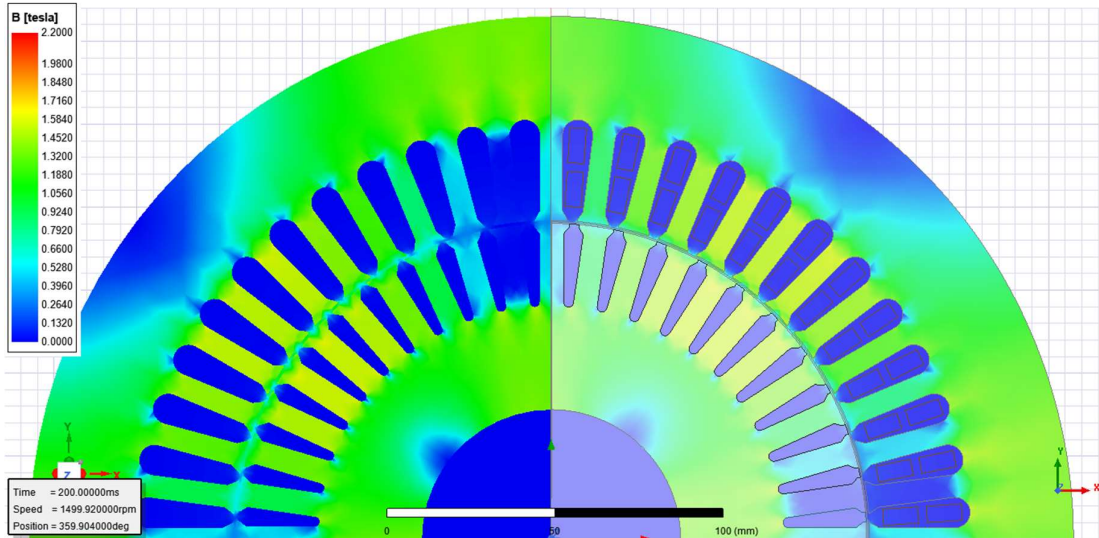
Magnetická indukce:	<i>M I</i>	<i>M II</i>	<i>M III</i>	<i>M IV</i>	
<i>Analytický výpočet</i>					
<i>Jho statoru</i>	1,4	1,4	1,6	2,1	<i>T</i>
<i>Zub statoru</i>	1,61	1,6	1,81	2,25	<i>T</i>
<i>Zub rotoru</i>	1,59	1,58	1,76	2,21	<i>T</i>
<i>Jho rotoru</i>	1,4	1,4	1,6	2,1	<i>T</i>
<i>Maxwell 2D</i>					
<i>Jho statoru</i>	1,41	1,43	1,61	1,92	<i>T</i>
<i>Zub statoru</i>	1,56	1,61	1,73	2,19	<i>T</i>
<i>Zub rotoru</i>	1,58	1,62	1,72	2,22	<i>T</i>
<i>Jho rotoru</i>	1,33	1,32	1,54	1,91	<i>T</i>



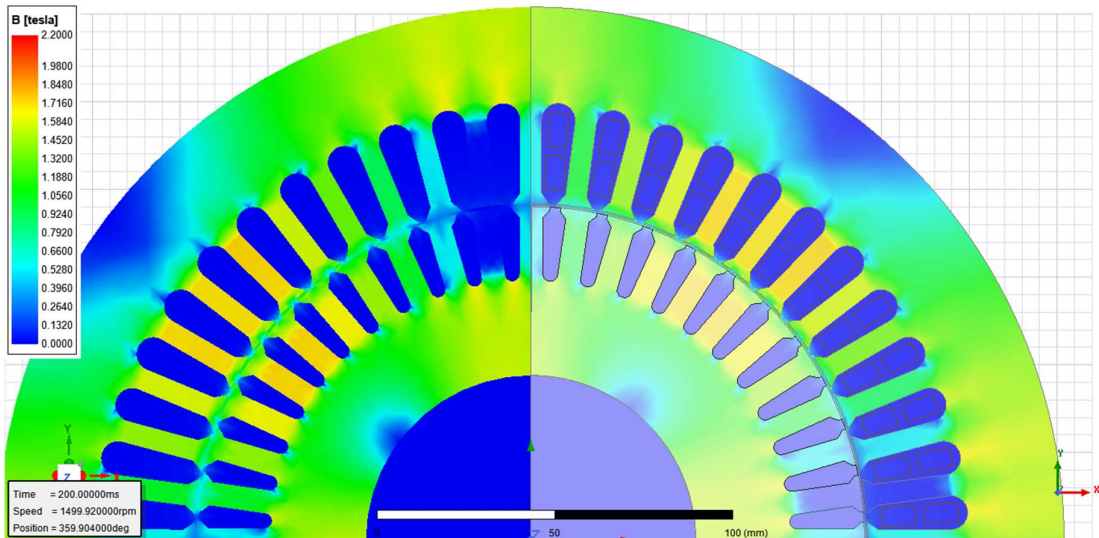
Obr. 6.1: Grafické porovnání magnetických indukcí motoru *M IV* získaných z analytického výpočtu a Maxwellu 2D



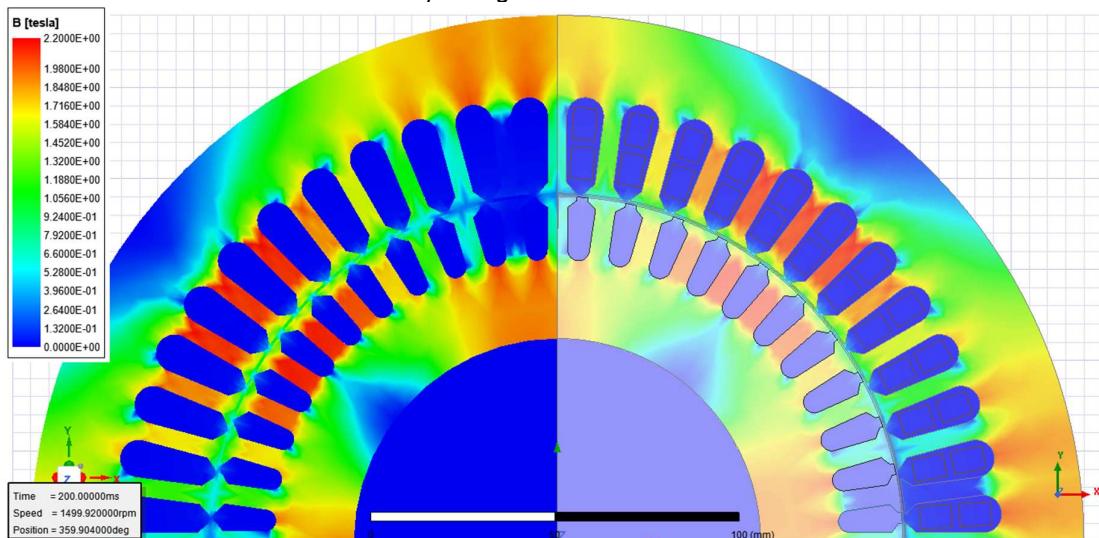
Obr. 6.2: Mapa magnetické indukce motoru M I



Obr. 6.3: Mapa magnetické indukce motoru M II



Obr. 6.4: Mapa magnetické indukce motoru M III



Obr. 6.5: Mapa magnetické indukce motoru M IV

6.2 Stroje navržené na zadané rozměry

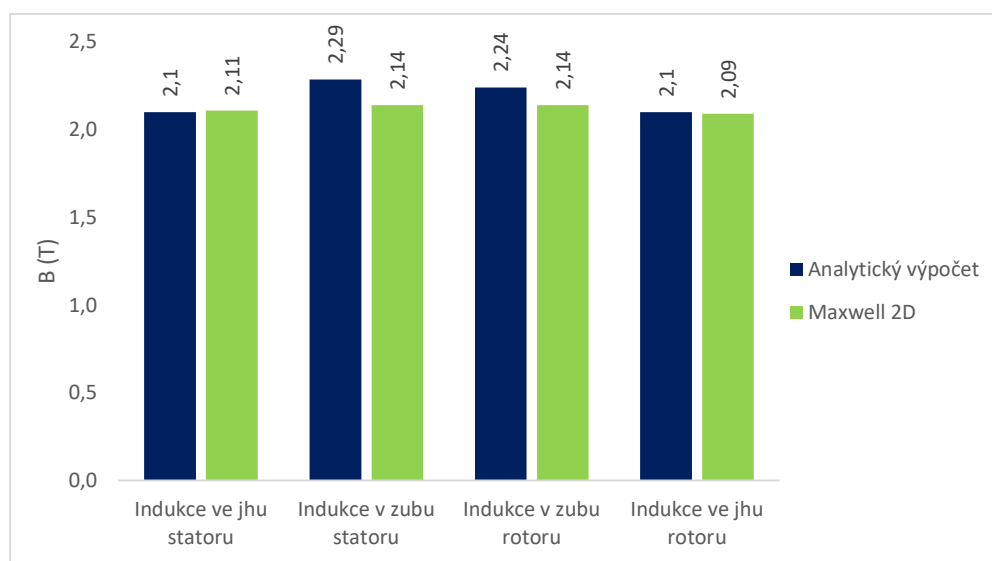
V tabulkách 6.3 a 6.4 jsou znázorněny porovnávané parametry strojů navržených na zadané rozměry. Na základě výsledků lze prohlásit, že se hodnoty získané různými postupy shodují. U provozních parametrů se největší rozdíly mezi hodnotami pohybují pod hodnotou 1 %. Magnetické indukce u motorů M V a M VI se liší maximálně o 2,5 %. U stroje M VII se pohybuje maximální rozdíl v hodnotách pod 4 %. Největší rozdíl mezi hodnotami je u motoru M VIII, a to s maximální hodnotou 6 %. Podobně jako v předchozí kapitole jsou zde přiloženy obrázky 6.5, 6.6, 6.7 a 6.8, na kterých jsou mapy magnetických indukcí jednotlivých strojů. Opět je pro všechny stroje zvoleno stejné měřítko magnetické indukce. V přílohách jsou pak mapy indukcí s různými měřítky, a mapy magnetických vektorových potenciálů.

Tab. 6.3: Porovnání provozních parametrů

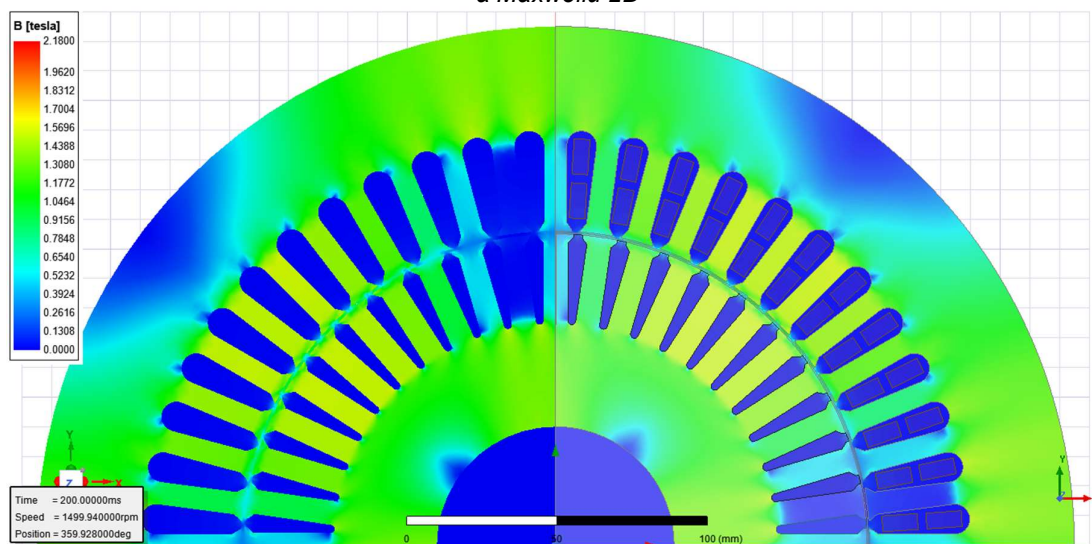
	<i>M V</i>	<i>M VI</i>	<i>M VII</i>	<i>M VIII</i>	
<i>Analytický výpočet</i>					
<i>Příkon</i>	59500	59700	65300	74900	<i>W</i>
<i>Výkon</i>	56600	56600	62100	71500	<i>W</i>
<i>Účinnost</i>	95,17	94,87	95,12	95,40	%
<i>Moment</i>	367,9	367,9	403,7	464,4	<i>Nm</i>
<i>RMxprt</i>					
<i>Příkon</i>	59300	59900	65700	74900	<i>W</i>
<i>Výkon</i>	56600	56600	62100	71500	<i>W</i>
<i>Účinnost</i>	94,57	94,45	94,57	95,48	%
<i>Moment</i>	366	366	401	461	<i>Nm</i>
<i>Maxwell 2D</i>					
<i>Příkon</i>	58600	58900	64000	74500	<i>W</i>
<i>Výkon</i>	56600	56900	62200	72300	<i>W</i>
<i>Moment</i>	366	365	401,5	466	<i>Nm</i>

Tab. 6.4: Porovnání magnetických indukcí

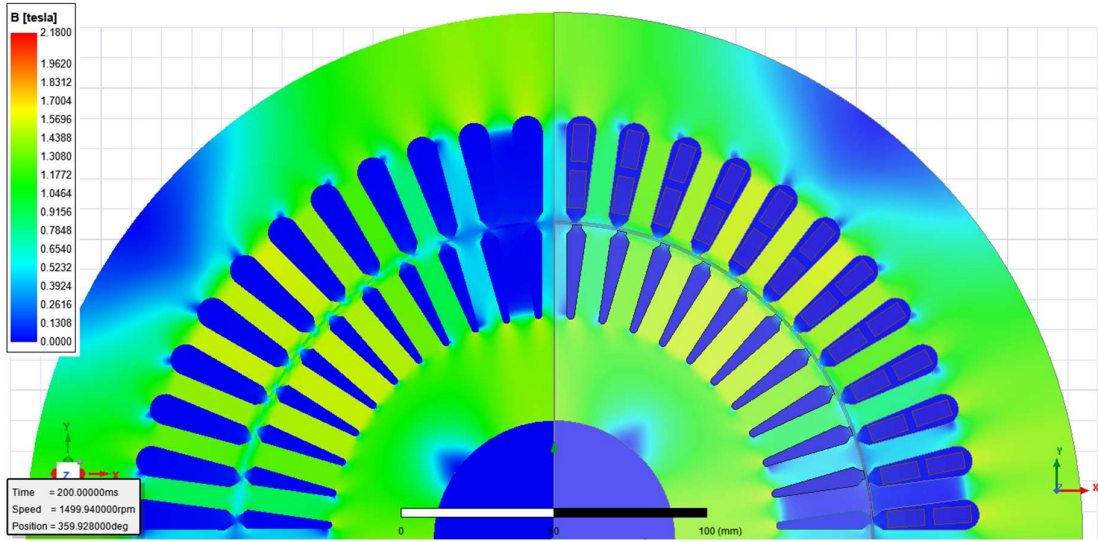
Magnetická indukce:	M V	M VI	M VII	M VIII	
<i>Analytický výpočet</i>					
Jho statoru	1,4	1,4	1,6	2,1	T
Zub statoru	1,59	1,56	1,84	2,29	T
Zub rotoru	1,57	1,54	1,81	2,24	T
Jho rotoru	1,4	1,4	1,6	2,1	T
<i>Maxwell 2D</i>					
Jho statoru	1,39	1,42	1,56	2,11	T
Zub statoru	1,54	1,56	1,76	2,14	T
Zub rotoru	1,53	1,53	1,78	2,14	T
Jho rotoru	1,35	1,42	1,54	2,09	T



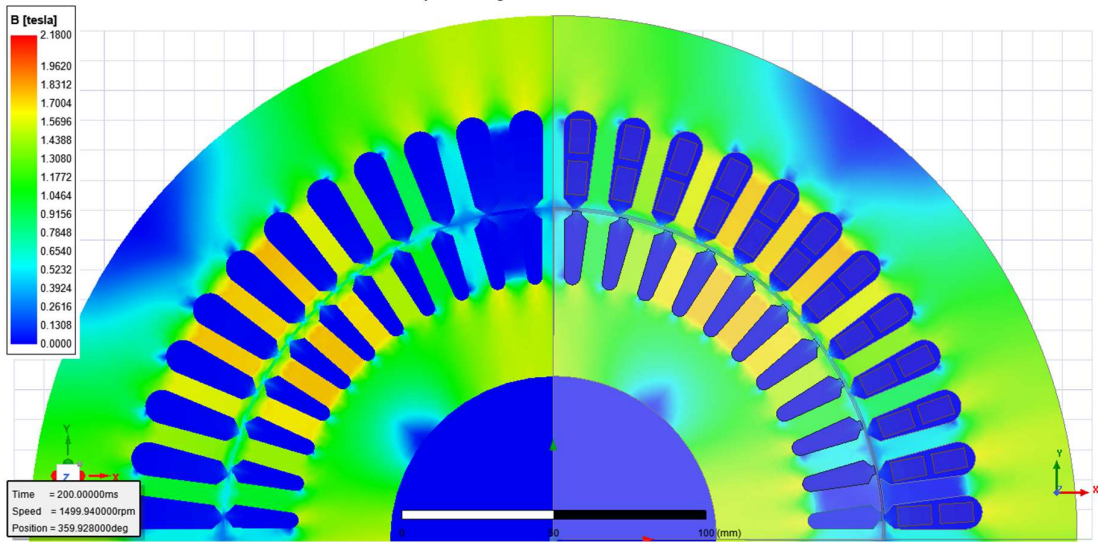
Obr. 6.6: Grafické porovnání magnetických indukcí motoru M VIII získaných z analytického výpočtu a Maxwellu 2D



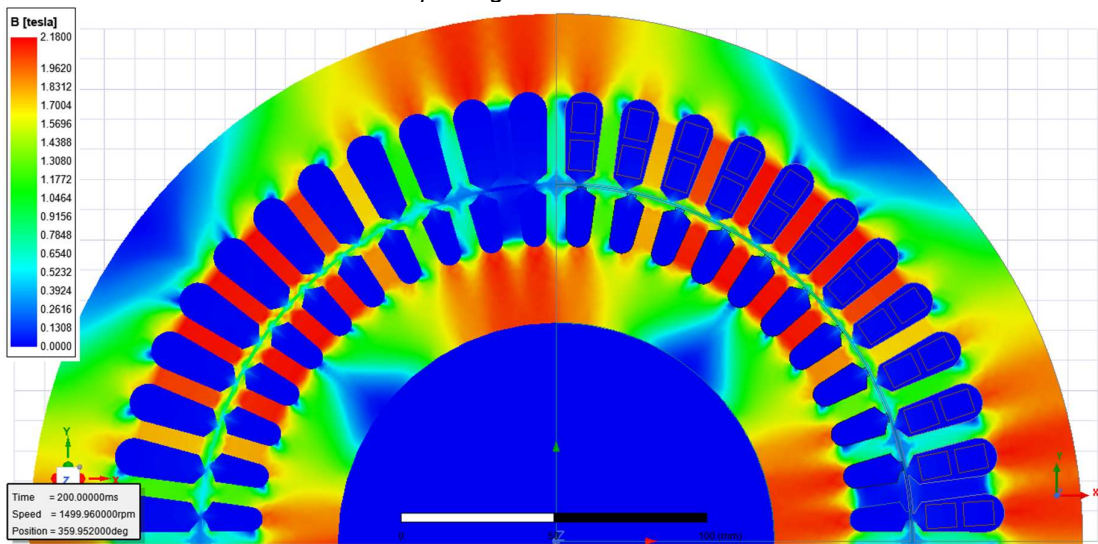
Obr. 6.7: Mapa magnetické indukce motoru M V



Obr. 6.8: Mapa magnetické indukce motoru M VI



Obr. 6.9: Mapa magnetické indukce motoru M VII



Obr. 6.10: Mapa magnetické indukce motoru M VIII

Závěr

Hlavním cíle této diplomové práce bylo ověření vlivu materiálu magnetického obvodu na účinnost a výkonovou hustotu stroje. Tyto parametry byly ověřeny na osmi asynchronních strojích, kdy čtyři jsou navrženy na zadaný výkon a čtyři jsou navrženy na zadané rozměry. Navržené stroje byly následně ověřeny pomocí metody konečných prvků. Výsledky z MKP se velmi dobře shodují s hodnotami získanými z analytického výpočtu.

V první části práce, kde jsou motory navrženy na zadaný výkon, byl hlavní cíl porovnání účinnosti. U všech motorů v této části práce byla snaha zachovat co nejpodobnější hodnoty pro návrh, tak aby se co nejvíce projevil vliv materiálu magnetického obvodu. Použité materiály se liší maximálním sycením a ztrátovým číslem. Ztráty v železe tvoří zhruba 20 % celkových ztrát stroje, z čehož vyplývá, že rozdíly v účinnosti strojů nebudou nijak markantní. Rozdíl mezi strojem s nejvyšší účinností, která vyšla u motoru M IV s magnetickým obvodem z plechů Hiperco 50A, a nejnižší účinností, která vyšla u motoru M II s magnetickým obvodem z křemíkových plechů M350-50A, vyšel 0,55 %, což odpovídá zmíněnému předpokladu. Tato hodnota znamená ušetření 186 W elektrické energie každou hodinu, kterou stroj běží. Při práci nepřetržitě celý rok a ceně elektřiny za kilowatthodinu 5 Kč, by se za rok ušetřilo přibližně 8000 Kč. Vzhledem ke skutečnosti, že je podle [7] materiál Hiperco 50A až desetkrát dražší než běžné plechy z křemíkové oceli, nedává použití tohoto materiálu pro nízkootáčkové aplikace z hlediska zvýšení účinností ekonomicky smysl. Vhodnější použití pro tyto materiály jsou vysokootáčkové aplikace, u kterých se projeví větší rozdíl mezi ztrátovými čísly křemíkových plechů a plechů vyrobených z kobaltu a železa, jak je popsáno v [8]. Z ekonomického hlediska je zajímavější porovnání plechů z křemíkové oceli M210-35A a M350-50A, u kterých se účinnost liší o 0,33 %, kde by rozdíl v ceně těchto plechů nemusel být tak markantní jako v případě materiálu Hiperco 50A.

Hlavním úkolem druhé části práce bylo porovnání výkonové hustoty strojů. Rozdíly ve výkonové hustotě lze zaznamenat už i v první části práce. Motory navržené ve druhé části jsou navrženy na maximální rozměr statoru, kdy je zadaná délka stroje a vnější průměr. Zhodnocením výsledné výkonové hustoty z první části práce lze usoudit, že při použití plechů s vyšším sycením, v tomto případě Vacoflux X1 a Hiperco 50A, lze stroj se stejným výkonem navrhnout menší a tím i lehčí, a to v případě Vacoflux X1 o 10 % a v případě Hiperco téměř o 25 %. Tato skutečnost lze potvrdit z druhé části práce, kdy pro stejné rozměry lze navrhnout stroj s výkonem o 10 % větším v případě materiálu Vacoflux X1 a o 25 % větším v případě materiálu Hiperco 50A. Dalším faktem, kterého si lze při porovnání

motorů všimnout je i přes vyšší výkon strojů M VII a M VIII menší jejich hmotnost, a to v případě stroje M VII o 3 % a v případě stroje M VIII o 10 %.

Jako vhodná oblast, kde by se materiály ze slitiny kobaltu a železa daly použít, se jeví oblast, kde je kladen důraz na co nejmenší hmotnost strojů. To by mohla být například oblast letectví, kde by se tyto materiály daly využít v kombinaci s hliníkovým vinutím statoru, tak aby se navíc snížila hmotnost vinutí.

Seznam literatury a informačních zdrojů

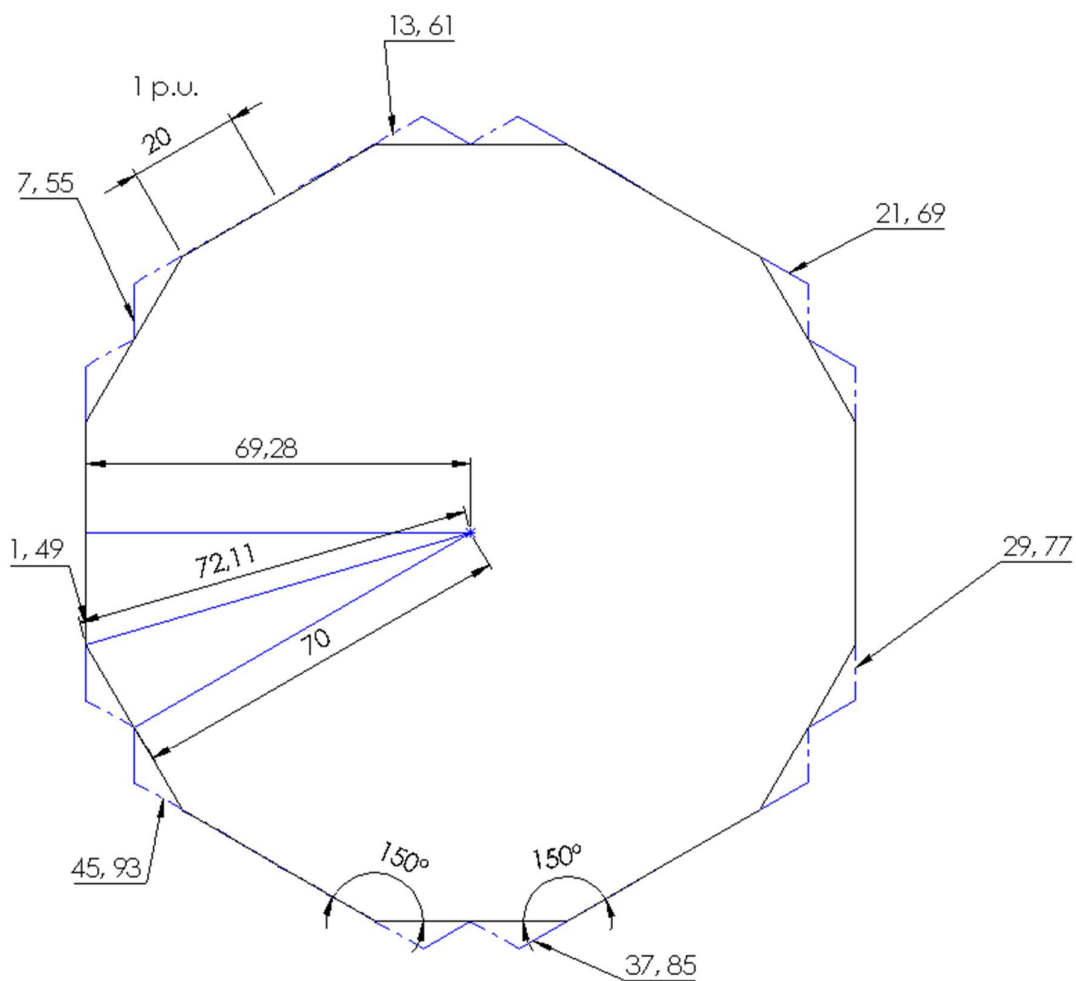
- [1] CHMELÍK, Karel. Asynchronní a synchronní elektrické stroje. Ostrava: VŠB-TUO v Ostravě, 2001. [Cit. 24.4.2021]. Dostupné z: <https://homel.vsb.cz/~ber30/stroje/AMaSMstroje.pdf>
- [2] PYRHONEN, Juha, Tapani JOKINEN a Valéria HRABOVCOVÁ. Design of Rotating Electrical Machines. Second Edition. United Kingdom: Wiley & Sons, 2014. ISBN 978-1-118-58157-5
- [3] HOLUB, Gustav. Nové třídy účinnosti asynchronních motorů. Elektro [online]. 2011, číslo 6 [Cit. 24.4.2021]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/43677.pdf>
- [4] KOPYLOV, I.P. Stavba elektrických strojů. Praha: SNTL, 1988. 658 s. ISBN 04-532-88
- [5] Tata Steel Enterprise. Datasheet materiálu M210-35A. [online]. [Cit.7.3.2021]. Dostupné z: <https://www.tatasteeleurope.com/ts/sites/default/files/M210-35A.pdf>
- [6] ČERVENÝ, Josef. Stavba elektrických strojů [Přednášky KEV/SES2]. Plzeň: ZČU v Plzni, 2012. [Cit.10.4.2021]. Dostupné z: <https://courseware.zcu.cz/portal/studium/courseware/kev/ses2>
- [7] M. Cossale, A. Krings, J. Soulard, A. Boglietti and A. Cavagnino. Practical Investigations on Cobalt–Iron Laminations for Electrical Machines. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 51, no 4. 2015 [Cit. 5.5.2021].
- [8] K. Hruska, J. Laksar and J. Sobra. The Determination of Iron Core Loss Characteristics of Special Electrical Steel Types. 2018 18th International Conference on Mechatronics – Mechatronika, 2018, pp. 1-6.
- [9] Desort, František. Elektrotechnologie (Výrova elektrických strojů a přístrojů). Praha: SNTL, 1980. 344 s.

Přílohy

Příloha 1: Tingleyho schéma vinutí

	A				C'				B			
	A'				C				B'			
1. pól	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
2. pól	25	27	29	31	33	35	37	39	41	43	45	47
	26	28	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48
3. pól	49	51	53	55	57	59	61	63	65	67	69	71
	50	52	54	56	58	60	62	64	66	68	70	72
4. pól	73	75	77	79	81	83	85	87	89	91	93	95
	74	76	78	80	82	84	86	88	90	92	94	96

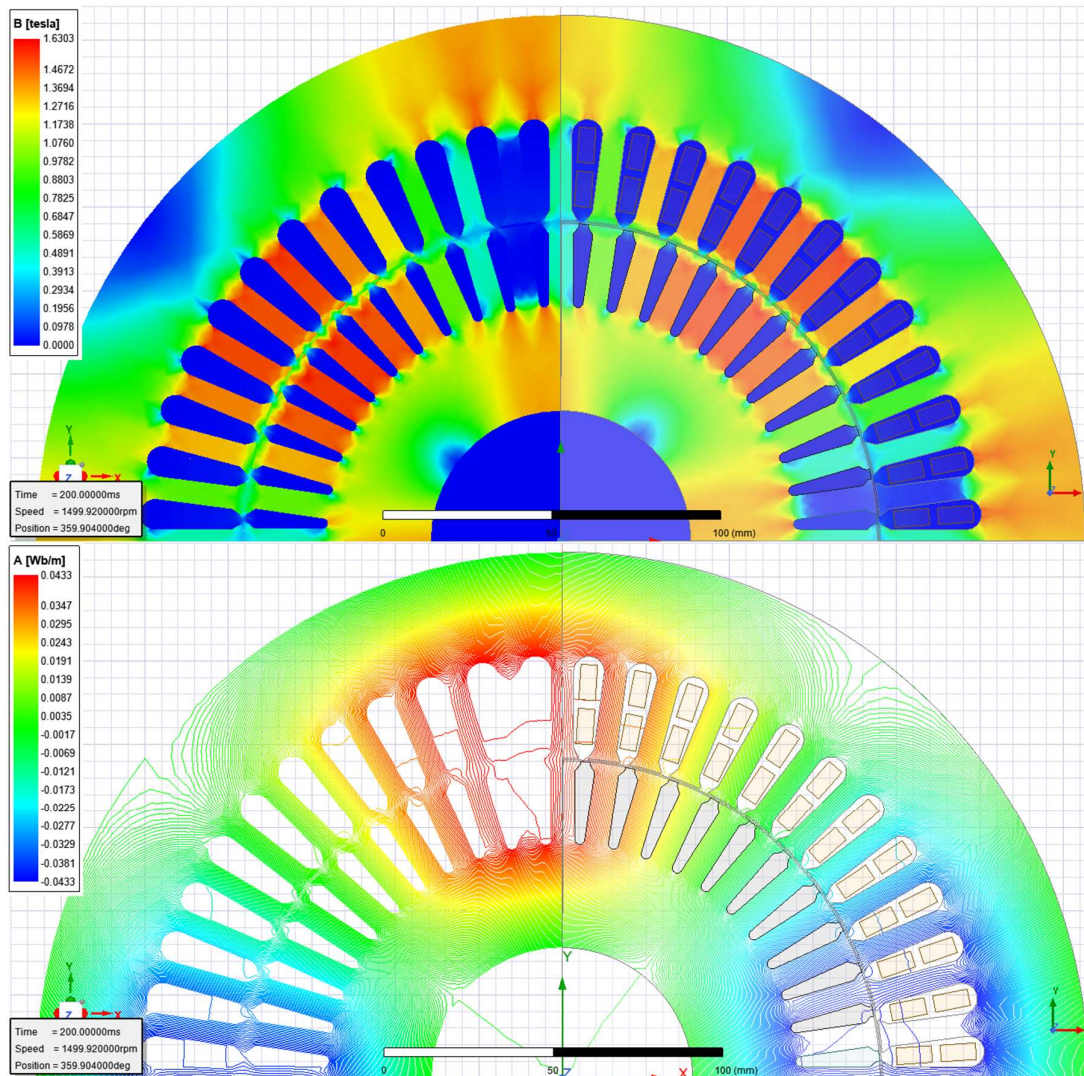
Příloha 2: Görgesův obrazec pro výpočet diferenčního rozptylu



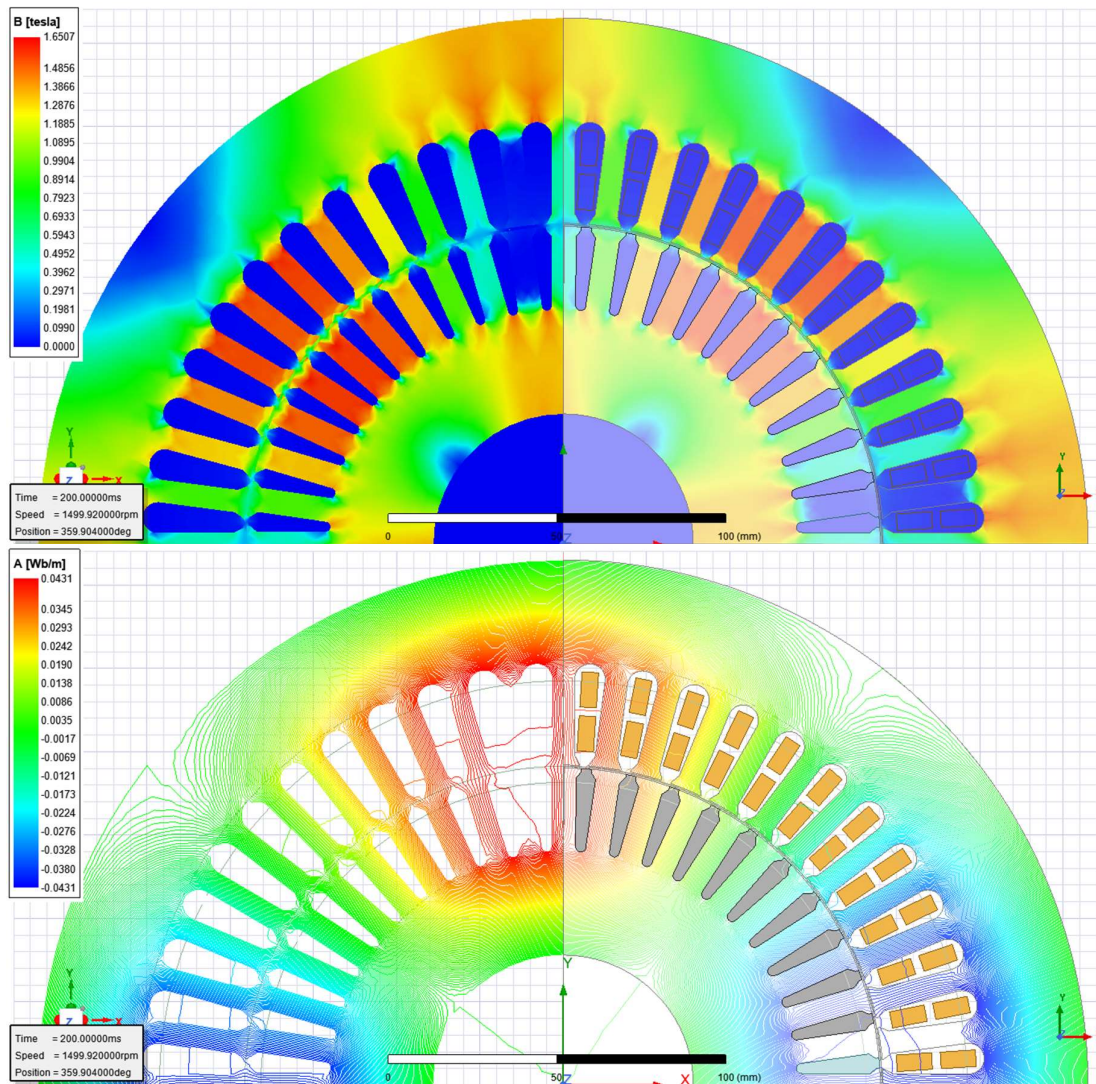
Příloha 3: Matice pro výpočet oteplení

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11			
1	G_{12}	$-G_{12}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	x	T_1	P_1
2	$-G_{12}$	$G_{12}+G_{23}+G_{24}$	$-G_{23}$	$-G_{24}$	0	0	0	0	0	0	0		T_2	P_2
3	0	$-G_{23}$	$G_{23}+G_{35}$	0	$-G_{35}$	0	0	0	0	0	0		T_3	P_3
4	0	$-G_{24}$	0	$G_{24}+G_{45}$	$-G_{45}$	0	0	0	0	0	0		T_4	P_4
5	0	0	$-G_{35}$	$-G_{45}$	$G_{35}+G_{45}+G_{56}+G_{57}+G_{58}+G_{510}+G_{511}$	$-G_{56}$	$-G_{57}$	$-G_{58}$	0	$-G_{510}$	$-G_{511}$		T_5	P_5
6	0	0	0	0	$-G_{56}$	$G_{56}+G_{67}+G_{68}+G_{69}$	$-G_{67}$	$-G_{68}$	$-G_{69}$	0	0		T_6	P_6
7	0	0	0	0	$-G_{57}$	$-G_{67}$	$G_{57}+G_{67}$	0	0	0	0		T_7	P_7
8	0	0	0	0	$-G_{58}$	$-G_{68}$	0	$G_{58}+G_{68}+G_{89}$	$-G_{89}$	0	0		T_8	P_8
9	0	0	0	0	0	$-G_{69}$	0	$-G_{89}$	$G_{69}+G_{89}+G_{910}$	$-G_{910}$	0		T_9	P_9
10	0	0	0	0	$-G_{510}$	0	0	0	$-G_{910}$	$G_{910}+G_{1012}+G_{510}$	0		T_{10}	P_{10}
11	0	0	0	0	$-G_{511}$	0	0	0	0	0	$G_{511}+G_{1113}$		T_{11}	P_{11}

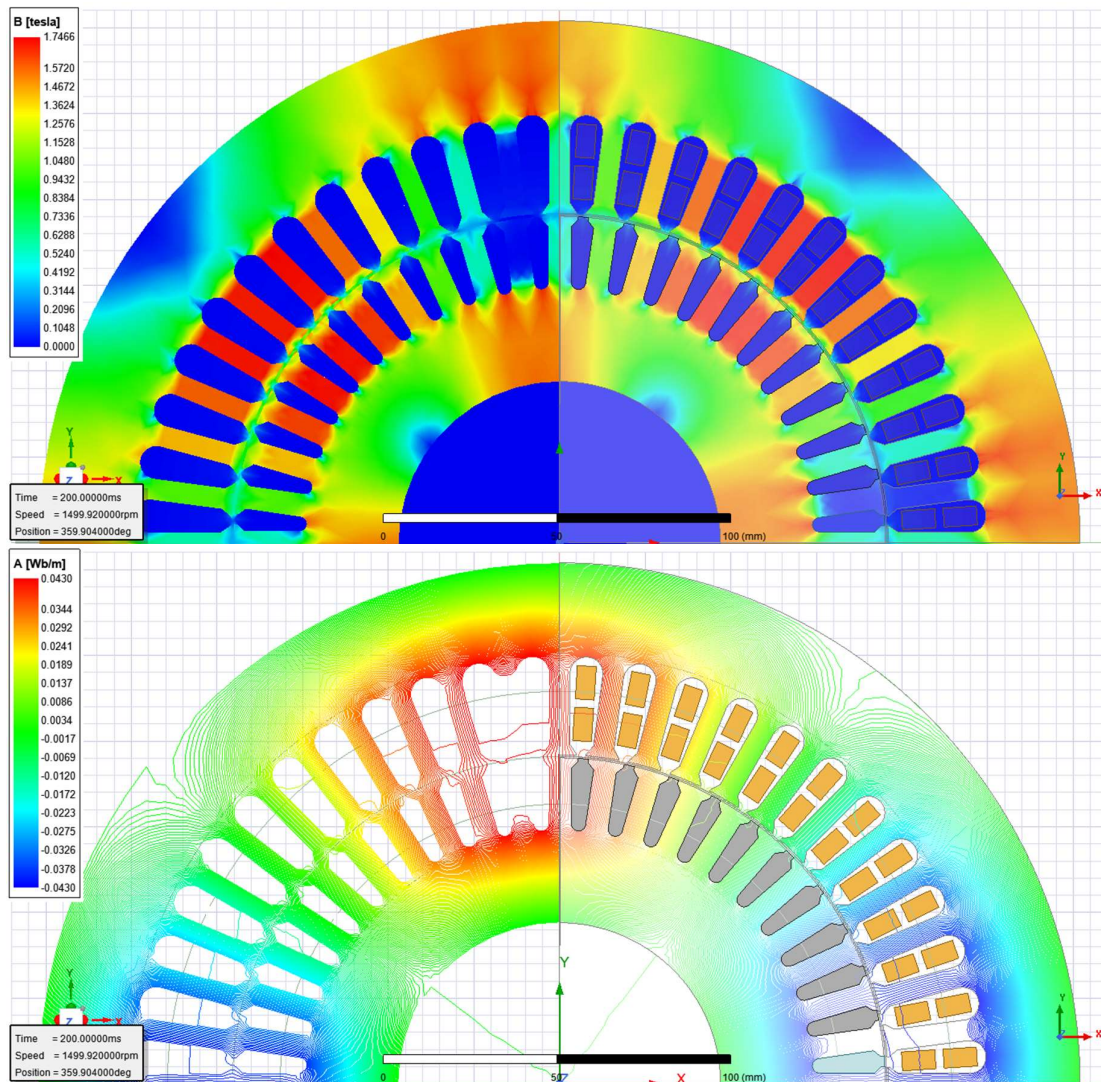
Příloha 4: Mapy magnetické indukce a magnetického vektorového potenciálu motoru M I



Příloha 5: Mapa magnetické indukce a magnetického vektorového potenciálu motoru M II

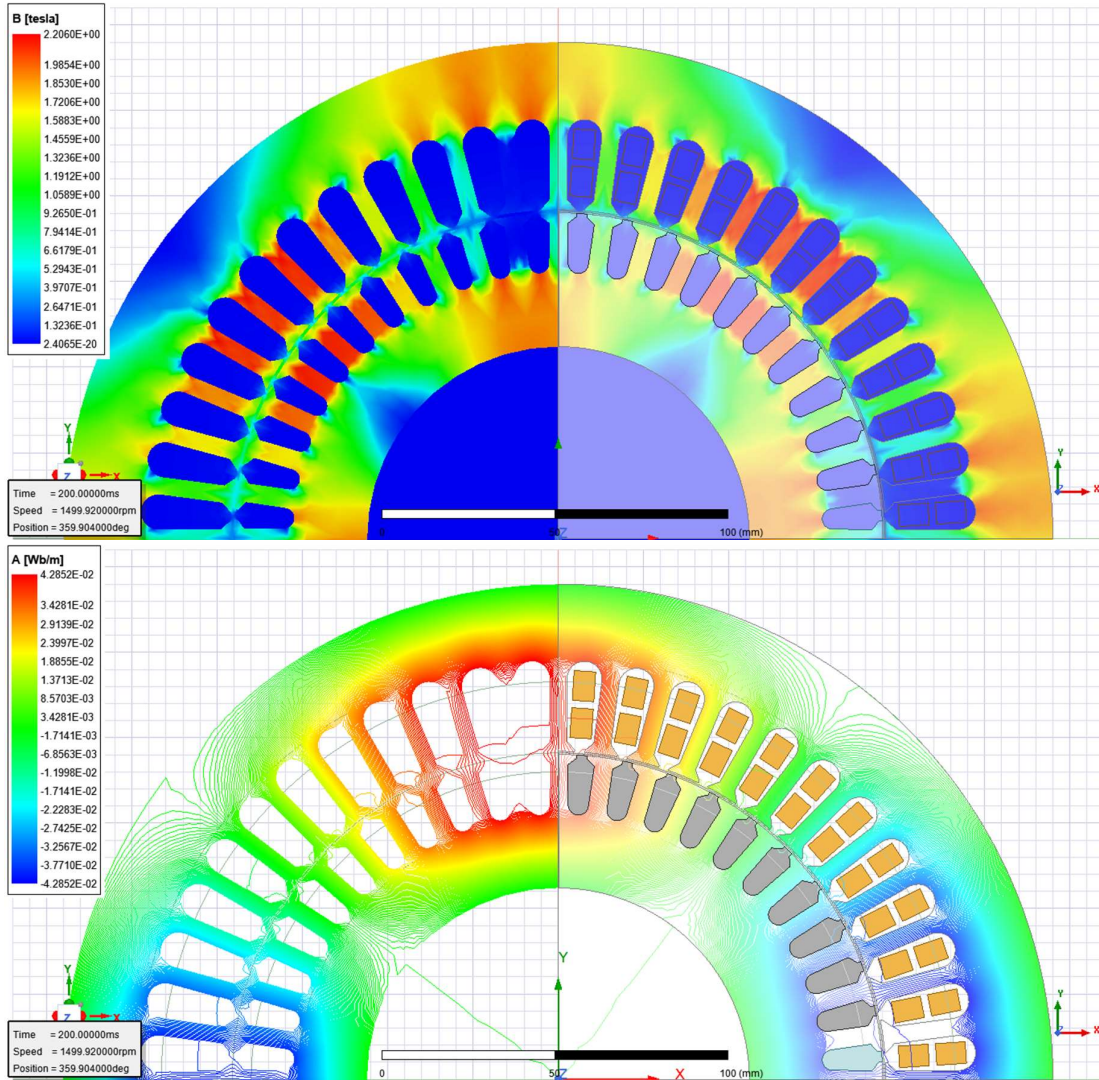


Příloha 7: Mapa magnetické indukce a magnetického vektorového potenciálu motoru M III

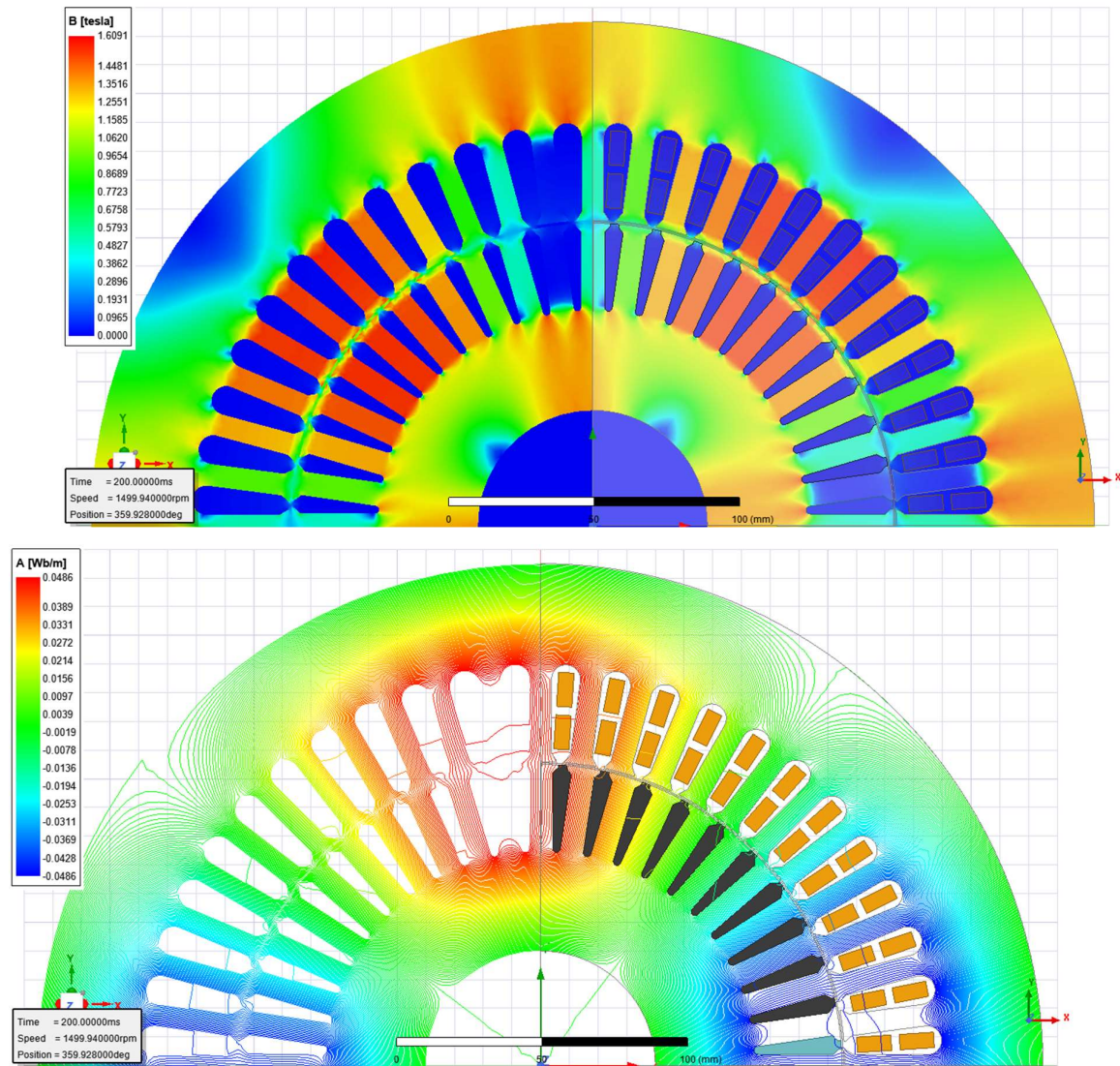


Příloha 8: Mapa magnetické indukce a magnetického vektorového potenciálu motoru

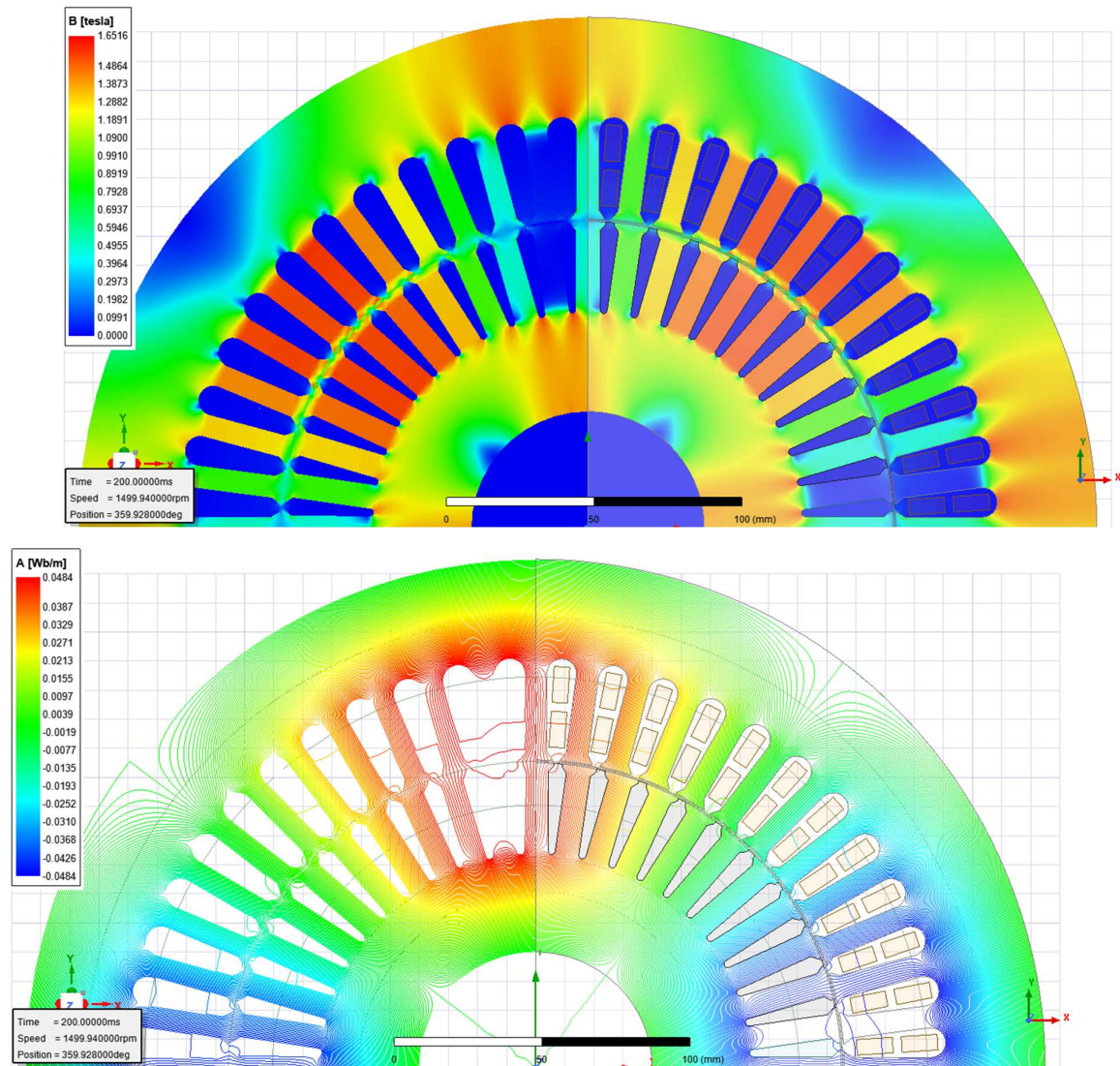
M IV



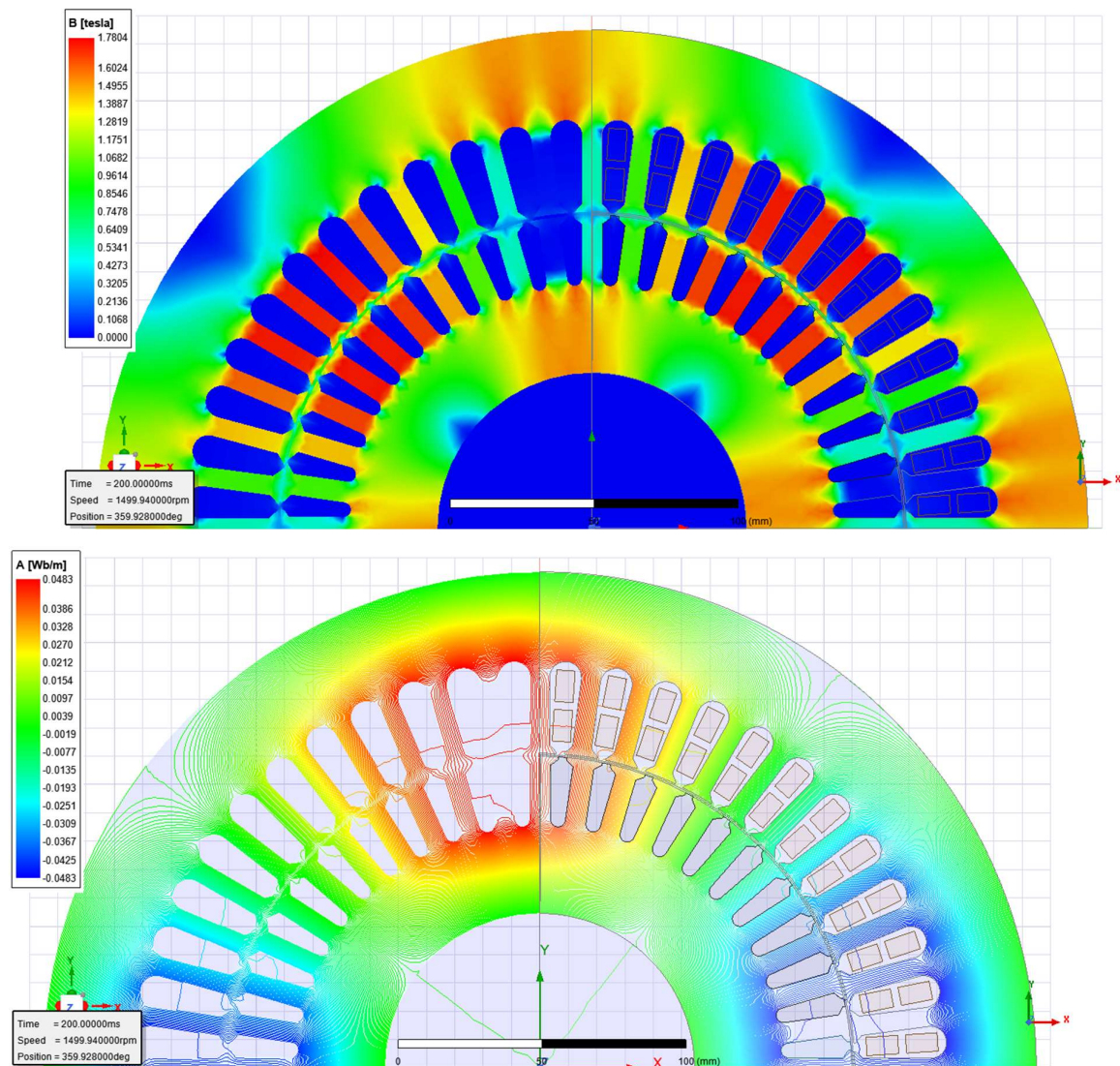
Příloha 9: Mapa magnetické indukce a magnetického vektorového potenciálu motoru M V



Příloha 10: Mapa magnetické indukce a magnetického vektorového potenciálu motoru M VI



Příloha 11: Mapa magnetické indukce a magnetického vektorového potenciálu motoru M VII



Příloha 12: Mapa magnetické indukce a magnetického vektorového potenciálu motoru M VIII

