

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Originál (kopie) zadání BP/DP

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na výpočet parametrů náhradního obvodu zadaného asynchronního trakčního motoru. Je vypočtena magnetizační charakteristika a účinnost. S využitím metody konečných prvků a příslušného softwaru je tento výpočet ověřen numerickou metodou. Cílem práce je zhodnotit, zda je možné, případně s jakou přesností, využít tohoto modelování v praxi.

Klíčová slova

Asynchronní motor, trakční motor, klec nakrátko, metoda konečných prvků, numerický výpočet, magnetizační charakteristika, účinnost, ztráty v asynchronním motoru, náhradní obvod, odpor, reaktance.

Abstract

The master thesis presents calculation of equivalent circuit parameters of the specified asynchronous traction motor. The no-load curve and efficiency of the machine are calculated. This calculation is verified by numerical analysis using finite element method and appropriate software. The objective of this thesis is to valorize if it is possible to use this simulation in practice.

Key words

Asynchronous motor, traction motor, squirrel cage, finite element method, numerical computation, no-load curve, efficiency, losses in asynchronous motor, equivalent circuit, resistance, reactance.

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.

V Plzni dne 11.5.2014

Jan Příkryl

.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Karlu Hruškovi, Ph.D a konzultantovi Ing. Pavlu Dvořákovi, Ph.D za cenné rady a připomínky při zpracování této diplomové práce.

Zvláštní poděkování patří také rodině a přátelům za trpělivost a podporu po celou dobu studia.

Obsah

OBSAH	7
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD.....	13
1 ZADÁNÍ TRAKČNÍHO MOTORU	14
1.1 VINUTÍ STROJE A JMENOVITÉ ZATÍŽENÍ	14
1.2 NAPÁJENÍ	14
1.3 S1 ZATÍŽENÍ.....	14
1.4 GEOMETRIE STROJE, PLECHŮ A DRÁŽEK	15
2 TOPOLOGIE VINUTÍ	16
3 MAGNETICKÝ OBVOD	17
3.1 VZDUCHOVÁ MEZERA	17
3.2 ZUBY STATORU	19
3.3 ZUBY ROTORU	21
3.4 JHO STATORU.....	23
3.5 JHO ROTORU	26
3.6 MAGNETIZAČNÍ PROUD	28
4 ODPORY A REAKTANCE.....	29
4.1 ODPOR STATOROVÉHO VINUTÍ	29
4.1.1 Výpočet délky čela vinutí.....	29
4.1.2 Geometrie celé cívky a její odpor.....	33
4.2 ROZPTYLOVÁ REAKTANCE STATOROVÉHO VINUTÍ.....	33
4.3 ODPOR ROTOROVÉ KLECE.....	35
4.4 ROZPTYLOVÁ REAKTANCE ROTOROVÉ KLECE.....	36
4.5 FIKTIVNÍ ODPOR ŽELEZA	37
4.5.1 Ztráty v železe.....	37
4.5.2 Činná složka proudu naprázdno.....	40

4.5.3	Výpočet fiktivního odporu	40
4.6	REAKTANCE VZÁJEMNÉ INDUKČNOSTI STATORU A ROTORU	40
5	PRACOVNÍ BOD	42
5.1	PŘEPOČET HODNOT	42
5.2	VLIV POVRCHOVÉHO JEVU A NASYCENÍ.....	44
5.2.1	Vliv povrchového jevu na odpor a reaktanci rotorového vinutí.....	45
5.2.2	Vliv nasycení na rozptylové reaktance stroje při stavu nakrátko.....	46
5.3	OVĚŘENÍ SKLUZU	48
6	ÚČINNOST.....	50
7	MODELOVÁNÍ STROJE POMOCÍ PROGRAMU FEMM	51
7.1	POSTUP PŘI MODELOVÁNÍ.....	51
7.2	ODPORY A REAKTANCE ZÍSKANÉ POMOCÍ MODELOVÁNÍ	52
7.2.1	Odpor statorového vinutí	52
7.2.2	Odpor rotorového vinutí	52
7.2.3	Rozptylová reaktance statorového vinutí	53
7.2.4	Rozptylová reaktance rotorového vinutí	53
7.2.5	Magnetizační reaktance	54
7.3	MAGNETIZAČNÍ CHARAKTERISTIKA	54
8	VERIFIKACE	55
8.1	PARAMETRY NÁHRADNÍHO SCHÉMATU	55
8.2	MAGNETICKÁ INDUKCE.....	56
8.3	ÚČINNOST	56
	ZÁVĚR	57
	SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	58
	PŘÍLOHY	59

Seznam symbolů a zkratek

$2p$	.....počet pólů
a	.....počet paralelních větví
a_{kn}	.....šířka kruhu nakrátko
b_0	.....otevření drážky
b_d	.....šířka drážky
B_j	.....magnetická indukce jha
b_{kn}	.....výška kruhu nakrátko
B_z	.....magnetická indukce v zubu
b_z	.....šířka zubu
B_δ	.....magnetická indukce ve vzduchové mezeře
c_{1pn}	.....činitel rozptylu
D_I	.....vnitřní průměr statoru
D_e	.....vnější průměr statoru
D_{kn}	.....střední průměr kruhu nakrátko
F_m	.....magnetické napětí celého magnetického obvodu
f_z	.....napájecí frekvence bodu zlomu
h'_j	.....výpočtová výška jha
h_d	.....hloubka drážky
H_j	.....magnetická intenzita jha
h_j	.....výška jha
H_z	.....magnetická intenzita v zubu
h_z	.....výška zubu
$I_{0\varepsilon}$	.....činná složka proudu naprázdno
I_1	.....fázový proud statoru
I_2	.....proud rotoru, proud tyče

I_μ	magnetizační proud
K	počet cívek
K'	počet cívek na jednu paralelní větvi vinutí spojených do série
k_c	Cartéřův činitel
k_{Fe}	činitel plnění železa
k_R	činitel zvětšení odporu
k_{sat}	činitel nasycení zubů
k_{y1}	činitel vinutí statoru
k_{y1}	činitel zkrácení kroku statorového vinutí
k_z	činitel pro korekci indukce v zubu vlivem rozptylu
$l_{Fe,1,2}$	délka paketu magnetického obvodu
l_i	délka paketu magnetického obvodu s uvažováním rozptylu
l_j	délka siločáry
L_μ	magnetizační indukčnost
$L_{\sigma d}$	rozptylová indukčnost v drážkové části vinutí
M	moment
m_1	počet fází statorového vinutí
m_j	hmotnost jha
M_n	jmenovitý moment
m_z	hmotnost zubů
N_1	počet závitů cívky spojených do série
n_2	otáčky rotoru
$N_{cívky}$	počet závitů jedné cívkové strany v drážce
n_s	synchronní otáčky
p	počet pólů
P_2	výkon na hřídeli

p_i	.....	činitel přepočtu proudů
q	.....	počet drážek na pól a fázi
Q_1	.....	počet drážek statoru
Q_2	.....	počet drážek rotoru
R'_2	.....	odpor rotoru přepočtený na stator
$R_{1,2}$	.....	odpor statoru, rotoru
R_{ldr}	.....	odpor statoru v drážkové části vinutí
R_{Fe}	.....	fiktivní odpor železa
R_t	.....	odpor tyče
s	.....	skluz
S_{kn}	.....	průřez kruhu nakrátko
S_t	.....	průřez tyče
t_d	.....	drážková rozteč
t_p	.....	pólová rozteč
U_i	.....	indukované napětí
U_j	.....	magnetické napětí jha
U_{s1z}	.....	sdužené napájecí napětí v bodu zlomu
U_z	.....	magnetické napětí zubu
U_δ	.....	magnetické napětí vzduchové mezery
W_m	.....	energie magnetického pole
$X'_{\sigma 2}$	.....	rozptylová reaktance rotoru přepočtená na statoru
X_{12}	.....	vzájemná reaktance vinutí
X_μ	.....	magnetizační reaktance
X_σ	.....	celková rozptylová reaktance vinutí
X_σ	.....	rozptylová reaktance
Y	.....	spojení vinutí do hvězdy

y_{1d}	.....krok vinutí v počtu drážek
α_{el}	.....elektrický úhel mezi následujícími drážkami
α_i	.....činitel pólového krytí
β	.....zkrácení kroku
γ	.....elektrická vodivost
Δ	.....relativní odchylka
δ	.....šířka vzduchové mezery
ΔP	.....celkové ztráty
$\Delta p_{1,0/50}$	.....ztrátové číslo plechů
ΔP_d	.....přídavné ztráty
ΔP_{Fe}	.....ztráty v železe
ΔP_{Feh}	.....hlavní ztráty v železe
ΔP_j	.....Jouleovy ztráty
ΔP_{mech}	.....mechanické ztráty
ΔP_p	.....pulzační ztráty
$\Delta P_{\delta p}$	.....povrchové ztráty
η	.....účinnost
$\lambda_{\check{c}}$	.....činitel magnetické vodivosti čel
λ_d	.....činitel magnetické vodivosti drážky
λ_{dif}	.....činitel magnetické vodivosti diferenčního rozptylu
μ_0	.....permeabilita vakua
ξ	.....redukovaná výška vodiče
ρ	.....objemová hustota
Φ	.....magnetický tok
ω	.....kruhová rychlost

Úvod

Diplomová práce je zaměřena na výpočet parametrů náhradního schématu asynchronního trakčního motoru s klecí nakrátko, výpočet účinnosti a magnetizační charakteristiky. Dále je k výpočtům využita numerická metoda ve výpočetním softwaru FEMM. Cílem této práce je zhodnotit, do jaké míry může dopomoci využití tohoto softwaru při návrhu motoru.

Asynchronní motor je pro své nesporné výhody, jako jsou jednoduchost konstrukce, spolehlivost, nízké nároky na údržbu a další, nejpoužívanějším elektromotorem. Spolu s frekvenčním měničem tvoří v oblasti elektrických pohonů jednotku s výhodnými regulačními vlastnostmi. V poslední době, kdy je čím dál více důležitý poměr cena/výkon, je třeba navrhovat motor tak, aby byl schopen splnit určené požadavky a zároveň, aby nebyl zbytečně předimenzován. Výpočty při návrhu by tedy měli být co možná nejpřesnější. K tomu lze využít výpočetní techniku a příslušné programové vybavení. Těmito programy lze výpočty relativně rychle ověřovat, modelovat různé stavy, graficky je znázornit, jde však o to, s jakou přesností.

Práce je rozdělena celkem do osmi samostatných částí. V úvodní části jsou uvedeny parametry zadaného trakčního motoru. Ve druhé je rozebrána topologie vinutí a určen činitel vinutí. V dalších dvou částech je proveden výpočet rozložení magnetického pole v magnetickém obvodu a výpočet prvků náhradního schématu pro zadaný bod zlomu. V kapitole Pracovní bod je zjištěna jmenovitá frekvence a skluz stroje a všechny parametry stroje jsou přepočteny pro tento pracovní bod. Účinnost stroje je vypočítána v šesté části. V sedmé je potom provedena analýza parametrů náhradního schématu na základě modelování a vypočítána magnetizační charakteristika. Poslední část je věnována verifikaci dosažených výsledků.

1 Zadání trakčního motoru

Pro zpracování této diplomové práce bylo zadáno konkrétní uspořádání a parametry trakčního třífázového asynchronního motoru s klecí nakrátko, napájeného z třífázového měniče kmitočtu. Zadanými parametry jsou požadovaný výkon na hřídeli motoru a jmenovitá otáčky motoru, výstupní parametry měniče kmitočtu, parametry vinutí, geometrie a fyzikální parametry plechů magnetického obvodu a celková geometrie stroje.

1.1 Vinutí stroje a jmenovité zatížení

počet fází	$m = 3$
počet pólů	$2p = 4$
počet paralelních větví	$a = 4$
krok vinutí v počtu drážek	$y_{1d} = 15$
druh vinutí	smyčkové, dvouvrstvé
spojení vinutí	Y
počet závitů cívky	$N_{cívky} = 7$

1.2 Napájení

Motor je napájen frekvenčním měničem kmitočtu. Výstupním blokem tohoto měniče je napěťový střídač. Parametry střídače:

maximální sdružené napětí	$U_{slz} = 1080 \text{ V}$
frekvence bodu zlomu	$f_z = 57 \text{ Hz}$

Frekvence a indukované napětí motoru spolu úzce souvisejí. Při jejich konstantním poměru bude magnetický tok ve stroji také konstantní. Při dosažení frekvence bodu zlomu bude napětí střídače maximální. Při zvyšování frekvence nad bod zlomu není tedy možné udržet konstantní poměr napětí a frekvence a magnetický tok se bude snižovat.

1.3 S1 zatížení

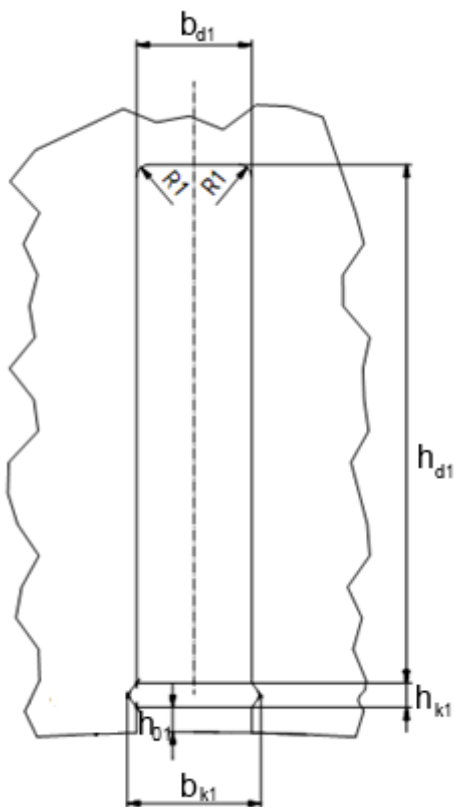
Jedná se o konstantní zatížení, které je trvalé, nebo trvá alespoň tak dlouho, že dojde k ustálení teploty ve stroji. S1 zatížení lze také nazvat zatížením jmenovitým. Zadané hodnoty:

výkon na hřídeli	$P_2 = 475 \text{ kW}$
otáčky rotoru	$n_2 = 1285 \text{ ot./min}$

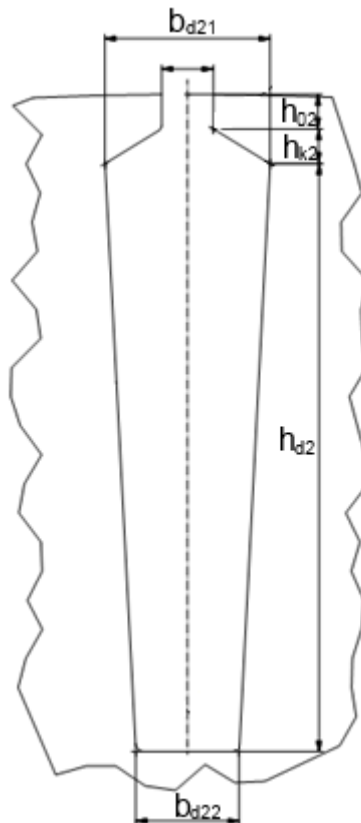
1.4 Geometrie stroje, plechů a drážek

délka paketu magnetického obvodu	$l_i = l_{Fe} = l_1 = l_2 = 280 \text{ mm}$
rozměr holého vodiče	$7,5 \times 2,5 \text{ mm}$
rozměr kruhu nakrátko	$36,5 \times 46,5 \text{ mm}$
druh oceli	M330-50A
objemová hustota	$\rho = 7650 \text{ kg/m}^3$
ztrátové číslo plechů	$\Delta p_{1,0/50} = 1,3$
tloušťka plechů	$0,5 \text{ mm}$
činitel plnění železa	$k_{Fe} = 0,97$
počet drážek statoru	$Q_1 = 72$
počet drážek rotoru	$Q_2 = 60$

Paket statoru i rotoru má axiální ventilační kanály ve dvou řadách.



Obrázek 1.1. Drážka statoru



Obrázek 1.2. Drážka rotoru

Součástí zadání trakčního motoru je také magnetizační charakteristika plechů, jejíž hodnoty jsou uvedeny v příloze A.

2 Topologie vinutí

Na základě zadaných údajů lze sestavit Tingleyho schéma, které znázorňuje uspořádání vinutí po obvodu statoru a je vhodné ho využít při vytváření MKP modelu. Z Tingleyho schématu je také možné jednoduchým způsobem spočítat činitel vinutí, který je důležitý pro další výpočty.

Počet drážek na pól a fázi:

$$q = \frac{Q_1}{2pm} = \frac{72}{4 \cdot 3} = 6 = \frac{n}{c} = \frac{6}{1} \quad (2.1)$$

Počet sloupců Tingleyho schématu:

$$m \cdot n = 3 \cdot 6 = 18 \quad (2.2)$$

Tingleyho schéma je znázorněno v tabulce 2.1. Počet řádků je $2p$, podle jmenovatele c je vyplněné každé pole a čárkovaně je znázorněna osa fáze C.

	A A'						C' C						B B'					
p = 1	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29	31	33	35
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36
p = 2	37	39	41	43	45	47	49	51	53	55	57	59	61	63	65	67	69	71
	38	40	42	44	46	48	50	52	54	56	58	60	62	64	66	68	70	72
p = 3	73	75	77	79	81	83	85	87	89	91	93	95	97	99	101	103	105	107
	74	76	78	80	82	84	86	88	90	92	94	96	98	100	102	104	106	108
p = 4	109	111	113	115	117	119	121	123	125	127	129	131	133	135	137	139	141	143
	110	112	114	116	118	120	122	124	126	128	130	132	134	136	138	140	142	144

| osa fáze C

Tabulka 2.1. Tingleyho schéma vinutí

Elektrický úhel mezi následujícími drážkami:

$$\alpha_{el} = \frac{180^\circ}{m \cdot n} = \frac{180^\circ}{3 \cdot 6} = 10^\circ \quad (2.3)$$

Činitel vinutí:

$$k_{vl} = \frac{8\cos 0^\circ + 16\cos 10^\circ + 8\cos 20^\circ + 8\cos 30^\circ + 8\cos 40^\circ}{48} = 0,924 \quad (2.4)$$

3 Magnetický obvod

Ztráty a některé parametry náhradního schématu jsou úměrné magnetizačnímu proudu motoru, který je závislý na magnetickém toku a geometrii stroje.

Magnetický tok lze určit z rovnice pro indukované napětí ve stroji. Indukované napětí však není v této fázi známé a jako počáteční podmínky jsou tedy brány hodnoty bodu zlomu. V rovnici pro indukované napětí je ještě jedna neznámá, kterou je počet závitů v sérii jedné fáze. Lze ji určit pomocí zadaných parametrů.

Počet jednotlivých cívek ve stroji je pro dvouvrstvé vinutí stejný jako počet drážek:

$$K = Q_1 = 72 \quad (3.1)$$

Počet cívek na jednu fázi a na jednu paralelní větví vinutí spojených do série:

$$K' = \frac{K}{ma} = \frac{72}{3 \cdot 4} = 6 \quad (3.2)$$

Jedna cívka má 7 závitů. Počet závitů jedné fáze a jedné paralelní větve je tedy:

$$N_1 = 7K' = 7 \cdot 6 = 42 \quad (3.3)$$

Nyní lze určit magnetický tok procházející strojem pro bod zlomu:

$$\Phi = \frac{U_{f1z}}{4,44N_1k_{v1}f_z} = \frac{1080}{\sqrt{3} \cdot 4,44 \cdot 42 \cdot 0,924 \cdot 57} = 0,0635 \text{ Wb} \quad (3.4)$$

3.1 Vzduchová mezera

Magnetická indukce ve vzduchové mezeře:

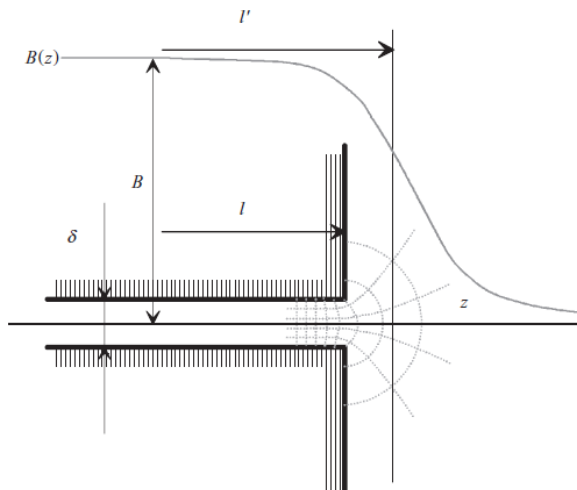
$$B_\delta = \frac{\Phi}{\alpha_i t_p l_i} = \frac{0,0635}{0,64 \cdot 0,33 \cdot 0,2835} = 1,061 \text{ T} \quad (3.5)$$

kde α_i je činitel pólového krytí. Pro první výpočet je předpokládáno rozložení magnetické indukce ve vzduchové mezeře sinusové a činitel pólového krytí má hodnotu 0,64. Pólová rozteč:

$$t_p = \frac{\pi D_1}{2p} = \frac{\pi 0,42}{4} = 0,33 \text{ m} \quad (3.6)$$

a l_i je ideální délka vzduchové mezeře, která respektuje rozptyl magnetického pole na okrajích magnetického obvodu (Obrázek 3.1.):

$$l_i = l_{Fe} + 2\delta = 280 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 1,75 \cdot 10^{-3} = 283,5 \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad (3.7)$$



Obrázek 3.1. Rozptyl magnetického pole ve vzduchové mezeře [2]

Pro výpočet magnetického napětí vzduchové mezeře je nutné znát Cartérův činitel k_c , respektující drážkování magnetického obvodu. Počítá se zvlášť pro stator i rotor, výsledkem je jejich součin a pro jeho výpočet je potřeba znát drážkové rozteče:

$$t_{d1} = \frac{\pi D_1}{Q_1} = \frac{\pi \cdot 0,42}{72} = 18,33 \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad (3.8)$$

$$t_{d2} = \frac{\pi D_2}{Q_2} = \frac{\pi \cdot (D_1 - 2\delta)}{Q_2} = \frac{\pi \cdot (0,42 - 2 \cdot 1,75 \cdot 10^{-3})}{60} = 21,81 \cdot 10^{-3} \text{ mm} \quad (3.9)$$

Cartérův činitel pro stator (vztah pro otevřené drážky):

$$k_{c1} = \frac{t_{d1} + 10\delta}{b_{d1} + 10\delta} = \frac{18,33 \cdot 10^{-3} + 10 \cdot 1,75 \cdot 10^{-3}}{9,3 \cdot 10^{-3} + 10 \cdot 1,75 \cdot 10^{-3}} = 1,337 \quad (3.10)$$

Cartérův činitel pro rotor (vztah pro polozavřené drážky):

$$k_{c2} = \frac{t_{d2}}{t_{d2} - \gamma\delta} = \frac{21,81 \cdot 10^{-3}}{21,81 \cdot 10^{-3} - 0,438 \cdot 1,75 \cdot 10^{-3}} = 1,036 \quad (3.11)$$

kde

$$\gamma = \frac{\left(\frac{b_{02}}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{b_{02}}{\delta}} = \frac{\left(\frac{3 \cdot 10^{-3}}{1,75 \cdot 10^{-3}}\right)^2}{5 + \frac{3 \cdot 10^{-3}}{1,75 \cdot 10^{-3}}} = 0,438 \quad (3.12)$$

Výsledný Cartéřův činitel:

$$k_c = k_{c1} k_{c2} = 1,337 \cdot 1,036 = 1,386 \quad (3.13)$$

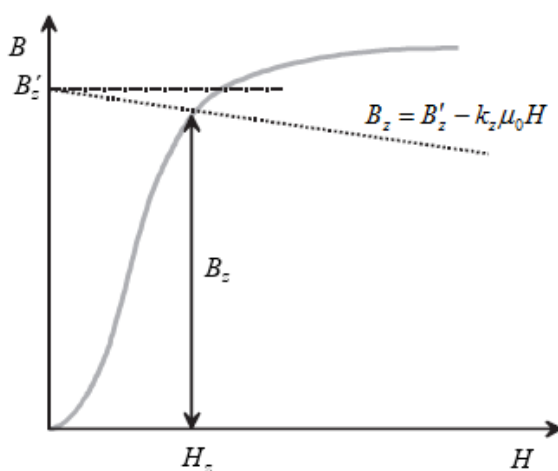
Magnetické napětí vzduchové mezery:

$$U_\delta = \frac{2}{\mu_0} B_\delta \delta k_c = \frac{2}{4\pi \cdot 10^{-7}} \cdot 1,061 \cdot 1,75 \cdot 10^{-3} \cdot 1,386 = 4092 \text{ A} \quad (3.14)$$

3.2 Zuby statoru

Magnetickou indukci v zubu lze vypočítat z magnetického toku, který jím prochází. Protože zub statoru není po celé délce konstantní, je počítána magnetická indukce v nejužším, středním a nejširším místě zubu. Pokud je indukce větší než 1,8 T, dochází k přesycení zubu a část magnetického toku prochází drážkou [1]. Vypočtená hodnota je tedy zdánlivá a pro získání skutečné hodnoty je třeba ji korigovat, jak je znázorněno na obrázku 3.2. Činitel k_z je dán poměrem šířky drážky a šířky zubu:

$$k_z = \frac{b_d}{b_z k_{Fe}} \quad (3.15)$$



Obrázek 3.2. Zmenšení indukce v zubu v důsledku přesycení [2]

Geometrie zubu:

$$b_{z1\min} = t_{d1} - b_{d1} = 18,33 \cdot 10^{-3} - 9,3 \cdot 10^{-3} = 9,03 \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad (3.16)$$

$$b_{z1av} = \frac{\pi(D_1 + h_{d1})}{Q_1} - b_{d1} = \frac{\pi(420 \cdot 10^{-3} + 46,1 \cdot 10^{-3})}{72} - 9,3 \cdot 10^{-3} = 11,04 \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad (3.17)$$

$$b_{z1\max} = \frac{\pi(D_1 + 2h_{d1})}{Q_1} - b_d = \frac{\pi(420 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 46,1 \cdot 10^{-3})}{72} - 9,3 \cdot 10^{-3} = 13,05 \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad (3.18)$$

Pro určení maximální magnetické indukce v zubu (tedy v jeho nejúžší části) $B_{z1\max}$ se nejprve určí zdánlivá magnetická indukce $B'_{z1\max}$. Poté je pomocí činitele k_z korigována:

$$B'_{z1\max} = \frac{B_\delta t_{d1} l_i}{b_{z1\min} l_{Fe} k_{Fe}} = \frac{1,061 \cdot 18,33 \cdot 10^{-3} \cdot 283,5 \cdot 10^{-3}}{9,03 \cdot 10^{-3} \cdot 280 \cdot 10^{-3} \cdot 0,97} = 2,248 \text{ T} \quad (3.19)$$

$$k_z = \frac{b_{d1}}{b_{z1\min} k_{Fe}} = \frac{9,3 \cdot 10^{-3}}{9,03 \cdot 10^{-3} \cdot 0,97} = 1,0622 \quad (3.20)$$

$$B_{z1\max} = 2,155 \text{ T} \quad (3.21)$$

Magnetická intenzita je z magnetizační charakteristiky:

$$H_{z1\max} = 71000 \text{ A/m} \quad (3.22)$$

Stejným postupem se zjistí i magnetická indukce a magnetická intenzita ve střední a nejširší části zubu. V nejširší části zubu však bude magnetická indukce zřejmě menší než 1,8 T a rozdíl mezi zdánlivou a skutečnou magnetickou indukcí bude zanedbatelný. Není třeba ji tedy korigovat.

$$B_{z1av} = 1,815 \text{ T} \quad (3.23)$$

$$H_{z1av} = 21000 \text{ A/m} \quad (3.24)$$

$$B_{z1\min} = 1,556 \text{ T} \quad (3.25)$$

$$H_{z1\min} = 7500 \text{ A/m} \quad (3.26)$$

Pro výpočet střední magnetické intenzity v zubu statoru lze použít Simpsonovo pravidlo:

$$H_{z1} = \frac{1}{6}(H_{z1\max} + 4H_{z1av} + H_{z1\min}) = \frac{1}{6}(71000 + 4 \cdot 21000 + 7500) = 27083 \text{ A/m} \quad (3.27)$$

Magnetické napětí zubů statoru (výška zubu je stejná jako hloubka drážky):

$$U_{z1} = 2h_{z1}H_{z1} = 2h_{d1}H_{z1} = 2 \cdot 46,1 \cdot 10^{-3} \cdot 27083 = 2497 \text{ A} \quad (3.28)$$

3.3 Zuby rotoru

Šířka zubu v nejširším místě drážky:

$$\begin{aligned} b'_z &= \frac{\pi(D_2 - 2h_{02} - 2h_{k2})}{Q_2} - b_{d21} = \\ &= \frac{\pi(416,5 - 2 \cdot 2 - 2 \cdot 2) \cdot 10^{-3}}{60} - 9,6 \cdot 10^{-3} = 11,79 \cdot 10^{-3} \text{ m} \end{aligned} \quad (3.29)$$

Šířka zubu v nejužším místě drážky:

$$\begin{aligned} b''_z &= \frac{\pi(D_2 - 2h_{02} - 2h_{k2} - 2h_{d2})}{60} - b_{d22} = \\ &= \frac{\pi(461,5 - 2 \cdot 2 - 2 \cdot 2 - 2 \cdot 34) \cdot 10^{-3}}{60} - 6 \cdot 10^{-3} = 11,83 \cdot 10^{-3} \text{ m} \end{aligned} \quad (3.30)$$

Jelikož se šířka zubu v obou případech téměř shoduje, je možné počítat se střední šířkou zubu:

$$b_{z2av} = \frac{b'_{z2} + b''_{z2}}{2} = \frac{11,79 \cdot 10^{-3} + 11,83 \cdot 10^{-3}}{2} = 11,81 \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad (3.31)$$

Magnetická indukce v zubech rotoru se počítá stejným způsobem jako v zubech statoru. Pro výpočet činitele k_z je určena střední šířka drážky:

$$b_{d2av} = \frac{b_{d21} + b_{d22}}{2} = \frac{9,6 \cdot 10^{-3} + 6 \cdot 10^{-3}}{2} = 7,8 \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad (3.32)$$

Korigovaná magnetická indukce a odpovídající magnetická intenzita v zubu rotoru:

$$B_{z2} = 2,01 \text{ T} \quad (3.33)$$

$$H_{z2} = 42000 \text{ A/m} \quad (3.34)$$

Magnetické napětí zubů rotoru:

$$U_{z2} = 2h_{z2}H_{z2} = 2h_{d2}H_{z2} = 2 \cdot 38 \cdot 10^{-3} \cdot 42000 = 3192 \text{ A} \quad (3.35)$$

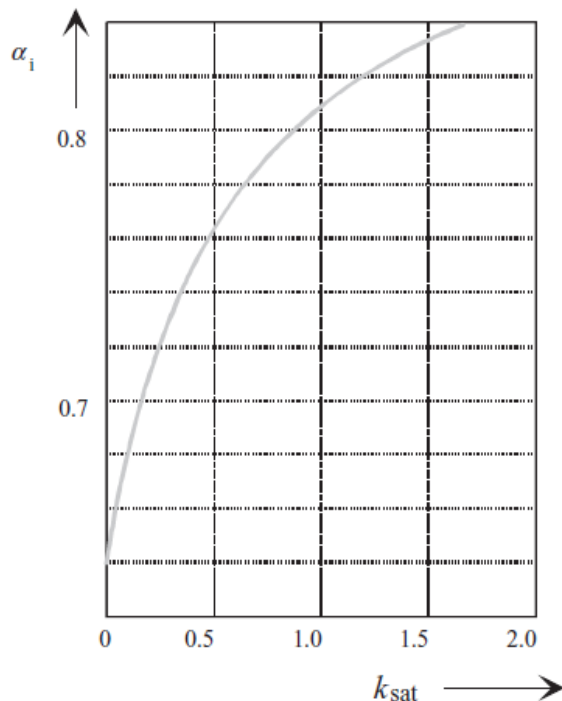
Nyní lze vypočítat číselný nasycení neboli saturační číselný zubů magnetického obvodu:

$$k_{sat} = \frac{U_{z1} + U_{z2}}{U_{\delta}} = \frac{2497 + 3192}{4092} = 1,39 \quad (3.36)$$

Jelikož dochází k přesycení zubů magnetického obvodu, magnetická indukce ve vzduchové mezeře se zplošťuje. Číselný pólového krytí α_i je třeba upravit. K tomu lze využít

závislost na obrázku 3.3. Po několika iteracích činitele pólového krytí zkonverguje k určité hodnotě:

$$\alpha_i = 0,765 \quad (3.37)$$



Obrázek 3.3. Závislost ke korekci činitele pólového krytí [2]

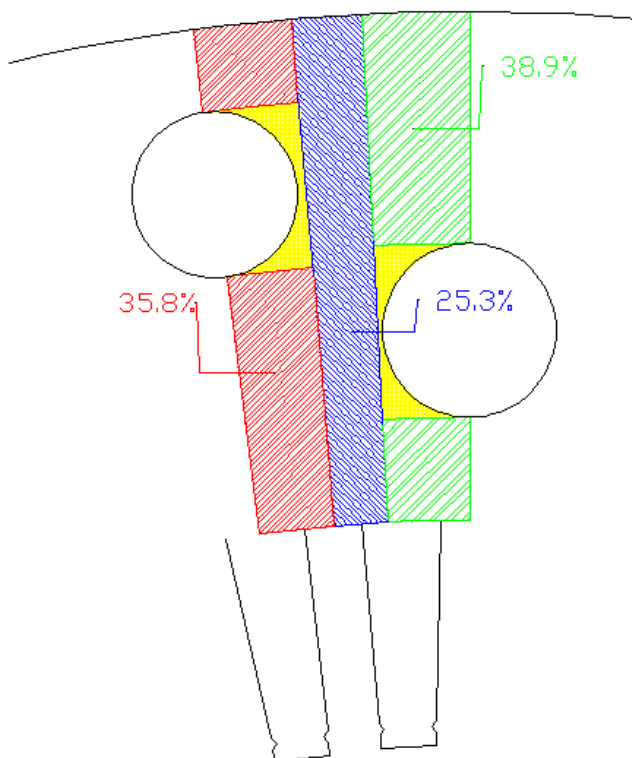
Po dosažení nové hodnoty činitele pólového krytí je třeba přepočítat magnetické indukce, intenzity a úbytky magnetických napětí ve vzduchové mezeře a v zubech magnetického obvodu. Přepočítané hodnoty jsou v tabulce 3.1.

Indukce vzduchové mezery	B_{δ}	0,887 T
Magnetické napětí vzduchové mezery	U_{δ}	3424 A
Indukce zubů statoru	B_{z1max}	1,845 T
	B_{z1av}	1,54 T
	B_{z1min}	1,30 T
Střední intenzita zubů statoru	H_{z1}	8733 A/m
Magnetické napětí zubů statoru	U_{z1}	805 A
Indukce zubů rotoru	B_{z2}	1,71 T
Intenzita zubů rotoru	H_{z2}	13700 A/m
Magnetické napětí zubů rotoru	U_{z2}	1041 A

Tabulka 3.1. Přepočítané hodnoty po upřesnění činitele pólového krytí

3.4 Jho statoru

Pro určení magnetické indukce ve jhu je potřeba určit výpočtovou výšku jha. Na Obrázku 3.4. je znázorněna cesta magnetického toku procházející jhem statoru, která se po obvodu stroje periodicky opakuje. Oblast znázorněná červeně je cesta s horním ventilačním kanálem, zeleně cesta se spodním ventilačním kanálem a modře cesta bez ventilačních kanálů, tedy celá výška statorového jha. Pro zjednodušení je geometrie ventilačního kanálu v dané oblasti brána konstantní a části znázorněny žlutě jsou tedy zanedbávány. Na obrázku 3.5. jsou zobrazeny indukční čáry magnetického toku pomocí programu FEMM. Je vidět, že v oblasti mezi kanály (modrá) dochází k přechodu indukčních čar, což je pro zjednodušení při výpočtu také zanedbáno.



Obrázek 3.4. Rozdělení statorového jha

Geometrická výška statorového jha:

$$h_{j1} = \frac{D_e - D_1 - 2h_{d1}}{2} = \frac{710 \cdot 10^{-3} - 420 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 46,1 \cdot 10^{-3}}{2} = 98,9 \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad (3.38)$$

Výška jha bez ventilačního kanálu:

$$h_{j\text{bez}k} = h_{j1} - d_k = 98,9 \cdot 10^{-3} - 29 \cdot 10^{-3} = 68,9 \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad (3.39)$$

Střední (výpočtová) výška statorového jha podle obrázku 3.4.:

$$\begin{aligned} h'_{j1} &= 0,358h_{jbez k} + 0,253h_j + 0,389h_{jbez k} = \\ &= 0,358 \cdot 68,9 \cdot 10^{-3} + 0,253 \cdot 98,9 \cdot 10^{-3} + 0,389 \cdot 68,9 \cdot 10^{-3} = 76,5 \cdot 10^{-3} \text{ m} \end{aligned} \quad (3.40)$$

Magnetická indukce statorového jha:

$$B_{j1} = \frac{\Phi}{2h'_{j1}l_{Fe1}k_{Fe}} = \frac{0,0635}{2 \cdot 0,0765 \cdot 0,28 \cdot 0,97} = 1,528 \text{ T} \quad (3.41)$$

Magnetická intenzita jha statoru (z magnetizační charakteristiky):

$$H_{j1} = 7000 \text{ A/m} \quad (3.42)$$

Pro výpočet magnetického napětí je třeba ještě určit délku střední magnetické indukční čáry ve jhu statoru. Je určena jako průměr nejdelší a nejkratší zvolené indukční čáry za pomoci Obrázku 3.5., na němž jsou zobrazeny indukční čáry při přechodu mezi jednou pólovou dvojicí. Jelikož ve střední části statorového jha dochází kvůli ventilačním kanálům k prodloužení indukčních čar, je brán v potaz předpoklad, že tato část indukční čáry je prodloužena přibližně o 20 %. Názorně je tento přístup předveden na obrázku 3.6., avšak siločáry jsou idealizované.

Délka nejdelší siločáry:

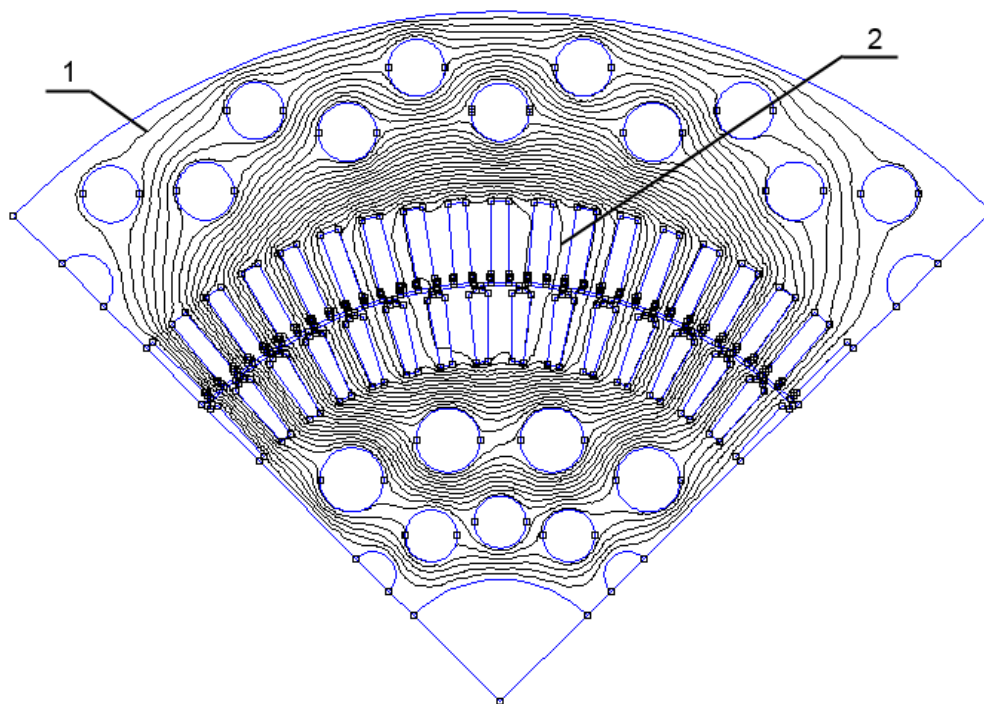
$$l_{j1\max} = 2h_{j1} + 1,2 \left(\frac{\pi D_e}{4} - d_k \right) = 2 \cdot 0,0989 + 1,2 \left(\frac{\pi 0,71}{4} - 0,03 \right) = 0,831 \text{ m} \quad (3.43)$$

Délka nejkratší siločáry:

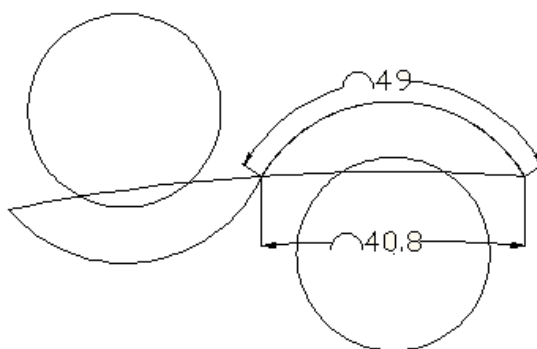
$$l_{j1\min} = 1,2(4b_{d1} + 4b_{z\max}) = 1,2(4 \cdot 0,0093 + 4 \cdot 0,01305) = 0,107 \text{ m} \quad (3.44)$$

Délka střední siločáry:

$$l_{j1} = \frac{l_{j1\max} + l_{j1\min}}{2} = \frac{0,831 + 0,107}{2} = 0,469 \text{ m} \quad (3.45)$$



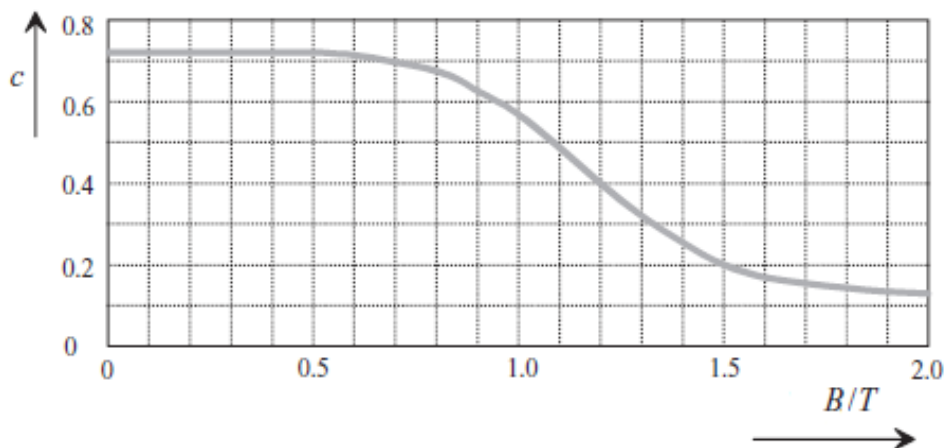
Obrázek 3.5. Siločáry v jedné pólové rozteči s vyznačenou nejdelší a nejkratší zvolenou siločárou



Obrázek 3.6. Znázornění prodloužení siločar

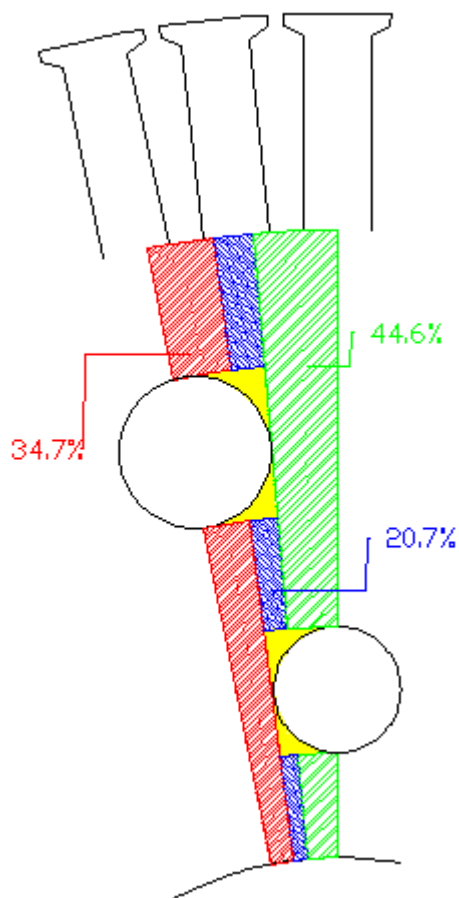
Magnetická intenzita ve jhu je silně nelineární. Při výpočtu magnetického napětí tuto nelinearitu respektuje koeficient c , který je závislý na nasycení jha (Obrázek 3.7.). Potom magnetické napětí jha statoru:

$$U_{j1} = c l_{j1} H_{j1} = 0,17 \cdot 0,469 \cdot 7000 = 558 \text{ A} \quad (3.46)$$

Obrázek 3.7. Koeficient c v závislosti na nasycení [2]

3.5 Jho rotoru

Délka střední siločáry jha rotoru je určena stejným způsobem jako u jha statoru s tím rozdílem, jaký je patrný z obrázku 3.8. Opakující se část rotorového jha je opět rozdělena na 3 části, prostřední část není bez ventilačních kanálů, ale naopak s oběma ventilačními kanály.



Obrázek 3.8. Rozdělení rotorového jha

Geometrická výška rotorového jha:

$$h_{j2} = \frac{D_2 - 2h_{d2} - D_h}{2} = \frac{416,5 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 38 \cdot 10^{-3} - 110 \cdot 10^{-3}}{2} = 115,25 \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad (3.47)$$

Výpočtová výška rotorového jha:

$$\begin{aligned} h'_{j2} &= 0,347(h_{j2} - d_{kh}) + 0,207(h_{j2} - d_{kh} - d_{kd}) + 0,446(h_{j2} - d_{kd}) = \\ &= 0,347(115,25 \cdot 10^{-3} - 29 \cdot 10^{-3}) + 0,207(115,25 \cdot 10^{-3} - 29 \cdot 10^{-3} - 23 \cdot 10^{-3}) + \\ &+ 0,446(115,25 \cdot 10^{-3} - 23 \cdot 10^{-3}) = 84,2 \text{ mm} \end{aligned} \quad (3.48)$$

Magnetická indukce:

$$B_{j2} = \frac{\Phi}{2h'_{j2} l_{Fe} k_{Fe}} = \frac{0,0635}{2 \cdot 0,0842 \cdot 0,28 \cdot 0,97} = 1,388 \text{ T} \quad (3.49)$$

Magnetická intenzita (z magnetizační charakteristiky):

$$H_{j2} = 4500 \text{ A/m} \quad (3.50)$$

Délka nejdelší siločáry:

$$l_{j2\max} = \frac{\pi D_h}{2p} + 2h_{j2} = \frac{\pi 0,110}{4} + 2 \cdot 0,11525 = 0,317 \text{ m} \quad (3.51)$$

Délka nejkratší siločáry:

$$l_{j2\min} = 3b_{d22} + 3b_{z2} = 3 \cdot 0,006 + 3 \cdot 0,01181 = 0,053 \text{ m} \quad (3.52)$$

Délka střední siločáry:

$$l_{j2} = \frac{l_{j2\max} + l_{j2\min}}{2} = \frac{0,317 + 0,053}{2} = 0,185 \text{ m} \quad (3.53)$$

Magnetické napětí jha rotoru:

$$U_{j2} = cl_{j2}H_{j2} = 0,4 \cdot 0,185 \cdot 4500 = 333 \text{ A} \quad (3.54)$$

kde c je činitel určený z obrázku 3.7.

3.6 Magnetizační proud

Výsledné magnetické napětí celého magnetického obvodu:

$$F_m = U_\delta + U_{z1} + U_{z2} + U_{j1} + U_{j2} = 3424 + 805 + 1041 + 558 + 337 = 6035 \text{ A} \quad (3.55)$$

Magnetizační proud potřebný k magnetizaci magnetického obvodu:

$$I_\mu = \frac{pF_m}{0,9m_1N_1k_{v1}} = \frac{2 \cdot 6035}{0,9 \cdot 3 \cdot 42 \cdot 0,924} = 115,2 \text{ A} \quad (3.56)$$

4 Odpory a reaktance

V této fázi je třeba vypočítat parametry náhradního schématu, kterými jsou odpor $R_{1(2)}$ a rozptylová reaktance $X_{1(2)}$ statorového (rotorového) vinutí, reaktance vzájemné indukčnosti statorového a rotorového vinutí X_{μ} a fiktivní odpor železa R_{Fe} .

4.1 Odpor statorového vinutí

Odpor závisí obecně na rezistivitě, délce a průřezu materiálu. Materiálem pro vodiče je měď, jejíž rezistivitu je možné zjistit v tabulkách. Průřez vodiče je v zadání. Je tedy třeba zjistit délku a průřez vodiče jedné fáze a jedné paralelní větve statorového vinutí. Jedna cívka je složena z drážkové části, jejíž délka je zadána a z čela vinutí, jehož délku je třeba vypočítat. V tabulce 4.1. a 4.2. jsou doplňující informace k izolaci a uspořádání cívek. Uspořádání cívek včetně izolace v drážce je znázorněno v příloze B.

Izolace	Označení	Hodnota [mm]
Vložka na dno	tl_{dno}	0,25
Vyložení drážky	tl_v	0,2
Izolace cívky (oboustranně)	tl_{ic}	0,96
Izolace vodiče (oboustranně)	tl_{iv}	0,23
Mezivložka	tl_{im}	0,51
Vložka pod klín	tl_{ipk}	0,25

Tabulka 4.1. Tloušťka a označení izolace

Naklonění oka	α_{oka}	15°
Vnitřní poloměr oka	R_{in}	8 mm
Výběh z drážky	l_{vd}	10 mm
Vnitřní poloměr kolínka	R_k	17 mm
Mezera mezi cívkami	mmc	1,5 mm

Tabulka 4.2. Parametry cívek

4.1.1 Výpočet délky čela vinutí

Výška cívky bez izolace:

$$h_c = N_{cívky} (tl_{iv} + h_v) = 7(0,23 + 2,5) = 19,11 \text{ mm} \quad (4.1)$$

Výška cívky s izolací:

$$h_{ci} = h_c + tl_{ic} = 19,25 + 0,96 = 20,07 \text{ mm} \quad (4.2)$$

Šířka cívky bez izolace:

$$b_c = tl_{iv} + b_v = 0,23 + 7,5 = 7,73 \text{ mm} \quad (4.3)$$

Šířka cívky s izolací:

$$b_{ci} = b_c + tl_{ic} = 7,73 + 0,96 = 8,69 \text{ mm} \quad (4.4)$$

Poloměr uložení horní a dolní cívkové strany:

$$\begin{aligned} R_H &= \frac{D_1}{2} + h_0 + h_k + tl_{ipk} + 2tl_v + \frac{tl_{ic}}{2} + \frac{7(h_v + tl_{iv})}{2} = \\ &= \frac{420}{2} + 2 + 2 + 0,25 + 2 \cdot 0,2 + \frac{0,96}{2} + \frac{7(2,5 + 0,23)}{2} = 224,69 \text{ mm} \end{aligned} \quad (4.5)$$

$$\begin{aligned} R_D &= \frac{D_1}{2} + h_0 + h_k + h_{d1} - tl_{dno} - tl_v - \frac{tl_{ic}}{2} - \frac{7(h_v + tl_{iv})}{2} = \\ &= \frac{420}{2} + 2 + 2 + 42,1 - 0,25 - 0,2 - \frac{0,96}{2} - \frac{7(2,5 + 0,23)}{2} = 245,62 \text{ mm} \end{aligned} \quad (4.6)$$

Drážková rozteč na daných poloměrech:

$$t_{R_H} = 2\pi \frac{R_H}{Q_1} = 2\pi \frac{224,69}{72} = 19,61 \text{ mm} \quad (4.7)$$

$$t_{R_D} = 2\pi \frac{R_D}{Q_1} = 2\pi \frac{245,62}{72} = 21,43 \text{ mm} \quad (4.8)$$

Drážková rozteč přední a zadní cívkové strany:

$$t_{R_{Hd}} = t_{R_H} \cdot y_{1d} = 19,61 \cdot 15 = 294,15 \text{ mm} \quad (4.9)$$

$$t_{R_{Dd}} = t_{R_D} \cdot y_{1d} = 21,43 \cdot 15 = 321,45 \text{ mm} \quad (4.10)$$

Vnější průměr oka cívky:

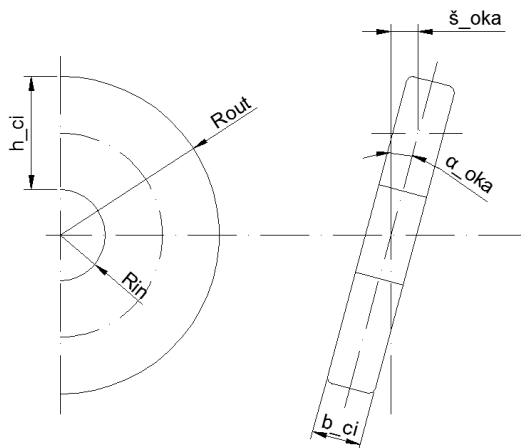
$$R_{out} = R_{in} + h_{ci} = 8 + 20,07 = 28,07 \text{ mm} \quad (4.11)$$

Šířka oka:

$$\check{s}_{oka} = \sin(\alpha_{oka}) \left(R_{in} + \frac{h_{ci}}{2} \right) = \sin(15^\circ) \cdot \left(8 + \frac{20,07}{2} \right) = 4,67 \text{ mm} \quad (4.12)$$

Střední délka oka cívky:

$$l_{avoka} = \pi \left(R_{in} + \frac{h_{ci}}{2} \right) = \pi \left(8 + \frac{20,07}{2} \right) = 56,66 \text{ mm} \quad (4.13)$$



Obrázek 4.1. Oko cívky

Střední poloměr kolínka cívky:

$$R_{avk} = R_k + \frac{b_{ci}}{2} = 17 + \frac{8,69}{2} = 21,35 \text{ mm} \quad (4.14)$$

Vyložení kolínka:

$$v_k = \sin \left(\frac{\pi}{2} - \alpha_{\check{c}el} \right) R_{avk} = \sin(90^\circ - 31,31^\circ) 21,35 = 18,24 \text{ mm} \quad (4.15)$$

Šířka kolínka:

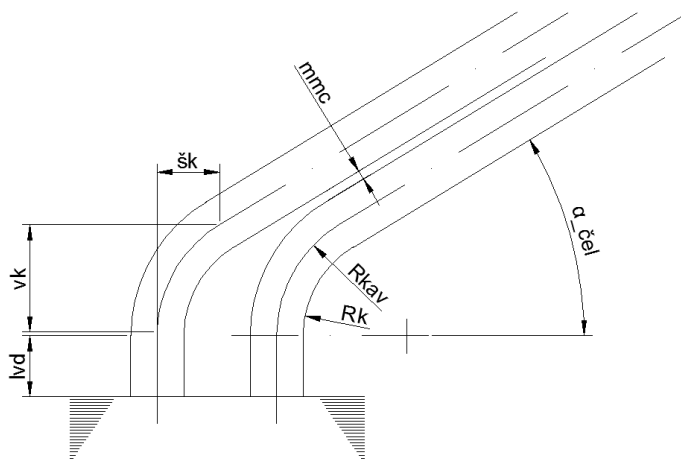
$$\check{s}_k = R_{avk} - \cos \left(\frac{\pi}{2} - \alpha_{\check{c}el} \right) R_{avk} = 21,35 - \cos(90^\circ - 31,31^\circ) 21,35 = 10,26 \text{ mm} \quad (4.16)$$

Střední délka kolínka:

$$l_{avk} = R_{avk} \left(\frac{\pi}{2} - \alpha_{\check{c}el} \right) = 21,35 \left(\frac{\pi}{2} - 31,31^\circ \cdot \frac{\pi}{180} \right) = 21,87 \text{ mm} \quad (4.17)$$

Sklon čel statorového vinutí:

$$\alpha_{\check{c}el} = \arcsin \left(\frac{b_{ci} + mmc}{t_{RH}} \right) = \arcsin \left(\frac{8,69 + 1,5}{19,61} \right) = 31,31^\circ \quad (4.18)$$



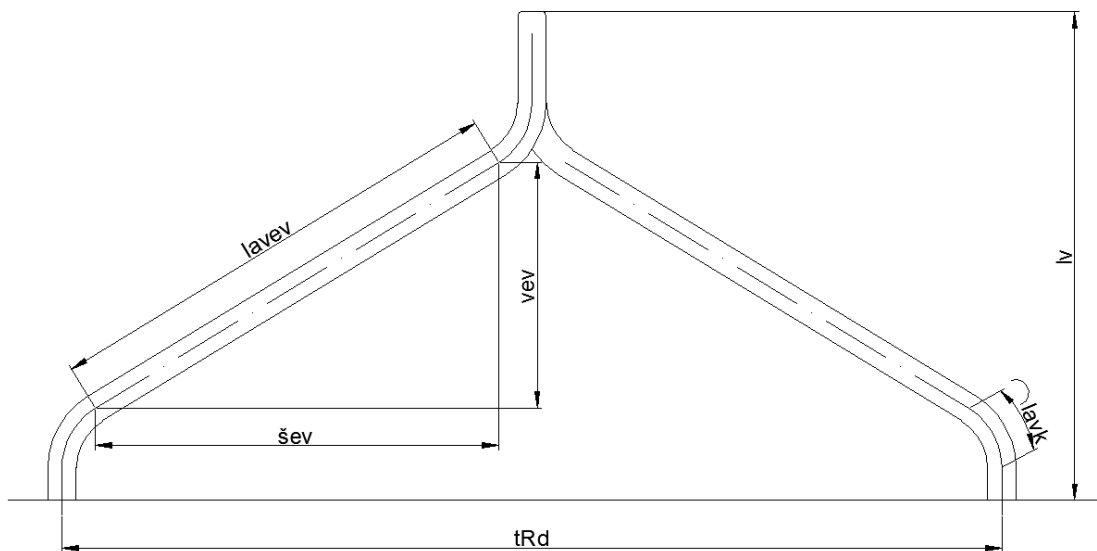
Obrázek 4.2. Kolínka cívek

Šířka evolventy:

$$\check{s}_{ev} = \frac{t_{R_H} d}{2} - 2\check{s}_k - \check{s}_{oka} = \frac{294,15}{2} - 2 \cdot 10,26 - 4,67 = 121,89 \text{ mm} \quad (4.19)$$

Délka vyložení evolventy:

$$v_{ev} = \check{s}_{ev} \tan(\alpha_{\check{c}el}) = 121,89 \cdot \tan(31,31^\circ) = 74,14 \text{ mm} \quad (4.20)$$



Obrázek 4.3. Celkové uspořádání čela cívky statorového vinutí

Střední délka evolventy:

$$l_{avev_H} = \sqrt{\check{s}_{ev}^2 + v_{ev}^2} = \sqrt{121,89^2 + 74,14^2} = 142,67 \text{ mm} \quad (4.21)$$

$$l_{avev_D} = l_{avev_H} \frac{R_D}{R_H} = 142,67 \frac{245,69}{224,62} = 156,05 \text{ mm} \quad (4.22)$$

Střední délka čela cívky:

$$\begin{aligned} l_{avč} &= 2(l_{vd} + 2l_{avk}) + l_{avev_H} + l_{avev_D} + l_{avoka} = \\ &= 2(10 + 2 \cdot 21,87) + 142,67 + 156,05 + 56,66 = 462,86 \text{ mm} \end{aligned} \quad (4.23)$$

Délka vyložení čela cívky:

$$l_v = l_{vd} + 2v_k + v_{ev} + R_{out} = 10 + 2 \cdot 18,24 + 74,14 + 28,07 = 148,69 \text{ mm} \quad (4.24)$$

4.1.2 Geometrie celé cívky a její odpor

Střední délka závitu cívky:

$$l_{avz} = 2(l_{avč} + l_{Fe}) = 2 \cdot (462,86 + 280) = 1485,72 \text{ mm} \quad (4.25)$$

Celková délka vodiče jedné fáze a jedné paralelní větve statorového vinutí:

$$L = l_{avz} N = 1485,72 \cdot 42 = 62400 \text{ mm} = 62,4 \text{ m} \quad (4.26)$$

Odpor jedné fáze statorového vinutí:

$$R_1 = \rho_{Cu} \frac{L}{S_{v,a}} = \frac{1}{57} \cdot 10^{-6} \frac{62,4}{18,2 \cdot 10^{-6} \cdot 4} = 0,015 \Omega \quad (4.27)$$

kde průřez vodiče $S_v = 18,2 \text{ mm}^2$ dle Dodatek 3 – Tabulka D 3.1. [1].

4.2 Rozptylová reaktance statorového vinutí

Rozptylová reaktance statorového vinutí je dána rozptylovým tokem uzavírajícím se přes drážky magnetického obvodu, přes čela statorového vinutí a rozptylovým tokem diferenčním. Proto je potřeba zjistit magnetické vodivosti těchto jednotlivých částí.

Činitel magnetické vodivosti drážky (s využitím vztahu z Tabulky 6.22. [1]):

$$\begin{aligned} \lambda_{d1} &= \frac{2h_{ci}}{3b_{d1}} k_{\beta} + \frac{h_{01} + h_{k1} + tl_{ipk} + tl_v}{b_d} k'_{\beta} + \frac{tl_{im}}{4b_d} = \\ &= \frac{2 \cdot 20,07 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 9,3 \cdot 10^{-3}} \cdot 0,906 + \frac{(2 + 2 + 0,25 + 0,2) \cdot 10^{-3}}{9,3 \cdot 10^{-3}} \cdot 0,875 + \frac{0,51 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot 9,3 \cdot 10^{-3}} = 1,736 \end{aligned} \quad (4.28)$$

kde činitele k_β a k'_β závislé na kroku vinutí jsou:

$$k'_\beta = 0,25(1 + 3\beta) = 0,25(1 + 3 \cdot 0,833) = 0,875 \quad (4.29)$$

$$k_\beta = 0,25(1 + 3k'_\beta) = 0,25(1 + 3 \cdot 0,875) = 0,906 \quad (4.30)$$

a zkrácení kroku vinutí je:

$$\beta = \frac{y_{1d}}{t_{pd}} = \frac{y_{1d}}{\frac{Q_1}{2p}} = \frac{15}{\frac{72}{4}} = 0,833 \quad (4.31)$$

Činitel magnetické vodivosti rozptylu čel:

$$\lambda_{\epsilon 1} = 0,34 \frac{q}{l_i} (l_{avc} - 0,64\beta t_p) = 0,34 \cdot \frac{6}{0,2835} (0,46286 - 0,64 \cdot 0,833 \cdot 0,33) = 2,065 \quad (4.32)$$

Činitel magnetické vodivosti diferenčního rozptylu:

$$\lambda_{dif1} = \frac{t_{d1}}{12\delta k_c} \xi = \frac{18,33 \cdot 10^{-3}}{12 \cdot 1,75 \cdot 10^{-3} \cdot 1,386} \cdot 0,855 = 0,538 \quad (4.33)$$

$$\begin{aligned} \xi &= \left(2 \frac{t_{d2}}{t_{d1}} - \frac{t_{d1}}{t_{d2}} \Delta z \right) k_\beta - k_{v1} \left(\frac{t_{d2}}{t_{d1}} \right)^2 = \\ &= \left(2 \cdot \frac{21,81 \cdot 10^{-3}}{18,33 \cdot 10^{-3}} - \frac{18,33 \cdot 10^{-3}}{21,81 \cdot 10^{-3}} \cdot 0,15 \right) \cdot 0,906 - 0,924 \cdot \left(\frac{21,81 \cdot 10^{-3}}{18,33 \cdot 10^{-3}} \right)^2 = 0,855 \end{aligned} \quad (4.34)$$

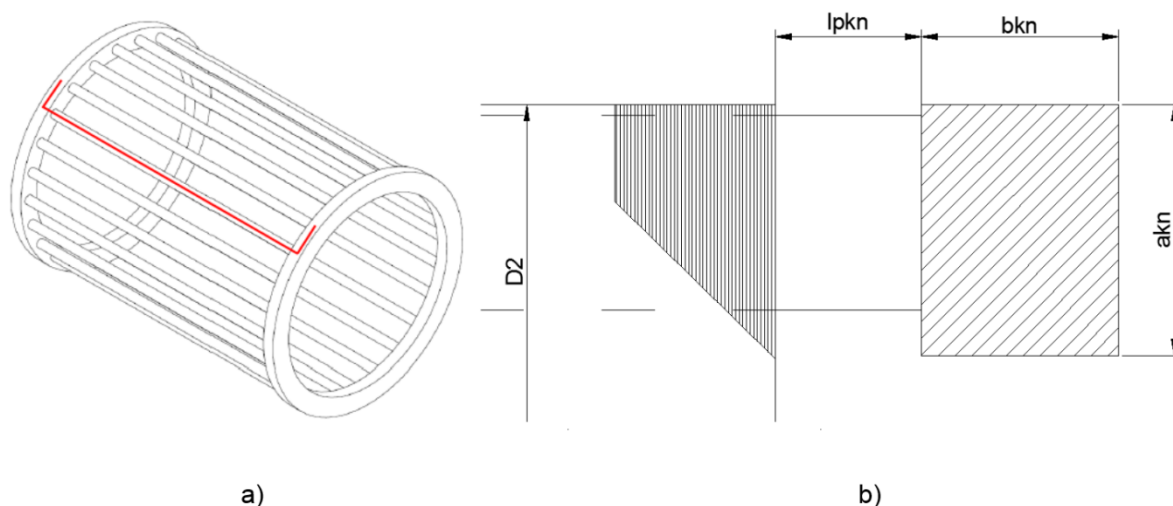
kde činitel $\Delta z = 0,15$ z Obr. 6.39a) [1].

Rozptylová reaktance statorového vinutí (pro frekvenci bodu zlomu):

$$\begin{aligned} X_{1\sigma} &= 15,8 \frac{f_z}{100} \left(\frac{N_1}{100} \right)^2 \frac{l_i}{pq} (\lambda_{d1} + \lambda_{\epsilon 1} + \lambda_{dif1}) = \\ &= 15,8 \cdot \frac{57}{100} \cdot \left(\frac{42}{100} \right)^2 \cdot \frac{0,2835}{2 \cdot 6} (1,736 + 2,06 + 0,538) = 0,1627 \, \Omega \end{aligned} \quad (4.35)$$

4.3 Odpor rotorové klece

Jedna fáze rotorové klece se skládá z jedné tyče a z části kruhu, která spojuje dvě sousední tyče (Obrázek 4.4.a)). Měděné tyče umístěné v drážkách rotoru přesahují paket o $l_{pkn} = 27 \text{ mm}$ (Obrázek 4.4.b)).



Obrázek 4.4. a) Rotorová klec se znázorněním jedné fáze [4], b) připojení kruhu k tyči

Průřez tyče (vůle mezi tyčí a drážkou je $v = 0,1 \text{ mm}$):

$$\begin{aligned}
 S_t &= \frac{(b_{d21} - 2v) \cdot 10^{-3} + (b_{d22} - 2v) \cdot 10^{-3}}{2} \cdot (h_{21} - v) \cdot 10^{-3} + \\
 &+ \frac{(b_{d21} - 2v) \cdot 10^{-3} + (b_{02} - 2v) \cdot 10^{-3}}{2} \cdot (h_{k2} - v) \cdot 10^{-3} = \\
 &= \frac{(9,6 - 0,2) \cdot 10^{-3} + (6 - 0,2) \cdot 10^{-3}}{2} \cdot (34 - 0,1) \cdot 10^{-3} + \\
 &+ \frac{(9,6 - 0,2) \cdot 10^{-3} + (3 - 0,2) \cdot 10^{-3}}{2} \cdot (2 - 0,1) \cdot 10^{-3} = 269 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2
 \end{aligned} \tag{4.36}$$

Odpor tyče:

$$R_t = \rho_t \frac{l_t}{S_t} k_{\sim} = \frac{1}{57} \cdot 10^{-6} \cdot \frac{0,334}{269 \cdot 10^{-6}} = 21,78 \cdot 10^{-6} \Omega \tag{4.37}$$

Průřez kruhu nakrátko:

$$S_{kn} = a_{kn} b_{kn} = 0,0365 \cdot 0,0465 = 1697 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \tag{4.38}$$

Střední průměr kruhu nakrátko:

$$D_{kn} = D_2 - b_{kn} = 0,4165 - 0,0465 = 0,37 \text{ m} \tag{4.39}$$

Odpor části kruhu nakrátko:

$$R_{kn} = \rho_{kn} \frac{\pi D_{kn}}{Q_2 S_{kn}} = \frac{1}{57} \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\pi \cdot 0,37}{60 \cdot 1697 \cdot 10^{-6}} = 0,2 \cdot 10^{-6} \Omega \quad (4.40)$$

Odpor fáze rotoru:

$$R_2 = R_t + 2 \cdot \frac{R_{kn}}{\Delta^2} = 21,78 \cdot 10^{-6} + 2 \cdot \frac{0,2 \cdot 10^{-6}}{(0,209)^2} = 30,94 \cdot 10^{-6} \Omega \quad (4.41)$$

kde

$$\Delta = 2 \sin \frac{\pi p}{Q_2} = 2 \sin \frac{\pi 2}{60} = 0,209 \quad (4.42)$$

Přepočtený odpor rotoru:

$$R'_2 = R_2 4m_1 \frac{(N_1 k_{v1})^2}{Q_2} = 30,94 \cdot 10^{-6} \cdot 4 \cdot 3 \cdot \frac{(42 \cdot 0,924)^2}{60} = 0,00932 \Omega \quad (4.43)$$

4.4 Rozptylová reaktance rotorové klece

Rozptylová reaktance rotoru se určí podobně jako reaktance statoru. Činitelé magnetických vodivostí jsou zjištěny na základě empirických vztahů z [2].

Činitel magnetické vodivosti drážky:

$$\lambda_{d2} = \frac{h_{d2}}{3b_{d21}} + \frac{h_{k2}}{3b_{d21}} + \frac{h_{02}}{b_{02}} = \frac{34 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 9,6 \cdot 10^{-3}} + \frac{2 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 9,6 \cdot 10^{-3}} + \frac{2 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 10^{-3}} = 1,917 \quad (4.44)$$

Činitel magnetické vodivosti čel:

$$\lambda_{\varepsilon 2} = \frac{2,3D_{kn}}{Q_2 l_i \Delta^2} \log \frac{4,7D_{kn}}{2(a_{kn} + b_{kn})} = \frac{2,3 \cdot 0,37}{60 \cdot 0,2835 \cdot 0,209^2} \cdot \log \frac{4,7 \cdot 0,37}{2(0,0365 + 0,0465)} = 1,168 \quad (4.45)$$

Činitel magnetické vodivosti diferenčního rozptylu (když $\zeta \approx l$):

$$\lambda_{dif2} = \frac{t_{d2}}{12\delta k_c} \xi = \frac{21,81 \cdot 10^{-3}}{12 \cdot 1,75 \cdot 10^{-3} \cdot 1,385} \cdot 1 = 0,75 \quad (4.46)$$

Rozptylová reaktance klecového vinutí rotoru (pro frekvenci bodu zlomu):

$$\begin{aligned} X_{2\sigma} &= 7,9 f_1 l_i (\lambda_{d2} + \lambda_{\varepsilon 2} + \lambda_{dif2}) 10^{-6} = \\ &= 7,9 \cdot 57 \cdot 0,2835 (1,917 + 1,168 + 0,75) 10^{-6} = 0,49 \cdot 10^{-3} \Omega \end{aligned} \quad (4.47)$$

Rozptylová reaktance jedné fáze rotorového klecového vinutí přepočtená na stator pro frekvenci bodu zlomu:

$$X'_{2\sigma} = X_{2\sigma} 4m_1 \frac{(N_1 k_{v1})^2}{Q_2} = 0,49 \cdot 10^{-3} \cdot 4 \cdot 3 \cdot \frac{(42 \cdot 0,924)^2}{60} = 0,1475 \Omega \quad (4.48)$$

4.5 Fiktivní odpor železa

Zavedením tohoto odporu jsou v náhradním schématu uvažovány ztráty v železe, které vyvolává činná složka proudu naprázdno. Proto je potřebné si tyto ztráty a proud vypočítat.

4.5.1 Ztráty v železe

Hlavní ztráty v železe:

Hmotnost jha statoru:

$$\begin{aligned} m_{j1} &= \left(\frac{\pi D_e^2}{4} - \frac{\pi (D_1 + 2h_{z1})^2}{4} - 48 \frac{\pi d_{k1}}{4} \right) l_{Fe1} k_{Fe1} \rho_{Fe} = \\ &= \left(\frac{\pi 0,71^2}{4} - \frac{\pi (0,42 + 2 \cdot 0,0461)^2}{4} - 48 \cdot \frac{\pi 0,03^2}{4} \right) \cdot 0,28 \cdot 0,97 \cdot 7650 = 324 \text{ kg} \end{aligned} \quad (4.49)$$

Hmotnost zubů statoru:

$$m_{z1} = h_{z1} b_{z1av} l_{Fe1} Q_1 \rho_{Fe} = 0,0461 \cdot 0,01104 \cdot 0,28 \cdot 72 \cdot 7650 = 78,5 \text{ kg} \quad (4.50)$$

Hlavní ztráty v železe (pro frekvenci zlomu):

$$\begin{aligned} \Delta P_{Feh} &= \Delta p_{1,0} \left(\frac{f}{50} \right)^{1,5} (k_{dj} B_{j1}^2 m_{j1} + k_{dz} B_{z1av}^2 m_{z1}) = \\ &= 1,3 \cdot \left(\frac{57}{50} \right)^{1,5} (1,8 \cdot 1,528^2 \cdot 324 + 2,0 \cdot 1,538^2 \cdot 78,5) = 2742 \text{ W} \end{aligned} \quad (4.51)$$

kde k_{dj} a k_{dz} jsou činitele uvažující vliv nerovnoměrností rozložení toku v částech magnetického obvodu a vliv technologie výroby statorového svazku [4].

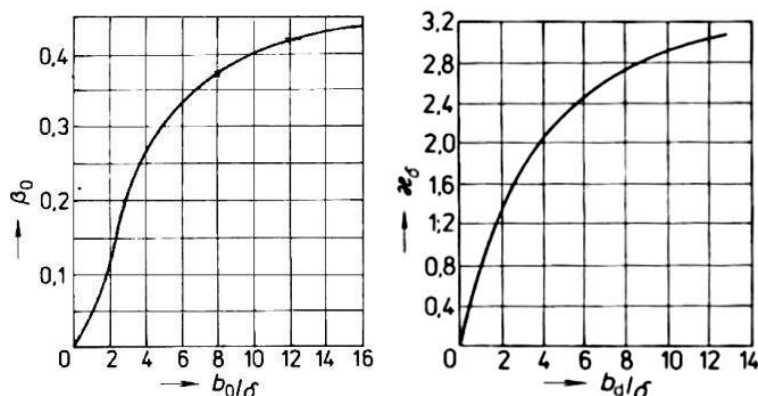
Povrchové ztráty:

Amplituda pulsací indukce ve vzduchové mezeře nad hlavami zubů statoru a rotoru:

$$B_{01} = \beta_{01} k_c B_\delta = 0,14 \cdot 1,386 \cdot 0,887 = 0,172 \text{ T} \quad (4.52)$$

$$B_{02} = \beta_{02} k_c B_\delta = 0,34 \cdot 1,386 \cdot 0,887 = 0,418 \text{ T} \quad (4.53)$$

kde koeficient β v obou rovnicích je závislý na poměru otevření drážek ke vzduchové mezeře a je určen z Obrázku 4.5.



Obrázek 4.5. K výpočtu povrchových a pulzačních ztrát [1]

Hustota povrchových ztrát:

$$\begin{aligned}
 p_{\delta p1} &= 0,5k_{01} \left(\frac{Q_2 n}{10000} \right)^{1,5} (B_{01} t_{d2} 10^3)^2 = \\
 &= 0,5 \cdot 2 \left(\frac{60 \cdot 1710}{10000} \right)^{1,5} (0,172 \cdot 0,02181 \cdot 10^3)^2 = 462,5 \text{ W / m}^2
 \end{aligned} \tag{4.54}$$

$$\begin{aligned}
 p_{\delta p2} &= 0,5k_{02} \left(\frac{Q_1 n}{10000} \right)^{1,5} (B_{02} t_{d1} 10^3)^2 = \\
 &= 0,5 \cdot 2 \cdot \left(\frac{72 \cdot 1710}{10000} \right)^{1,5} (0,418 \cdot 0,01833 \cdot 10^3)^2 = 2536,1 \text{ W / m}^2
 \end{aligned} \tag{4.55}$$

kde koeficient $k_0 = 2$ v obou rovnicích respektuje vliv opracování povrchu hlav zubů. Otáčky jsou dosazovány synchronní pro 57 Hz.

Povrchové ztráty:

$$\Delta P_{\delta p1} = p_{\delta p1} (t_{d1} - b_{01}) Q_1 l_{Fe} = 462,5 (0,01833 - 0,0093) \cdot 72 \cdot 0,28 = 84 \text{ W} \tag{4.56}$$

$$\Delta P_{\delta p2} = p_{\delta p2} (t_{d2} - b_{02}) Q_2 l_{Fe} = 2536,1 (0,02181 - 0,003) \cdot 60 \cdot 0,28 = 801 \text{ W} \tag{4.57}$$

Pulzační ztráty:

Amplituda pulsační indukce ve středním průřezu zubu statoru:

$$B_{p1} = \frac{\gamma_2 \delta}{2t_{d1}} B_{z1av} = \frac{0,438 \cdot 1,75 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 18,33 \cdot 10^{-3}} \cdot 1,54 = 0,032 \text{ T} \tag{4.58}$$

$$B_{p2} = \frac{\gamma_1 \delta}{2t_{d2}} B_{z2} = \frac{0,466 \cdot 1,75 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 21,33 \cdot 10^{-3}} \cdot 1,71 = 0,033 \text{ T} \tag{4.59}$$

kde

$$\gamma_1 = \frac{\left(\frac{b'_{01}}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{b'_{01}}{\delta}} = \frac{\left(\frac{3,11}{1,75}\right)^2}{5 + \frac{3,11}{1,75}} = 0,466 \quad (4.60)$$

$$\gamma_2 = \frac{\left(\frac{b_{02}}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{b_{02}}{\delta}} = \frac{\left(\frac{3}{1,75}\right)^2}{5 + \frac{3}{1,75}} = 0,438 \quad (4.61)$$

a b'_{01} je náhradní otevření statorové drážky, počítané v případě otevřených drážek. Ve vztahu je činitel κ_δ určen z Obrázku 4.5.

$$b'_{01} = \frac{b_{01}}{3} \left(1 + \frac{0,5t_{d1}}{t_{d1}b_{01} + \kappa_\delta}\right) = \frac{9,3 \cdot 10^{-3}}{3} \left(1 + \frac{0,5 \cdot 18,33 \cdot 10^{-3}}{18,33 \cdot 10^{-3} \cdot 9,3 \cdot 10^{-3} + 2,3}\right) = 3,11 \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad (4.62)$$

Pulzační ztráty v zubech statoru a rotoru:

$$\Delta P_{p1} = 0,11 \left(\frac{Q_2 n}{1000} B_{p1}\right)^2 m_{z1} = 0,11 \cdot \left(\frac{60 \cdot 1710}{1000} \cdot 0,032\right)^2 \cdot 78,5 = 93 \text{ W} \quad (4.63)$$

$$\Delta P_{p2} = 0,11 \left(\frac{Q_1 n}{1000} B_{p2}\right)^2 m_{z2} = 0,11 \cdot \left(\frac{72 \cdot 1710}{1000} \cdot 0,033\right)^2 \cdot 58,5 = 106 \text{ W} \quad (4.64)$$

kde hmotnost zubů rotoru:

$$\begin{aligned} m_{z2} &= \left(\frac{\pi D_2^2}{4} - \frac{\pi(D_2 - 2h_{d2})^2}{4} - Q_2 S_{d2}\right) l_{Fe} k_{Fe} \rho_{Fe} = \\ &= \left(\frac{\pi 0,4165^2}{4} - \frac{\pi(0,4165 - 2 \cdot 0,038)^2}{4} - 60 \cdot 283,8 \cdot 10^{-6}\right) \cdot 0,28 \cdot 0,97 \cdot 7650 = 58,5 \text{ kg} \end{aligned} \quad (4.65)$$

a plocha rotorové drážky:

$$\begin{aligned} S_{d2} &= \frac{b_{d21} + b_{d22}}{2} h_{d2} + \frac{b_{d21} + b_{02}}{2} h_{k2} + b_{02} h_{02} = \\ &= \frac{(9,6 + 6)10^{-3}}{2} \cdot 34 \cdot 10^{-3} + \frac{(9,6 + 3)10^{-3}}{2} \cdot 2 \cdot 10^{-3} + (3 \cdot 2) \cdot 10^{-6} = 283,8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \end{aligned} \quad (4.66)$$

Celkové ztráty v železe:

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_{Feh} + \Delta P_{\delta p1} + \Delta P_{\delta p2} + \Delta P_{p1} + \Delta P_{p2} = 2742 + 84 + 801 + 93 + 106 = 3826 \text{ W} \quad (4.67)$$

4.5.2 Činná složka proudu naprázdno

Činná složka proudu naprázdno je počítána ze ztrát v železe, ze ztrát mechanických a z elektrických ztrát ve statoru při chodu naprázdno.

$$I_{0\check{c}} = \frac{\Delta P_{Fe} + \Delta P_{mech} + \Delta P_{j0}}{m_1 U_1} = \frac{3826 + 537 + 597}{3 \cdot \frac{1080}{\sqrt{3}}} = 2,65 \text{ A} \quad (4.68)$$

kde

$$\Delta P_{j0} = m_1 R_1 I_\mu^2 = 3 \cdot 0,015 \cdot 115,2^2 = 597 \text{ W} \quad (4.69)$$

$$\Delta P_{mech} = K_T (10D_e)^3 = 1,5 \cdot (10 \cdot 0,71)^3 = 537 \text{ W} \quad (4.70)$$

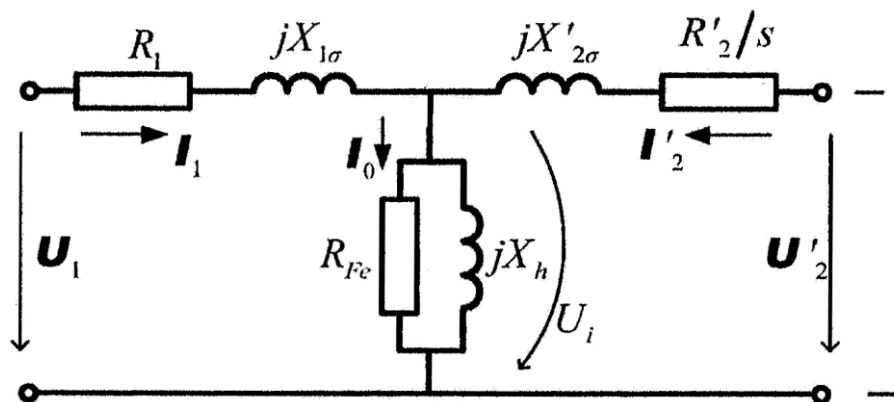
a činitel K_T je zjištěn z Tabulky 6.25. [1] pro čtyřpólový stroj.

4.5.3 Výpočet fiktivního odporu

$$R_{Fe} = \frac{\Delta P_{Fe}}{m I_{0\check{c}}^2} = \frac{3826}{3 \cdot 2,65^2} = 182 \ \Omega \quad (4.71)$$

4.6 Reaktance vzájemné indukčnosti statoru a rotoru

Z náhradního schématu znázorněného na Obrázku 4.6. lze vypočítat zbývající parametr, kterým je reaktance vzájemné indukčnosti statorového a rotorového vinutí. Pro výpočet je však nutné znát hodnotu indukovaného napětí a procházející proud.



Obrázek 4.6. Náhradní schéma asynchronního motoru [5]

Statorový proud pro bod zlomu:

$$I_1 = \frac{P_2}{mU_{fz}\eta \cos \varphi} = \frac{475 \cdot 10^3}{3 \cdot \frac{1080}{\sqrt{3}} \cdot 0,94 \cdot 0,89} = 303,5 \text{ A} \quad (4.72)$$

kde účinnost je předběžně zvolená bude dále upravena.

Indukované napětí:

$$\bar{U}_{i1} = \bar{U}_1 - \bar{Z}_1 \bar{I}_1 = \frac{1080}{\sqrt{3}} - (0,015 + j0,1627) \cdot 303,5 = 619 - j49,38 = (621 \angle -4,56^\circ) \text{ V} \quad (4.73)$$

Magnetizační reaktance pro bod zlomu:

$$X_\mu = \frac{U_{i1}}{I_\mu} = \frac{621}{115,2} = 5,391 \Omega \quad (4.74)$$

5 Pracovní bod

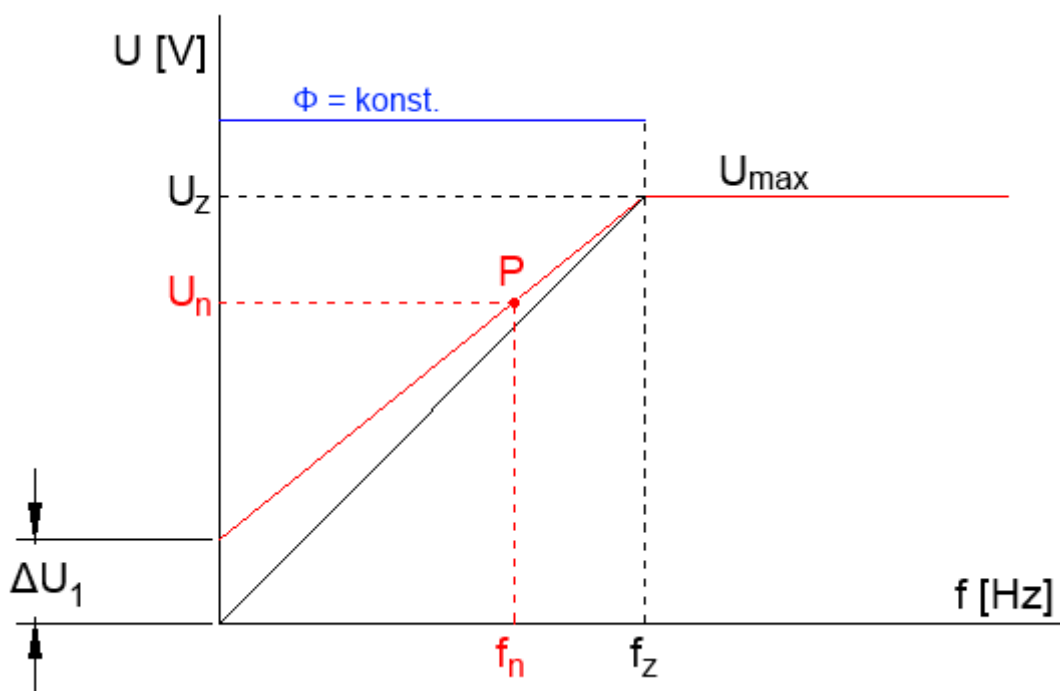
5.1 Přepoččet hodnot

Při řešení magnetického obvodu v kapitole 3. nebyly uvažovány pasivní parametry statorového vinutí a za indukované napětí bylo považováno napájecí napětí ze střídače. Nyní je však indukované napětí známé a lze tedy upravit hodnotu magnetického toku. Po několika opakováních výpočtu se hodnota ustálí na hodnotě, která bude použita pro další výpočty:

$$\Phi = 0,0632 \text{ Wb} \quad (5.1)$$

Dosud byly výpočty prováděny pro bod zlomu. Za předpokladu konstantního magnetického toku je nyní možné dopočítat indukované napětí při jmenovitých otáčkách stroje. Tyto otáčky jsou však rotorové a je nutno napřed určit jmenovité synchronní otáčky. Ty lze zjistit ze známého vztahu pro skluz. Skluz není sice znám, avšak pro motory s měděnou klecí nakrátko bývá obvykle okolo 1 - 2 %. Je třeba ho tedy z počátku předběžně zvolit a zpětným ověřením, které je uvedeno dále, poupravit. Pro zjednodušení a přehlednost je v následujících výpočtech uvažována již zjištěná konečná hodnota skluzu:

$$s_n = 0,9 \% \quad (5.2)$$



Obrázek 5.1. Závislost napětí na frekvenci při konstantním magnetickém toku

Synchronní otáčky statorového magnetického pole pro jmenovitý skluz:

$$n_s = \frac{n}{1-s_n} = \frac{1285}{1-0,009} = 1297 \text{ ot / min} \quad (5.3)$$

Napájecí frekvence pro jmenovitý skluz:

$$f_n = \frac{pn_s}{60} = \frac{2 \cdot 1297}{60} = 43,2 \text{ Hz} \quad (5.4)$$

Na Obrázku 5.1. je znázorněna závislost napájecího napětí na frekvenci a je zde vyznačen pracovní bod stroje. Obrázek je pouze pro osvětlení postupu a neodpovídá žádnému konkrétnímu motoru. Jelikož má být magnetický tok konstantní, musí být tato závislost lineární. Z již známé frekvence a magnetického toku lze tedy zjistit indukované fázové napětí v pracovním bodě:

$$U_{\text{inf}} = 4,44 \Phi N_1 k_{v1} f_n = 4,44 \cdot 0,0632 \cdot 42 \cdot 0,924 \cdot 43,2 = 470,4 \text{ V} \quad (5.5)$$

Nyní je třeba se vrátit na začátek a provést stejné výpočty pro pracovní bod. Konečné hodnoty jsou uvedeny v Tabulce 5.1.

Magnetický obvod		
Magnetický indukční tok	Φ [Wb]	0,0632
Vzduchová mezera		
Magnetická indukce ve vzduchové mezeře	B_δ [T]	0,883
Magnetické napětí vzduchové mezery	U_δ [A]	3409
Zuby statoru		
Magnetická indukce v zubech statoru	$B_{z1\text{max}}$ [T]	1,872
	$B_{z1\text{av}}$ [T]	1,531
	$B_{z1\text{min}}$ [T]	1,295
Střední magnetická intenzita zubů statoru	H_{z1} [A/m]	8817
Magnetické napětí zubů statoru	U_{z1} [A]	813
Zuby rotoru		
Magnetická indukce v zubech rotoru	B_{z2} [T]	1,703
Magnetická intenzita v zubech rotoru	H_{z2} [A/m]	12500
Magnetické napětí zubů rotoru	U_{z2} [A]	950
Jho statoru		
Magnetická indukce ve jhu statoru	B_{j1} [T]	1,516
Magnetická intenzita ve jhu statoru	H_{j1} [A/m]	6300
Magnetické napětí jha statoru	U_{j1} [A]	532

Jho rotoru		
Magnetická indukce ve jhu rotoru	B_{jz} [T]	1,377
Magnetická intenzita ve jhu rotoru	H_{jz} [A/m]	4000
Magnetické napětí jha rotoru	U_{jz} [A]	311
Magnetizační proud		
Výsledné magnetické napětí	F_m [A]	6015
Magnetizační proud	I_μ [A]	114,8
Odpory a reaktance		
Odpor statoru	R_1 [Ω]	0,015
Rozptylová reaktance statoru	$X_{1\sigma}$ [Ω]	0,1233
Odpor rotoru	R'_2 [Ω]	0,00932
Rozptylová reaktance rotoru	$X'_{2\sigma}$ [Ω]	0,1118
Fiktivní odpor železa	R_{Fe} [Ω]	132
Magnetizační reaktance	X_μ [Ω]	4,1
Ztráty		
Hlavní ztráty v železe	ΔP_{Feh} [W]	1784
Povrchové ztráty	$\Delta P_{\delta p1}$ [W]	55
	$\Delta P_{\delta p2}$ [W]	522
Pulzační ztráty	ΔP_{p1} [W]	53
	ΔP_{p2} [W]	60
Mechanické ztráty	ΔP_{mech} [W]	537
Proudy		
Statorový proud	I_1 [A]	386,8
Činná složka proudu naprázdno	$I_{o\check{c}}$ [A]	2,5

Tabulka 5.1. Přepočítané hodnoty

5.2 Vliv povrchového jevu a nasycení

Pro ověření zvoleného skluzu lze využít analytického výpočtu momentové charakteristiky. Pro výpočet je výhodné znát poměry při rozběhu motoru, kdy motorem teče proud nakrátko. Proud nakrátko asynchronního motoru je proud, který teče vinutím při stojícím rotoru, tzn. záběrný proud motoru. Pro jeho výpočet je nutné uvažovat vliv povrchového jevu a vliv nasycení na odpory a reaktance stroje při stavu nakrátko.

5.2.1 Vliv povrchového jevu na odpor a reaktanci rotorového vinutí

Redukovaná výška vodiče:

$$\xi = h_{d2} \sqrt{\frac{\omega \gamma \mu_0}{2}} = 38 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{\frac{2\pi \cdot 43,2 \cdot 57 \cdot 10^6 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}}{2}} = 3,747 \quad (5.6)$$

Činitel zvětšení odporu tyče:

$$k_R = \xi \frac{\sinh 2\xi + \sin 2\xi}{\cosh 2\xi - \cos 2\xi} = 3,747 \cdot \frac{\sinh 2 \cdot 3,747 + \sin 2 \cdot 3,747}{\cosh 2 \cdot 3,747 - \cos 2 \cdot 3,747} = 3,752 \quad (5.7)$$

Činitel celkového zvětšení odporu fáze rotoru vlivem povrchového jevu:

$$K_R = 1 + \frac{R_1}{R_2} (k_R - 1) = 1 + \frac{21,78 \cdot 10^{-6}}{30,94 \cdot 10^{-6}} \cdot (3,752 - 1) = 2,937 \quad (5.8)$$

Odpor rotorové klece s uvažováním povrchového jevu:

$$R_{2\xi} = K_R R_2 = 2,937 \cdot 30,94 \cdot 10^{-6} = 90,88 \cdot 10^{-6} \Omega \quad (5.9)$$

Činitel změny činitele magnetické vodivosti drážky:

$$k_X = \frac{3}{2\xi} \frac{\sinh 2\xi - \sin 2\xi}{\cosh 2\xi - \cos 2\xi} = \frac{3}{2 \cdot 3,747} \cdot \frac{\sinh 2 \cdot 3,747 - \sin 2 \cdot 3,747}{\cosh 2 \cdot 3,747 - \cos 2 \cdot 3,747} = 0,4 \quad (5.10)$$

Činitel magnetické vodivosti drážky s uvažováním povrchového jevu:

$$\lambda_{d2\xi} = k_X \lambda_{d2} = 0,4 \cdot 1,917 = 0,767 \quad (5.11)$$

Rozptylová reaktance fáze rotorového vinutí s uvažováním povrchového jevu:

$$X_{2\sigma\xi} = K_X X_{2\sigma} = 0,7 \cdot 0,37 \cdot 10^{-3} = 0,26 \cdot 10^{-3} \Omega \quad (5.12)$$

kde činitel

$$K_X = \frac{\lambda_{d2\xi} + \lambda_{\varepsilon 2} + \lambda_{dif2}}{\lambda_{d2} + \lambda_{\varepsilon 2} + \lambda_{dif2}} = \frac{0,765 + 1,168 + 0,75}{1,917 + 1,168 + 0,75} = 0,7 \quad (5.13)$$

Odpor a rozptylová reaktance rotorové klece s uvažováním povrchového jevu přepočtená na stator:

$$R'_{2\xi} = R_{2\xi} 4m_1 \frac{(N_1 k_{v1})^2}{Q_2} = 91,06 \cdot 10^{-6} \cdot 4 \cdot 3 \cdot \frac{(42 \cdot 0,924)^2}{60} = 0,0274 \Omega \quad (5.14)$$

$$X'_{2\sigma\xi} = X_{2\sigma\xi} 4m_1 \frac{(N_1 k_{v1})^2}{Q_2} = 0,26 \cdot 10^{-3} \cdot 4 \cdot 3 \cdot \frac{(42 \cdot 0,924)^2}{60} = 0,0783 \Omega \quad (5.15)$$

5.2.2 Vliv nasycení na rozptylové reaktance stroje při stavu nakrátko

Proud rotoru počítaný přibližně bez uvažování vlivu nasycení rozptylových cest při spouštění:

$$\begin{aligned} I'_2 &= \frac{U_{1N}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_{2\xi}}{s}\right)^2 + (X_{1\sigma} + X'_{2\sigma\xi})^2}} = \\ &= \frac{481}{\sqrt{\left(0,015 + \frac{0,0274}{1}\right)^2 + (0,1233 + 0,0783)^2}} = 2328 \text{ A} \end{aligned} \quad (5.16)$$

Při uvažování činitele nasycení $k_n = 1,3$ a $I_1 \approx I'_2$ je celkové magnetické napětí na jednu drážku vinutí:

$$\begin{aligned} F_{dav} &= 0,7 \frac{k_n I_1 V_{d1}}{a} \left(k'_\beta + k_{y1} k_{v1} \frac{Q_1}{Q_2} \right) = \\ &= 0,7 \frac{1,3 \cdot 2328 \cdot 14}{4} \left(0,875 + 0,966 \cdot 0,924 \frac{72}{60} \right) = 14430 \text{ A} \end{aligned} \quad (5.17)$$

kde činitel zkrácení kroku statorového vinutí:

$$k_{y1} = \sin\left(\beta \frac{\pi}{2}\right) = \sin\left(0,833 \frac{\pi}{2}\right) = 0,966 \quad (5.18)$$

Fiktivní indukce rozptylového toku ve vzduchové mezeře:

$$B_{f\delta} = \frac{F_{dav}}{1,6\delta C_n} \cdot 10^{-6} = \frac{14430}{1,6 \cdot 0,00175 \cdot 1,162} \cdot 10^{-6} = 4,43 \text{ T} \quad (5.19)$$

kde činitel

$$C_n = 0,64 + 2,5 \sqrt{\frac{\delta}{t_{d1} + t_{d2}}} = 0,64 + 2,5 \sqrt{\frac{0,00175}{0,01833 + 0,02181}} = 1,162 \quad (5.20)$$

Dodatečné otevření drážek statoru a rotoru:

$$\Delta b_{01} = (t_{d1} - b_{01})(1 - \kappa_\delta) = (18,33 - 9,3)(1 - 0,58) = 3,79 \text{ mm} \quad (5.21)$$

$$\Delta b_{02} = (t_{d2} - b_{02})(1 - \kappa_\delta) = (21,81 - 3)(1 - 0,58) = 7,9 \text{ mm} \quad (5.22)$$

kde činitel κ_δ závislý na fiktivní indukci je určen z Obr. 6.50. v [1].

Zmenšení činitele drážkové rozptylové vodivosti drážky statoru a rotoru:

$$\Delta\lambda_{d1n} = \frac{(h_{01} + h_{k1})}{b_{01}} \frac{\Delta b_{01}}{b_{01} + \Delta b_{01}} = \frac{(2 + 2) \cdot 10^{-3}}{9,3 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{3,79 \cdot 10^{-3}}{(9,3 + 3,79) \cdot 10^{-3}} = 0,125 \quad (5.23)$$

$$\Delta\lambda_{d2n} = \frac{h_{02}}{b_{02}} \frac{\Delta b_{02}}{b_{02} + \Delta b_{02}} = \frac{2 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{7,9 \cdot 10^{-3}}{(3 + 7,9) \cdot 10^{-3}} = 0,483 \quad (5.24)$$

Činitel magnetické vodivosti drážkového rozptylu při nasycení pro stator a rotor:

$$\lambda_{d1n} = \lambda_{d1} - \Delta\lambda_{d1} = 1,736 - 0,125 = 1,611 \quad (5.25)$$

$$\lambda_{d2\zeta n} = \lambda_{d2\zeta} - \Delta\lambda_{d2n} = 0,765 - 0,483 = 0,282 \quad (5.26)$$

Činitel magnetické vodivosti diferenčního rozptylu při nasycení pro stator a rotor:

$$\lambda_{dif1n} = \lambda_{dif1} \kappa_{\delta} = 0,538 \cdot 0,58 = 0,312 \quad (5.27)$$

$$\lambda_{dif2n} = \lambda_{dif2} \kappa_{\delta} = 0,75 \cdot 0,58 = 0,435 \quad (5.28)$$

Rozptylová reaktance statorového vinutí s uvažováním nasycení:

$$X_{1\sigma n} = X_{1\sigma} \frac{\lambda_{d1n} + \lambda_{dif1n} + \lambda_{\epsilon 1}}{\lambda_{d1} + \lambda_{dif1} + \lambda_{\epsilon 1}} = 0,1233 \cdot \frac{1,611 + 0,312 + 2,065}{1,736 + 0,538 + 2,065} = 0,1139 \Omega \quad (5.29)$$

Rozptylová reaktance rotorové klece s uvažováním vlivu nasycení a povrchového jevu:

$$X'_{2\sigma\zeta n} = X'_{2\sigma\zeta} \frac{\lambda_{d2\zeta n} + \lambda_{dif2n} + \lambda_{\epsilon 2}}{\lambda_{d2} + \lambda_{dif2} + \lambda_{\epsilon 2}} = 0,0783 \cdot \frac{0,282 + 0,435 + 1,168}{1,917 + 0,75 + 1,168} = 0,0385 \Omega \quad (5.30)$$

Vzájemná reaktance vinutí stator a rotoru při spouštění:

$$X_{12n} = X_{12} \frac{F_m}{U_{\delta}} = 4,19 \cdot \frac{6015}{3409} = 7,39 \Omega \quad (5.31)$$

kde vzájemná reaktance vinutí statoru a rotoru:

$$X_{12} = \frac{U_{1n}}{I_{\mu}} - X_{1\sigma} = \frac{481}{114,8} - 0,1139 = 4,19 \Omega \quad (5.32)$$

Činitel rozptylu:

$$c_{1pn} = 1 + \frac{X_{1\sigma n}}{X_{12n}} = 1 + \frac{0,1139}{7,39} = 1,0154 \quad (5.33)$$

Proud v rotorovém vinutí při rozběhu přepočtený na stator:

$$I'_2 = \frac{U_{1n}}{\sqrt{a_p^2 + b_p^2}} = \frac{481}{\sqrt{0,0428^2 + 0,153^2}} = 3027 \text{ A} \quad (5.34)$$

kde

$$a_p = R_1 + c_{1pn} \frac{R'_{2\xi}}{s} = 0,015 + 1,0154 \cdot \frac{0,0274}{1} = 0,0428 \Omega \quad (5.35)$$

$$b_p = X_{1\sigma n} + c_{1pn} X'_{2\sigma\xi n} = 0,1139 + 1,0154 \cdot 0,0385 = 0,153 \Omega \quad (5.36)$$

Statorový proud při rozběhu:

$$I_1 = I'_2 \frac{\sqrt{a_p^2 + (b_p + X_{12n})^2}}{c_{1pn} X_{12n}} = 3027 \cdot \frac{\sqrt{0,0428^2 + (0,153 + 7,39)^2}}{1,0154 \cdot 7,39} = 3043 \text{ A} \quad (5.37)$$

5.3 Ověření skluzu

Na začátku této kapitoly byl volen skluz. Po přepočtu hodnot pro tento skluz a pracovní bod lze ověřit hodnotu skluzu pomocí momentové charakteristiky. Momentová charakteristika je vypočtena analyticky podle [5]:

$$M(s) = \frac{pm_1}{\omega_1} \frac{R'_2}{s} \frac{U_{1n}^2}{\left(c_1 \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_\sigma^2} \quad (5.38)$$

kde činitel c_1 a celková rozptylová reaktance jsou zjištěny podle následujících vztahů:

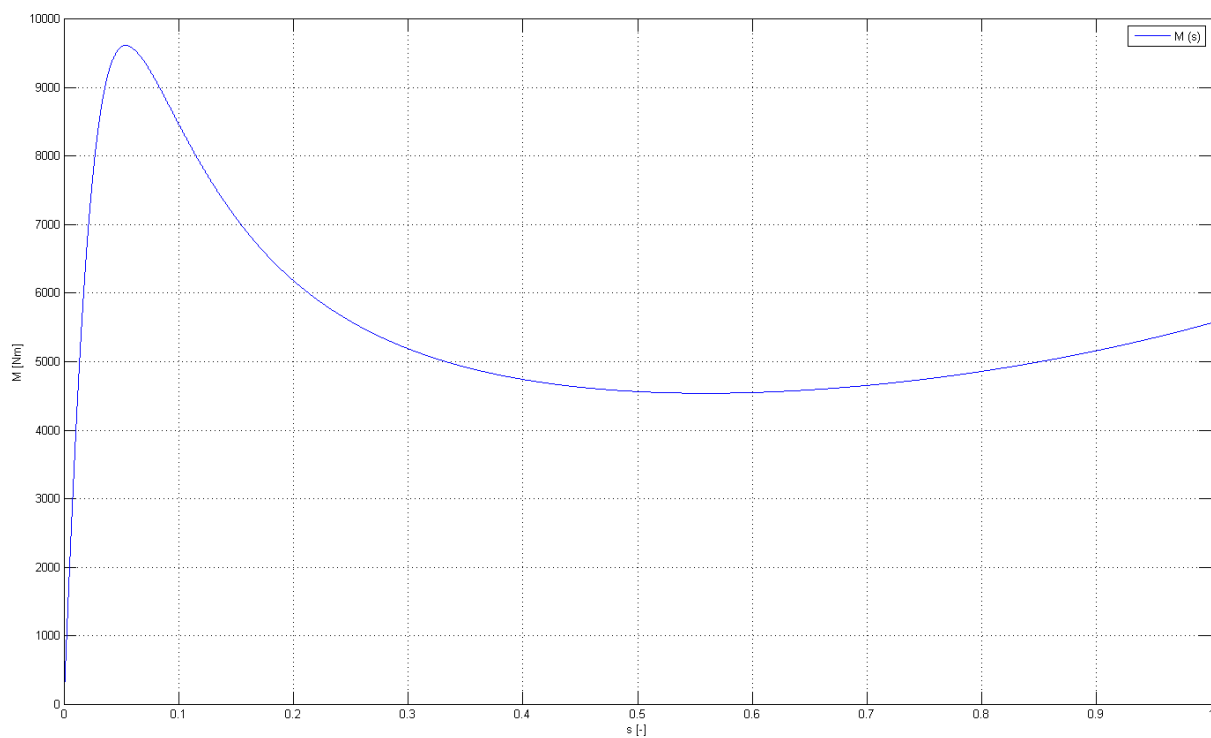
$$c_1 = |\bar{c}_1| = \left| 1 + \frac{R_1 + jX_{1\sigma}}{\bar{Z}_{1h}} \right| \quad (5.39)$$

$$\bar{Z}_{1h} = \frac{jX_\mu R_{Fe}}{R_{Fe} + jX_\mu} \quad (5.40)$$

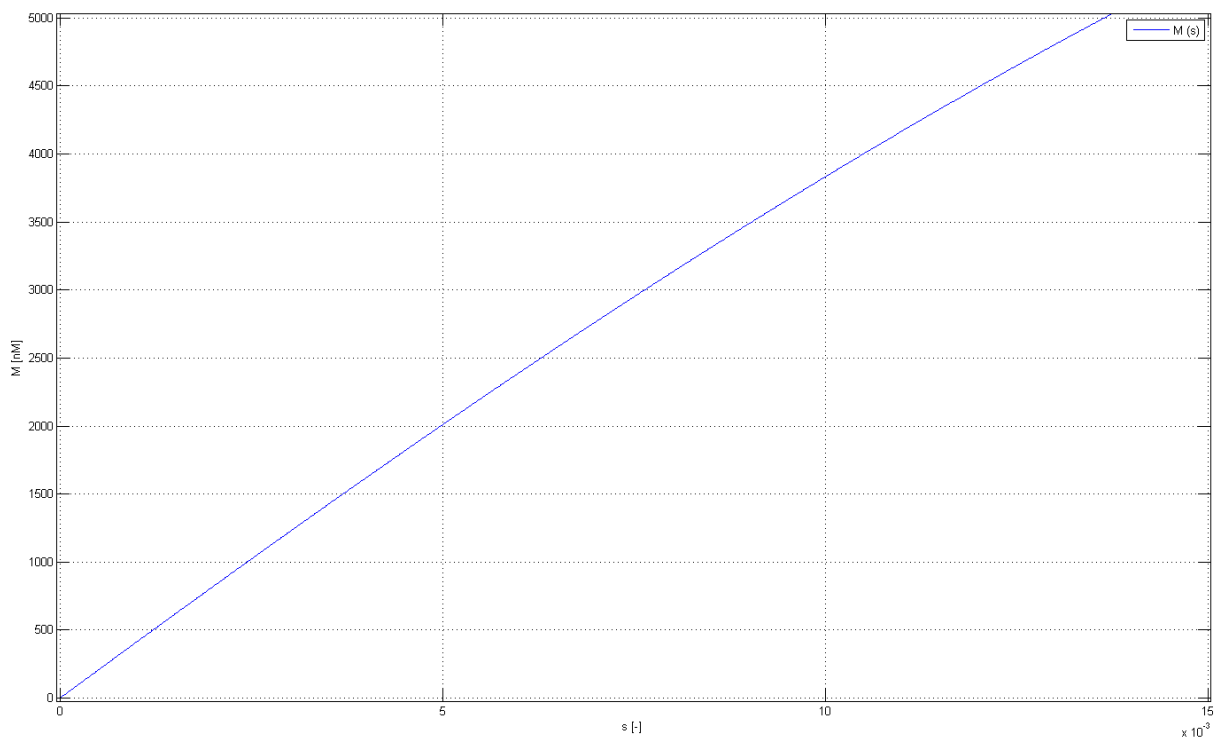
$$X_\sigma = X_{1\sigma} + c_1 X'_{2\sigma} \quad (5.41)$$

Výpočet a grafické znázornění je provedeno pomocí programu MATLAB a skript k výpočtu je v příloze C. Na Obrázcích 5.2. a 5.3. jsou znázorněny momentová charakteristika a část momentové charakteristiky v okolí pracovního bodu. Z Obrázku 5.3. je vidět, že skluz odpovídá jmenovitému momentu, čímž byla správnost skluzu ověřena. Jmenovitý moment:

$$M_n = 9,55 \frac{P_2}{n_2} = 9,55 \cdot \frac{475 \cdot 10^3}{1285} = 3530 \text{ Nm} \quad (5.42)$$



Obrázek 5.2. Momentová charakteristika řešená pomocí programu MATLAB



Obrázek 5.3. Přiblížení momentové charakteristiky v okolí pracovního bodu

6 Účinnost

Účinnost asynchronního motoru lze zjistit z jeho výkonu a z celkových ztrát stroje. Je třeba dopočítat přídavné ztráty a Jouleovy ztráty ve vinutí statoru a rotoru:

$$\Delta P_{j1} = m_1 R_1 I_1^2 = 3 \cdot 0,015 \cdot 386,8^2 = 6734 \text{ W} \quad (6.1)$$

Proud v rotoru:

$$I_2 = k_i I_1 p_i = 0,92 \cdot 386,8 \cdot 3,88 = 1381 \text{ A} \quad (6.2)$$

kde činitel přepočtu proudů:

$$p_i = \frac{2m_1 N_1 k_{v1}}{Q_2} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 42 \cdot 0,924}{60} = 3,88 \quad (6.3)$$

a k_i je činitel uvažující vliv magnetizačního proudu a odporů vinutí na poměr I_1/I_2 určený z Obrázku 6.22. [1].

$$\Delta P_{j2} = Q_2 R_2 I_2^2 = 60 \cdot 30,94 \cdot 10^{-6} \cdot 1381^2 = 3540 \text{ W} \quad (6.4)$$

Přídavné ztráty vznikají například rozptylovými toky přes konstrukční prvky motoru (kostra, ložiskové štíty) nebo rozptylovým polem v prostoru čel vinutí. Jejich velikost je vzhledem ke složitosti rozptylového pole složité vypočítat a jsou uvažovány jako 0,5 % jmenovitého výkonu:

$$\Delta P_d = 0,005 \cdot P_2 = 0,005 \cdot 475 \cdot 10^3 = 2375 \text{ W} \quad (6.5)$$

Celkové ztráty ve stroji:

$$\Delta P = \Delta P_{Fe} + \Delta P_{mech} + \Delta P_{j1} + \Delta P_{j2} + \Delta P_d = 2474 + 537 + 6734 + 3540 + 2375 = 15660 \text{ W} \quad (6.6)$$

Účinnost asynchronního motoru:

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P} \cdot 100 = \frac{475 \cdot 10^3}{475 \cdot 10^3 + 15660 \cdot 10^3} \cdot 100 = 96,8 \% \quad (6.7)$$

7 Modelování stroje pomocí programu FEMM

Program FEMM umožňuje numerické řešení magnetických polí ve 2D. Lze s jeho pomocí vypočítat ztráty ve stroji, parametry náhradního schématu a magnetizační charakteristiku stroje. Modelování proběhlo ve třech stavech motoru. Ve jmenovitém stavu, ve stavu naprázdno a nakrátko.

7.1 Postup při modelování

Základem je vybrání typu úlohy a zadání geometrie stroje. Geometrii lze kreslit pomocí programu pro kreslení typu CAD a následně importovat ve formátu .dxf, nebo kreslit přímo v programu FEMM. Dále je nutné nadefinovat materiály, okrajové podmínky a parametry napájení a tyto přiřadit dané geometrii. K rozložení vinutí poslouží Tingleyho schéma uvedené v kapitole 2. Dalším krokem je nadefinování dalších parametrů, jako je hloubka úlohy a frekvence. Poté je možné spustit výpočet samotného problému a zkoumat jeho výsledky.

Pro názornost zadávání proudu je vybrán stav naprázdno. Pro další dva stavy je postup stejný. Proud tekoucí přívodním vodičem se dělí do čtyř paralelních větví a je zadáván v amplitudě:

$$I_{0v} = \frac{\sqrt{I_{0c}^2 + I_{\mu}^2}}{a} \cdot \sqrt{2} = \frac{\sqrt{114,8^2 + 2,5^2}}{4} \cdot \sqrt{2} = 40,6 \text{ A} \quad (7.1)$$

Při zadávání proudů je třeba dbát na pootočení v třífázovém systému:

$$I_A = 40,6 \text{ A} \quad (7.2)$$

$$I_B = 40,6e^{j120^\circ} = -20,3 + j35,2 \text{ A} \quad (7.3)$$

$$I_C = 40,6e^{j240^\circ} = -20,3 - j35,2 \text{ A} \quad (7.4)$$

Grafické vstupy a výstupy z programu FEMM jsou pro svoji obsáhlost umístěny v příloze D.

7.2 Odpory a reaktance získané pomocí modelování

Z modelování je možné získat informace, ze kterých lze vypočítat odpor statoru a rotoru, rozptylovou reaktanci statoru a rotoru a reaktanci magnetizační. Jelikož je model proveden ve 2-D, lze počítat odpory a reaktance pouze v drážkové části vinutí.

7.2.1 Odpor statorového vinutí

Odpor statorového vinutí je počítán z Jouleových ztrát ve vinutí z modelování ve jmenovitém stavu. Jouleovy ztráty v jedné cívkové straně vinutí:

$$\Delta P_{j1cs} = 17,7 \text{ W} \quad (7.5)$$

Každá cívka má dvě cívkové strany a jednu paralelní větví tvoří 6 cívek spojených do série:

$$\Delta P_{j1} = 2 \cdot 6 \cdot \Delta P_{j1cs} = 2 \cdot 6 \cdot 17,7 = 212,4 \text{ W} \quad (7.6)$$

Odpor statorového vinutí drážkové části:

$$R_{ldr} = \frac{\Delta P_{j1}}{aI_{1a}^2} = \frac{212,4}{4 \cdot 96,7^2} = 5,679 \cdot 10^{-3} \Omega \quad (7.7)$$

kde I_a je proud v jedné paralelní větví.

7.2.2 Odpor rotorového vinutí

Podobně je počítán odpor rotorového vinutí. Jouleovy ztráty v jedné tyči:

$$\Delta P_{j2t} = 36,4 \text{ W} \quad (7.8)$$

Model počítá ztráty pouze v délce paketu, tyč ovšem přesahuje paket na každé straně o 27 mm. Je třeba tedy tyto ztráty přepočítat na celou délku tyče:

$$\Delta P'_{j2t} = \frac{l_{Fe} + 2 \cdot 27}{l_{Fe}} \Delta P_{j2t} = \frac{280 + 2 \cdot 27}{280} \cdot 36,4 = 43,4 \text{ W} \quad (7.9)$$

Odpor tyče rotorového vinutí:

$$R_t = \frac{\Delta P'_{j2t}}{I_2^2} = \frac{43,4}{1381^2} = 22,76 \cdot 10^{-6} \Omega \quad (7.10)$$

Odpor tyče rotorového vinutí přepočtený na stator:

$$R'_t = R_t 4m_1 \frac{(N_1 k_{v1})^2}{Q_2} = 22,76 \cdot 10^{-6} \cdot 4 \cdot 3 \cdot \frac{(42 \cdot 0,924)^2}{60} = 6,856 \cdot 10^{-3} \Omega \quad (7.11)$$

7.2.3 Rozptylová reaktance statorového vinutí

Z magnetické energie nahromaděné v drážkách jedné cívkové skupiny se zjistí indukčnost a následně i reaktance vinutí.

Magnetická energie zjištěná v programu FEMM:

$$W_m = 4,029 \text{ J} \quad (7.12)$$

Rozptylová indukčnost vinutí v drážkové části :

$$L_{\sigma d} = \frac{2W_m}{aI_{1a}^2} = \frac{2 \cdot 4,029}{4 \cdot 96,7^2} = 2,154 \cdot 10^{-4} \text{ H} \quad (7.13)$$

Rozptylová reaktance vinutí v drážkové části:

$$X_{1\sigma d} = 2\pi f L_{\sigma d} = 2\pi \cdot 43,2 \cdot 2,154 \cdot 10^{-4} = 0,0585 \Omega \quad (7.14)$$

7.2.4 Rozptylová reaktance rotorového vinutí

Je počítána podobně jako rozptylová reaktance statorového vinutí. Magnetická energie nahromaděná v drážce:

$$W_m = 0,828 \text{ J} \quad (7.15)$$

Rozptylová indukčnost klece v drážkové části přepočtená na délku l_i :

$$L_{2\sigma d} = \frac{2W_m}{I_t^2} \cdot \frac{l_i}{l_{Fe}} = \frac{2 \cdot 0,828}{1381^2} \cdot \frac{0,2835}{0,28} = 8,792 \cdot 10^{-7} \text{ H} \quad (7.16)$$

Rozptylová indukčnost klece v drážkové části přepočtená na stator:

$$L'_{2\sigma d} = L_{2\sigma d} 4m_1 \frac{(N_1 k_{v1})^2}{Q_2} = 8,792 \cdot 10^{-7} \cdot 4 \cdot 3 \cdot \frac{(42 \cdot 0,924)^2}{60} = 2,648 \cdot 10^{-4} \text{ H} \quad (7.17)$$

Rozptylová reaktance klece v drážkové části přepočtená na stator:

$$X'_{2\sigma d} = 2\pi f L'_{2\sigma d} = 2\pi \cdot 43,2 \cdot 2,648 \cdot 10^{-4} = 0,0719 \Omega \quad (7.18)$$

7.2.5 Magnetizační reaktance

Magnetizační reaktance je určena z magnetické energie v plechách statoru a rotoru a ve vzduchové mezeře při stavu naprázdno. Odečtená hodnota z programu FEMM:

$$W_m = 163,314 \text{ J} \quad (7.19)$$

Magnetizační indukčnost:

$$L_\mu = \frac{2W_m}{(\sqrt{2}I_\mu)^2} = \frac{2 \cdot 163,314}{(\sqrt{2} \cdot 114,8)^2} = 12,392 \cdot 10^{-3} \text{ H} \quad (7.20)$$

Magnetizační reaktance:

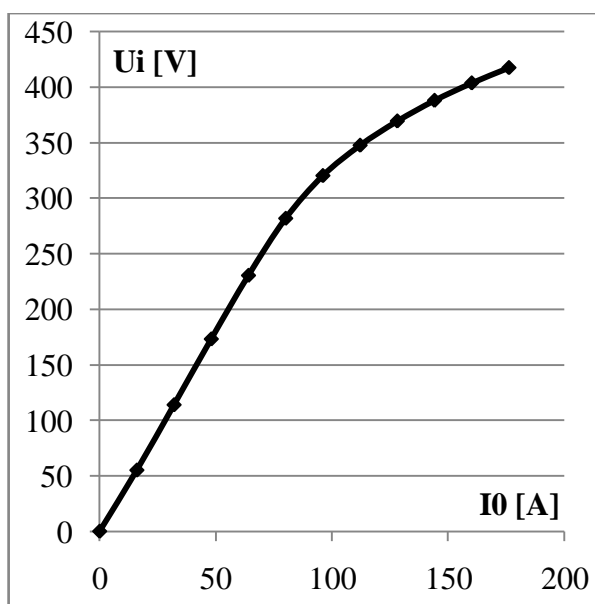
$$X_\mu = 2\pi f L_\mu = 2\pi \cdot 43,2 \cdot 12,392 \cdot 10^{-3} = 3,364 \Omega \quad (7.21)$$

7.3 Magnetizační charakteristika

Z modelování lze zjistit také průběh magnetizační charakteristiku. Pro zvolené hodnoty proudů byl modelován stav naprázdno a následně odečten magnetický tok a vypočítáno indukované napětí ve stroji. Vypočítané hodnoty jsou v Tabulce 7.1. Průběh magnetizační charakteristiky je znázorněn na Obrázku 7.1.

I_0 [A]	0	16	32	48	64	80	96	112	128	144	160	176
U_i [V]	0	55	114	153	230	282	320	348	369	388	404	417

Tabulka 7.1. Hodnoty magnetizační charakteristiky



Obrázek 7.1. Magnetizační charakteristika magnetického obvodu

8 Verifikace

Verifikace získaných výsledků je řešena dvěma přístupy. Prvně jsou hodnoty získané analyticky a hodnoty získané z modelování porovnány s hodnotami dodanými od výrobce, pokud je to možné. A protože je model v programu FEMM vytvořen na základě analytických výpočtů, jsou také parametry náhradního schématu získané analyticky a modelováním porovnávány mezi sebou, přičemž jako referenční hodnota je brána hodnota vypočtená analyticky.

Pro verifikaci hodnot je vypočítána relativní odchylka v procentech podle:

$$\Delta = \left| \frac{X_R - X}{X_R} \right| \cdot 100 [\%] \quad (8.1)$$

kde X_R je hodnota referenční a X je hodnota porovnávaná.

8.1 Parametry náhradního schématu

Modelování je provedeno pouze v drážkové části vinutí. Hodnoty od výrobce však zahrnují i prostor čel vinutí, ale nelze je přepočítat pouze na drážkovou část. Proto není možné tyto výsledky porovnávat. Lze tedy porovnat analytické výpočty s dokumentací od výrobce a modelování s hodnotami zjištěnými analyticky. Odpory a rozptylové reaktance je však nutno přepočítat.

Analytické hodnoty přepočítané na drážkovou část vinutí:

$$R_{1d} = \frac{l_d}{l_\varepsilon + l_d} R_1 = \frac{280 \cdot 10^{-3}}{462,86 \cdot 10^{-3} + 280 \cdot 10^{-3}} \cdot 0,015 = 5,654 \cdot 10^{-3} \Omega \quad (8.2)$$

$$R'_l = R_l 4m_1 \frac{(N_1 k_{v1})^2}{Q_2} = 21,78 \cdot 10^{-6} \cdot 4 \cdot 3 \cdot \frac{(42 \cdot 0,924)^2}{60} = 6,56 \cdot 10^{-3} \Omega \quad (8.3)$$

$$X_{1\sigma d} = \frac{\lambda_{d1}}{\lambda_{d1} + \lambda_{\varepsilon 1} + \lambda_{dif1}} X_{1\sigma} = \frac{1,736}{1,736 + 2,06 + 0,538} \cdot 0,1233 = 0,0494 \Omega \quad (8.4)$$

$$X'_{2\sigma d} = \frac{\lambda_{d2}}{\lambda_{d2} + \lambda_{\varepsilon 2} + \lambda_{dif2}} X'_{2\sigma} = \frac{1,917}{1,917 + 1,168 + 0,75} \cdot 0,1118 = 0,0559 \Omega \quad (8.5)$$

Jelikož z modelování nelze zjistit ztráty v železe, nelze tedy zjistit ani hodnota fiktivního odporu R_{Fe} .

Porovnání hodnot je v následujících tabulkách:

dokumentace x analyticky			
	dokumentace	výpočet	Δ [%]
R_1 [Ω]	0,0156	0,015	3,8
R'_2 [Ω]	0,0121	0,00932	23,0
$X_{1\sigma}$ [Ω]	0,1394	0,1233	11,5
$X'_{2\sigma}$ [Ω]	0,0886	0,1118	26,2
R_{Fe} [Ω]	68	132	94,1
X_μ [Ω]	3,5	4,1	17,1

Tabulka 8.1. Porovnání odnorů a reaktancí 1

analyticky x modelování			
	výpočet	modelování	Δ [%]
R_{1d} [Ω]	0,005654	0,005679	0,4
R'_t [Ω]	0,00656	0,006856	4,5
$X_{1\sigma d}$ [Ω]	0,0494	0,0585	18,4
$X'_{2\sigma d}$ [Ω]	0,0559	0,0719	28,6
R_{Fe} [Ω]	132	x	
X_μ [Ω]	4,1	3,364	18,0

Tabulka 8.2. Porovnání odnorů a reaktancí 2

8.2 Magnetická indukce

Součástí dodané dokumentace od výrobce jsou hodnoty magnetických indukcí v jednotlivých částech magnetického obvodu a je tedy možné na základě těchto údajů porovnat syčení magnetického obvodu. Srovnání je zapsáno v následující tabulce:

dokumentace x analyticky			
	dokumentace	výpočet	Δ [%]
B_δ [T]	1,08	0,883	18,2
B_{z1max} [T]	2,18	1,872	14,1
B_{z1av} [T]	1,82	1,531	15,9
B_{z1min} [T]	1,56	1,295	17,0
B_{z2} [T]	2,05	1,703	16,9
B_{j1} [T]	1,49	1,516	1,7
B_{j2} [T]	1,5	1,377	8,2

Tabulka 8.3. Porovnání magnetických indukcí

8.3 Účinnost

Na základě modelování nelze zjistit všechny ztráty v motoru. Je tedy s dokumentací porovnávána pouze hodnota zjištěná analytickým výpočtem:

dokumentace x analyticky			
	dokumentace	výpočet	Δ [%]
η [%]	94,47	96,8	2,5

Tabulka 8.4. Porovnání účinnosti

Závěr

Analytickou metodou byly vypočteny parametry náhradního schématu zadaného trakčního asynchronního motoru a jeho účinnost. Na základě vytvořeného MKP modelu byly zjištěny také parametry náhradního schématu a byla vypočtena magnetizační charakteristika. Výsledky byly porovnány s hodnotami dodanými výrobcem.

Z výsledků uvedených v kapitole 8. vyplývá několik poznatků. Pokud jsou porovnávány analytické výpočty s dodanou dokumentací, výsledky se poměrně liší. Důvodem může být to, že výrobce při výpočtech využívá sofistikovaný interní software, který řeší danou problematiku na základě trochu jiných postupů, než je použita v dostupné literatuře a v této práci. Tento rozdíl je patrný zejména u fiktivního odporu a magnetických indukcí v zubech statoru a rotoru. Fiktivní odpor je počítán ze ztrát v železe. Při výpočtu těchto ztrát se pracuje s několika konstantami respektujícími technologii opracování elektrotechnických plechů, které jsou obtížně zjistitelné. Podobné je to při určování magnetických indukcí v zubech statoru i rotoru, kdy i s využitím dostupné literatury jsou vypočítané indukce o 14 – 18 % menší.

Při výpočtu magnetických indukcí ve jhu statoru a ve jhu rotoru je obtížné určit rozložení magnetického toku s ohledem na ventilační kanály. Proto byl zvolen vlastní přístup, který je popsán v kapitole 3. Tyto výsledky jsou relativně přesné, zejména ve statoru. S ohledem na tento výsledek si myslím, že zvolená metoda je použitelná pro statorová jha, pro jha rotorová by bylo zřejmě potřeba, tento postup více zpřesnit.

Z výsledků dále vyplývá, že 2-D modelování v programu FEMM lze využít pro určování nebo ověřování odporů statorového a rotorového vinutí v drážkové části. Pro rozptylové reaktance a magnetizační reaktanci je toto modelování využitelné pouze pro výpočet orientační. Fiktivní odpor jednoduše zjistit nelze.

Účinnost určená na základě analytických výpočtů se liší o 2,5 %. Jelikož je účinnost zjišťována z celkových ztrát, je jasné, že vypočtené ztráty jsou nižší, než jsou ztráty zjištěné výrobcem. Toto je způsobeno faktorem popsáním výše.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] KOPYLOV, I. P. a KOL. *Stavba elektrických strojů*. Praha: SNTL, 1988, 688 s.
- [2] PYRHÖNEN, Juha, JOKINEN, Tapani, a HRABOVCOVÁ, Valéria. *Design of rotating electrical machines*. John Wiley & Sons, Ltd, 2008. 538 s. ISBN 978-0-470-69516-6.
- [3] CIGÁNEK, Ladislav. *Stavba elektrických strojů*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1958, 714s.
- [4] ČERVENÝ, Josef. *Stavba elektrických strojů*. Plzeň, 2012. Dostupné z:
https://courseware.zcu.cz/wps/PA_Courseware/DownloadDokumentu?id=69550
- [5] BARTOŠ, Václav. *Teorie elektrických strojů*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2006. 230 s. ISBN 80-7043-509-7.
- [6] HRUŠKA, Karel. *Teorie elektrických strojů 2*. Plzeň, 2013. Dostupné z:
https://courseware.zcu.cz/wps/PA_Courseware/DownloadDokumentu?id=69967

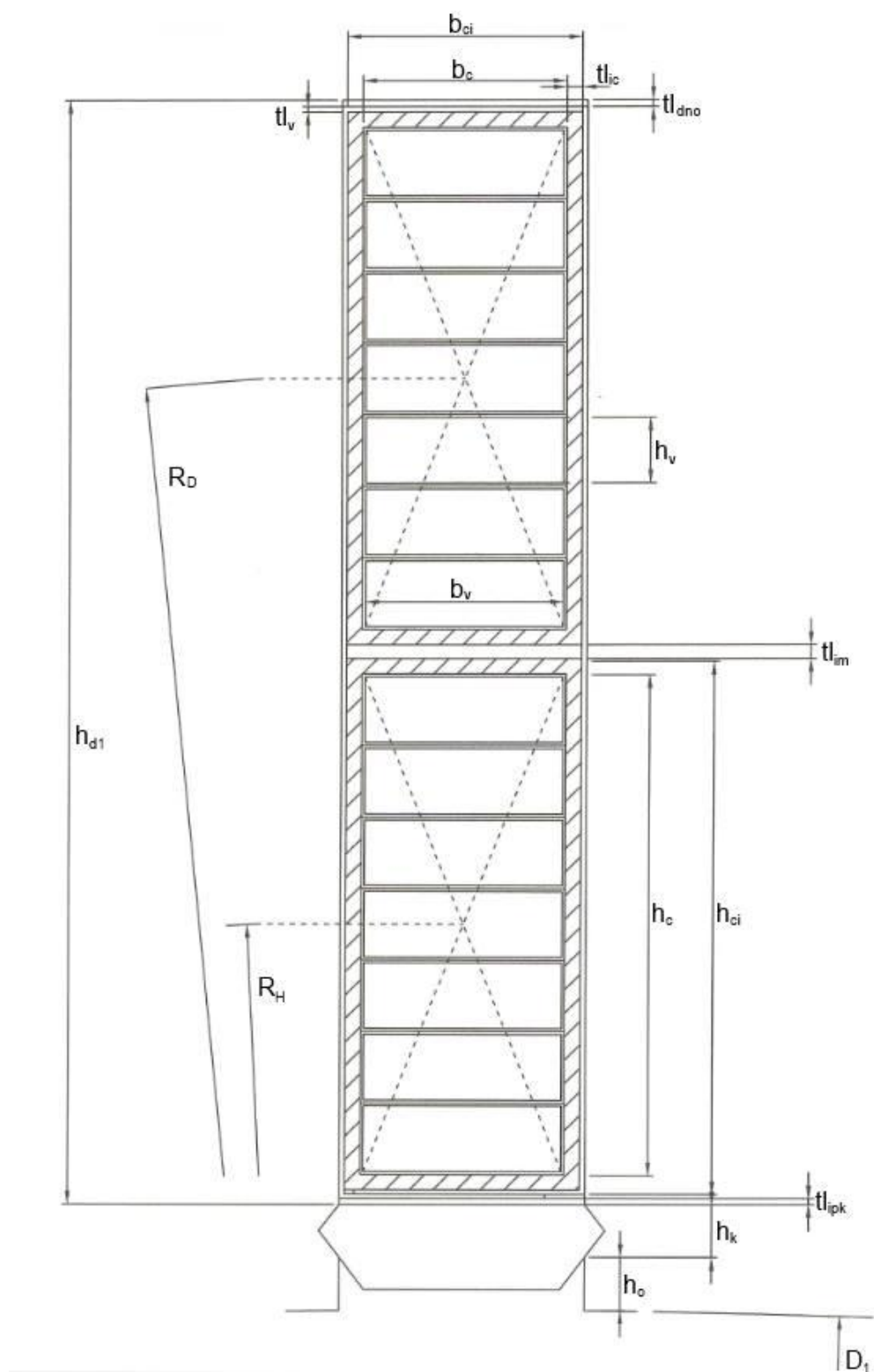
Přílohy

Příloha A – magnetizační charakteristika plechů

$$H[\text{A/m}] = f(B[\text{T}])$$

0.30	200.00
0.35	215.00
0.40	230.00
0.45	250.00
0.50	266.00
0.55	290.00
0.60	320.00
0.65	340.00
0.70	360.00
0.75	390.00
0.80	420.00
0.85	450.00
0.90	500.00
0.95	540.00
1.00	600.00
1.05	660.00
1.10	770.00
1.15	910.00
1.20	1100.00
1.25	1700.00
1.30	2400.00
1.35	3620.00
1.40	4600.00
1.45	4840.00
1.50	5590.00
1.55	7400.00
1.60	8600.00
1.65	10100.00
1.70	12500.00
1.75	17000.00
1.80	20200.00
1.85	22900.00
1.90	27800.00
1.95	34585.00
2.00	39620.00
2.05	47965.00
2.10	57730.00
2.15	69085.00
2.20	82210.00
2.25	97253.00
2.30	110426.00
2.35	129909.00
2.40	151902.00
2.45	176695.00
2.50	204688.00
2.55	236281.00
2.60	271874.00
2.65	311874.00

Příloha B – uspořádání vodičů a izolace v drážce



Obrázek C 1. Detailní popis drážky pro výpočet geometrie čel

Příloha C – Výpočet momentové charakteristiky v programu MATLAB

```

function motor;

model='motor';

% parametry nahradniho schematu
R10=0.015;
R21sn=0.00932;
R21s1=0.0274;
X1sn=0.1233;
X1s1=0.1139;
X21sn=0.1118;
X21s1=0.0385;
Xu0=4.1;
Rfe0=132;

% jmenovite parametry stroju
ns=1298;
Mn=3530;
Pn=475000;
Un=481;
fn=43.2;
m1=3;
cosfin=0.89;
eta=0.968;
Sn=Pn/(cosfin*eta);

% presnost pro vykresleni vysledku
deleni=100000;

% vypocet poctu polu a priprava skluzove osy
p=60*fn/ns;
s=[0:1/deleni:1];

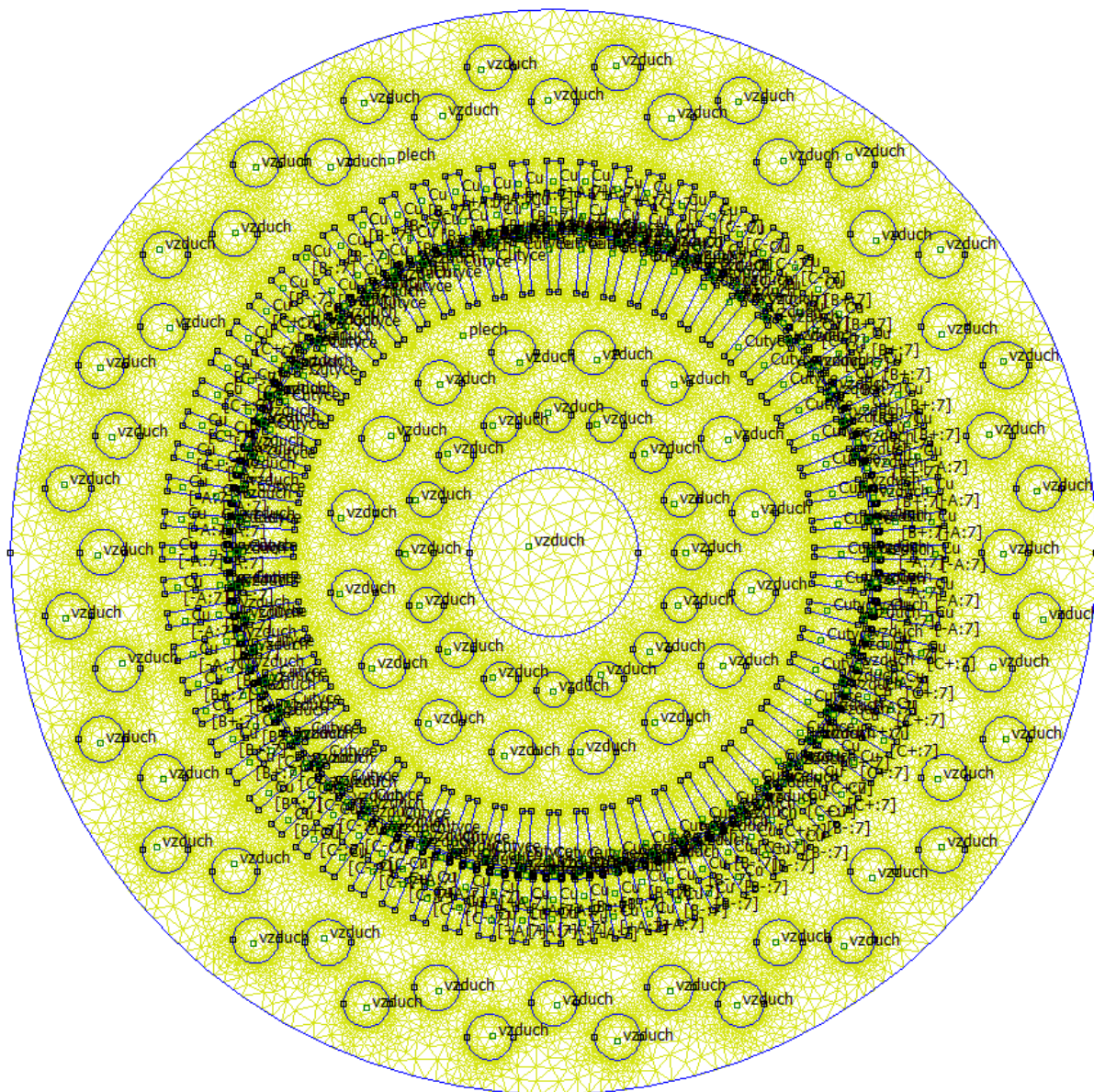
% vypocet zavislosti parametru nahradniho schematu na skluzu
R1=ones(1,deleni+1).*R10;
R21=[R21sn:(R21s1-R21sn)/deleni:R21s1];
X1=[X1sn:(X1s1-X1sn)/deleni:X1s1];
X21=[X21sn:(X21s1-X21sn)/deleni:X21s1];
Xu=ones(1,deleni+1).*Xu0;
Rfe=ones(1,deleni+1).*Rfe0;
Xs=X1+X21;
Uf=ones(1,deleni+1).*Un;

% vypocet momentu a cinneho vykonu
w1=2*pi()*fn;
M=p.*m1.*R21.*Un^2./(w1.*s.*((R1 + R21./s).^2+Xs.^2));

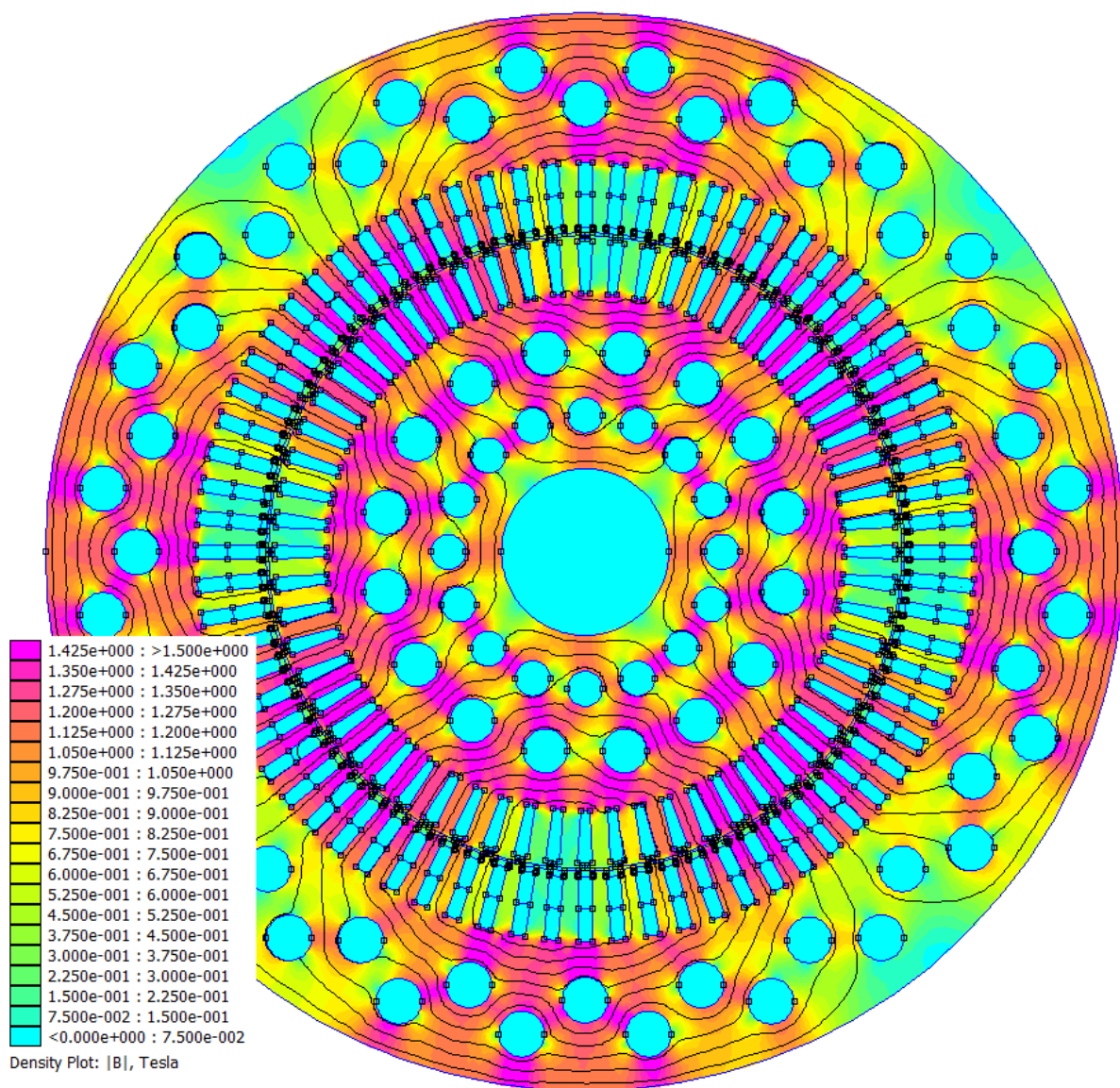
popisek1=['Momentova charakteristika motoru ' model];
soubor1=[model 'charakteristiky'];
figure(1)
plot(s, M);
title(popisek1);
xlabel('s [-]');
ylabel('M')
grid on
legend('M')

```

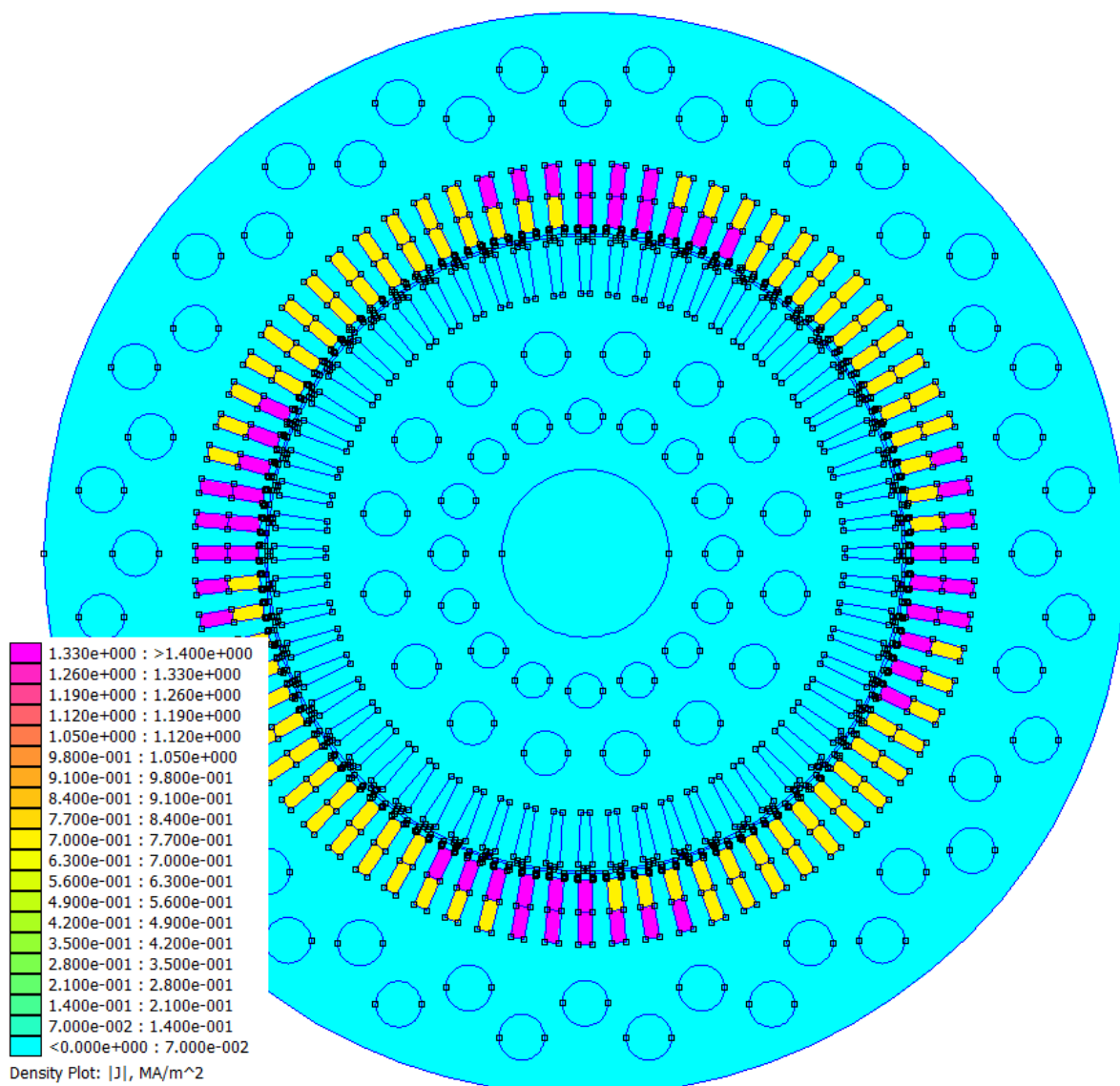
Příloha D – Modelování stroje v programu FEMM



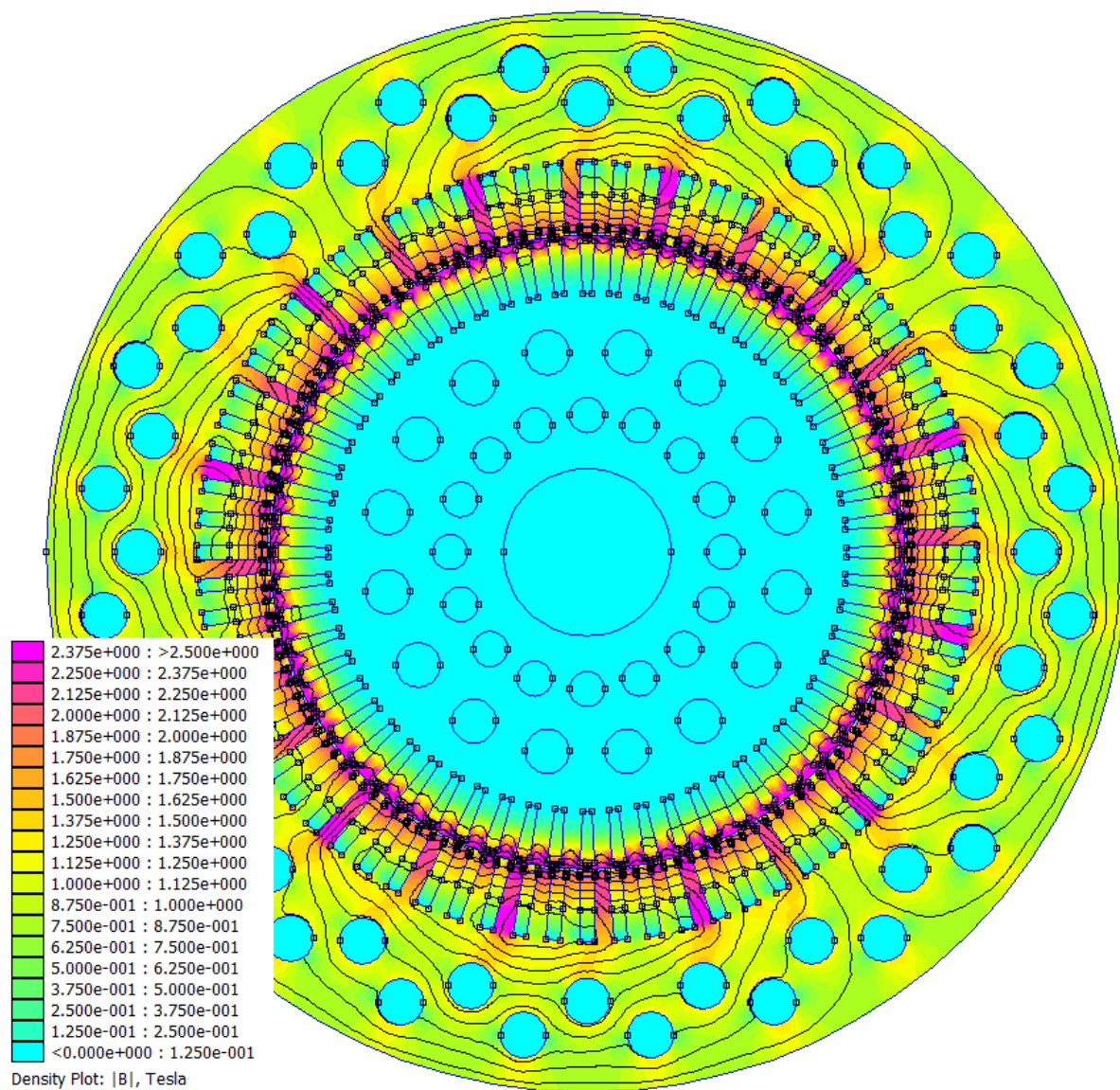
Obrázek D 1. Geometrie s přiřazením materiálů a vytvořenou sítí



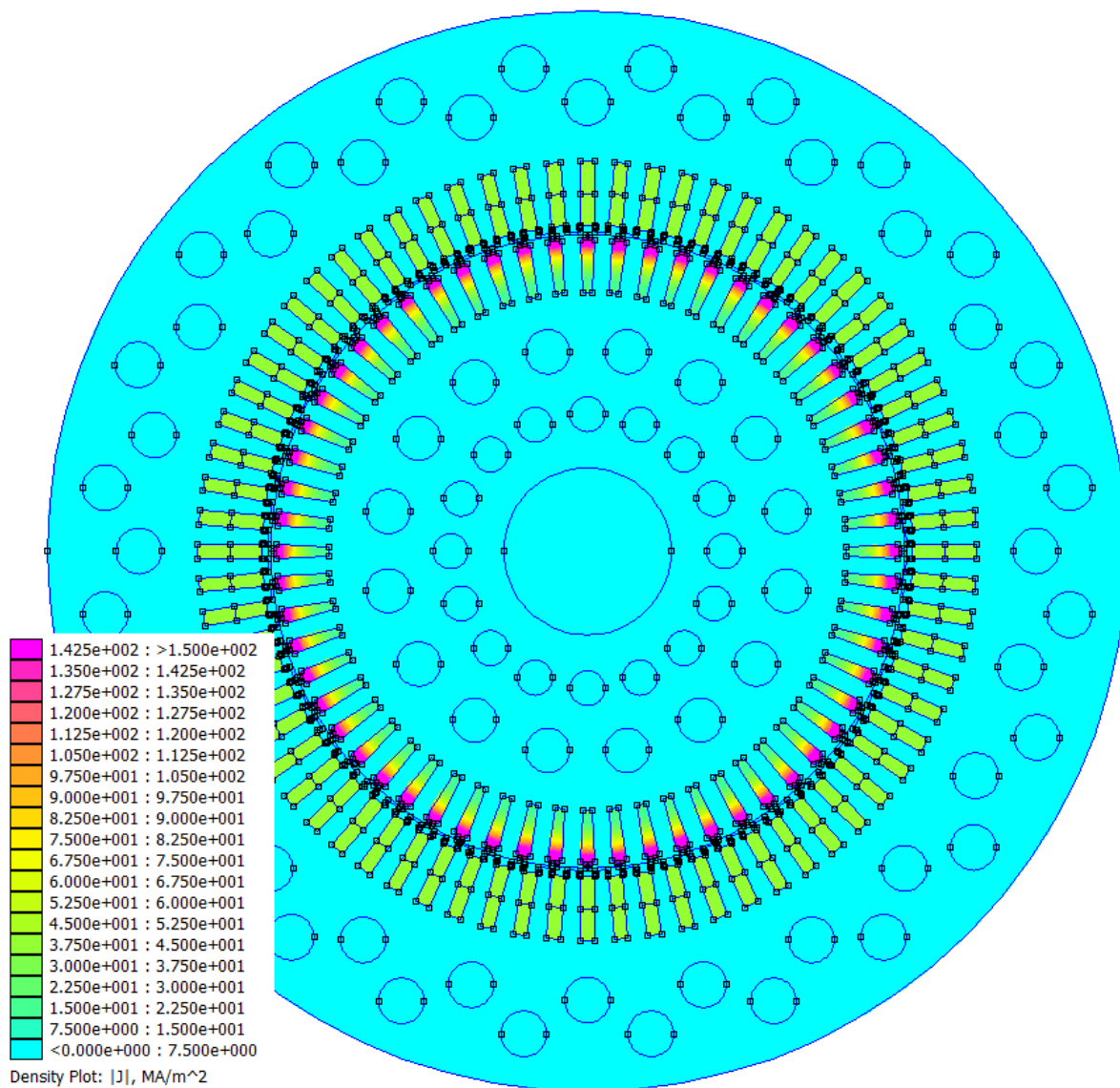
Obrázek D 2. Rozložení magnetické indukce a průběh indukčních čar ve stavu naprázdno



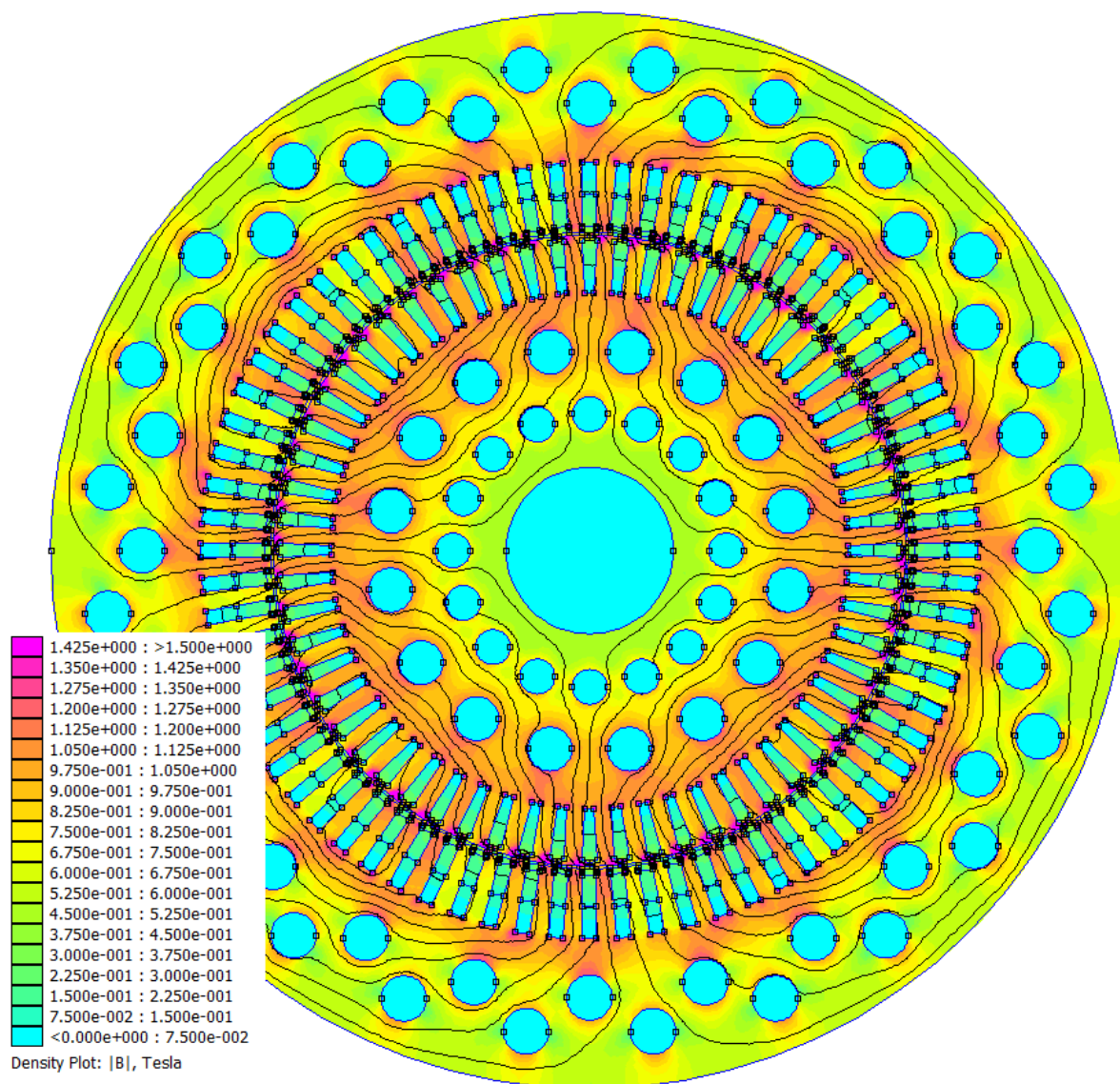
Obrázek D 3. Rozložení proudové hustoty ve stavu naprázdno



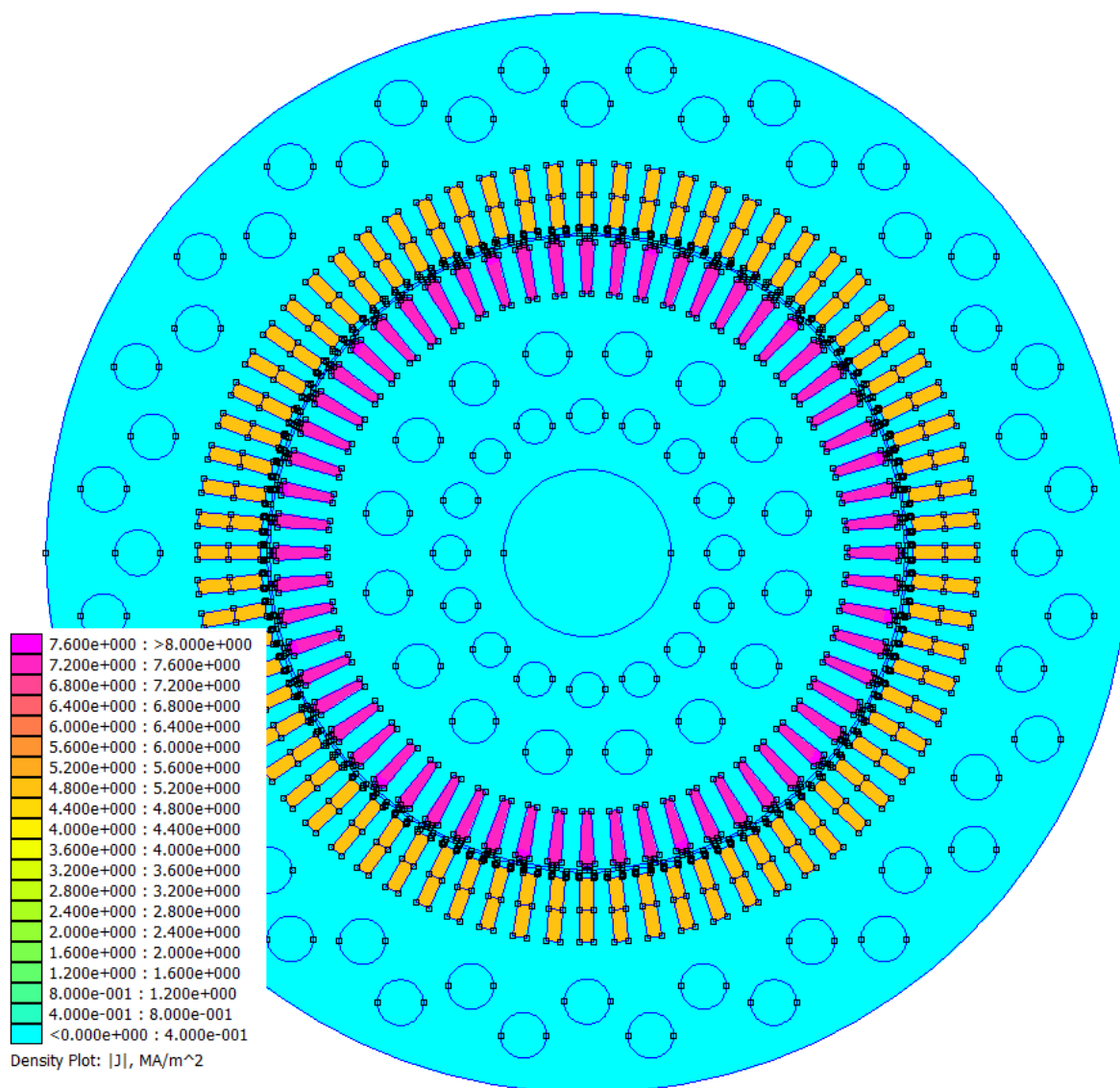
Obrázek D 4. Rozložení magnetické indukce a průběh indukčních čar ve stavu nakrátko



Obrázek D 5. Rozložení proudové hustoty ve stavu nakrátko



Obrázek D 6. Rozložení magnetické indukce a průběh indukčních čar ve jmenovitém stavu



Obrázek D 7. Rozložení proudové hustoty ve jmenovitém stavu