

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Návrh 300kW trakčního asynchronního motoru
s klecí nakrátko**

vedoucí práce: Ing. Karel Hruška, Ph.D.

autor: Ladislav Hrubý

2013

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Ladislav HRUBÝ**
Osobní číslo: **E11N0176P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Dopravní elektroinženýrství a autoelektronika**
Název tématu: **Návrh 300 kW trakčního asynchronního motoru s klecí nakrátko**
Zadávací katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**


Zásady pro vypracování:

1. Provedte elektromagnetický výpočet 300 kW trakčního asynchronního motoru s otevřenou konstrukcí.
2. Provedte orientační výpočet oteplení navrženého stroje.
3. Metodou konečných prvků ověřte platnost elektromagnetického návrhu.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:


1. **KOPYLOV, I. P. a kol.: Stavba elektrických strojů**
2. **CIGÁNEK, L.: Stavba elektrických strojů**
3. **BAŠTA, J.; CHLÁDEK, J.; MAYER, I.: Teorie elektrických strojů**
4. **REECE, A. B. J.: Finite element method in el. power engineering**

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Karel Hruška, Ph.D.**
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky
Konzultant diplomové práce: **Ing. Karel Hruška, Ph.D.**
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky
Datum zadání diplomové práce: **15. října 2012**
Termín odevzdání diplomové práce: **9. května 2013**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan



L.S.


Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

Anotace

Zadáním této diplomové práce je návrh 300kW asynchronního trakčního motoru s kotvou nakrátko. Zadané hodnoty pocházejí již z bakalářské práce a zde bylo pokračováno v dalším návrhu stroje. Součástí zadání je také tepelný výpočet. Správnost elektromagnetického návrhu motoru s kotvou nakrátko byla ověřena metodou konečných prvků programem FEMM.

Klíčová slova

Asynchronní motor, trakční, klec nakrátko, metoda konečných prvků, stator, rotor, vinutí

Abstract

Design of 300 kW Electric Traction Squirrel-Cage Induction Machine. The design of 300kW asynchronous motor with squirrel-cage is the assignment of this diploma thesis. Entered values come from the bachelor thesis and here it is continued in another machine design. The thermal calculation is also the part of the assignment. Correctness of the electromagnetic design of the squirrel-cage motor was verified by finite element method with program FEMM.

Key words

Asynchronous motor, traction, squirrel-cage, finite element method, stator, rotor, winding

Prohlášení

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

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 9. května 2013

Ladislav Hrubý

.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Karlu Hruškovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedené práce a všem, kteří mi pomohli při řešení návrhu stroje. V neposlední řadě bych rád poděkoval rodičům, kteří mě po celou dobu studia podporovali.

Obsah

Seznam symbolů.....	9
1 Úvod	15
2 Výpočet.....	17
2.1 Návrh statoru	17
2.2 Návrh rotoru.....	23
2.3 Výpočet magnetického obvodu.....	27
2.4 Odporů a reaktance	29
2.5 Určení ztrát.....	34
3 Tepelný výpočet	40
3.1 Oteplení statoru	40
3.2 Oteplení rotoru.....	42
4 Ověření platnosti elektromagnetického návrhu	45
4.1 Příprava k simulaci.....	45
4.2 Vlastní simulace.....	48
Závěr	52
Použitá literatura.....	54
Přílohy.....	55
Příloha A	55
Příloha B	56
Příloha C	57
Příloha D	58

Seznam symbolů

2p	[-]	počet pólů
A	[A.m ⁻¹]	lineární hustota proudu
a _{kn}	[m]	výška kruhu nakrátko
B _j	[T]	indukce ve jhu
B _p	[T]	amplituda pulzací pole v zubech
B _z	[T]	indukce v zubu
B _δ	[T]	indukce ve vzduchové mezeře
B ₀	[T]	pulzace pole ve vzduchové mezeře
b _i	[m]	jednostranná tloušťka izolace v drážce
b _{ič}	[m]	jednostranná tloušťka izolace čel
b ₀	[m]	otevření drážky
b _c	[m]	střední šířka cívky
b _d	[m]	šířka drážky
b _{kn}	[m]	šířka kruhu nakrátko
b _v	[m]	šířka vodiče
b _z	[m]	šířka zubu
C	$\left[\frac{VA}{m^3 \cdot ot}\right]$	Essonův činitel
cos φ	[-]	účinník
cos φ ₀	[-]	účinník naprázdno
D	[m]	průměr
D _e	[m]	vnější průměr
D _h	[m]	průměr hřídele
D _{kn}	[m]	střední průměr kruhu nakrátko
d _{vk}	[m]	průměr ventilačních kanálů
F _m	[A]	magnetomotorické napětí na jednu pólovou dvojici
f	[Hz]	kmitočet
H _j	[A.m ⁻¹]	intenzita magnetického pole ve jhu

H_z	[A.m ⁻¹]	intenzita magnetického pole v zubu
H_δ	[A.m ⁻¹]	intenzita magnetického pole přes vzduchovou mezeru
h_d	[m]	hloubka drážky
h_j	[m]	výška jha
h_v	[m]	výška vodiče
I_a	[A]	proud paralelní větví
I_d	[A]	proud drážkou
I_{Fe}	[A]	činná složka proudu nakrátko
I_{kn}	[A]	proud kruhem nakrátko
I_n	[A]	jmenovitý proud
I_v	[A]	proud elementárním vodičem
I_μ	[A]	magnetizační proud
I_o	[A]	proud naprázdno
i_μ	[-][%]	poměrná hodnota magnetizačního proudu
J	[A.mm ⁻²]	proudová hustota
J_{kn}	[A.mm ⁻²]	proudová hustota v kruhu nakrátko
K	[-]	činitel pro výpočet oteplení povrchu
k_B	[-]	činitel tvaru magnetického pole
k_c	[-]	Carterův činitel
k_E	[-]	činitel indukovaného napětí
k_{Fe}	[-]	činitel plnění železa
k_h	[-]	činitel pro výpočet hřídele
k_r	[-]	činitel rozlohy vinutí
k_v	[-]	činitel vinutí
k_y	[-]	činitel kroku vinutí
k_z	[-]	činitel nasycení zubů
k_μ	[-]	činitel nasycení magnetického obvodu
k_p	[-]	koeficient zvýšení ztrát
k_o	[-]	činitel opracování hlav zubů

k_{\sim}	[-]	činitel zvýšení odporu působením povrchového jevu
l	[m]	délka
l_{av}	[m]	střední délka závitů vinutí
l_j	[m]	délka jha
l_{kn}	[m]	délka kruhu nakrátko mezi tyčemi
l_t	[m]	délka tyče
l_v	[m]	vyložení čel
l_{v1}	[m]	délka efektivních vodičů jedné fáze
l_{v2}	[m]	odsazení čela kruhu nakrátko od rotoru
M	[Nm]	moment
M_z	[Nm]	moment zvratu
m	[-]	počet fází
m_j	[kg]	hmotnost jha
m_{vk}	[-]	počet ventilačních kanálů
m_z	[kg]	hmotnost zubů
N_s	[-]	počet závitů ve fázi vinutí
n_s	[ot/min]	synchronní otáčky
$O_{\check{c}}$	[m]	výpočtový obvod povrchu čel
O_d	[m]	výpočtový obvod statorové drážky
P_i	[VA]	vnitřní výkon
P_2	[W]	výkon na hřídeli
p	[-]	počet polpárů
p_i	[-]	proudový převod
$p_{\delta p}$	[W.m ⁻²]	hustota povrchových ztrát
Q	[-]	počet drážek
Q_p	[-]	počet drážek na pól
q	[-]	počet drážek na pól a fázi
R	[Ω]	odpor
R'_2	[Ω]	odpor rotoru přepočtený na stator
R_{kn}	[Ω]	odpor kruhu nakrátko

R_t	[Ω]	odpor tyče
r'_2	[-]	poměrná hodnota R'_2
S_c	[m ²]	celkový průřez vodičů v drážce
S_{ef}	[m ²]	průřez efektivního vodiče
S_{ch}	[m ²]	ochlazovací povrch
S_j	[m ²]	plocha jha
S_k	[m ²]	průřez ventilačních kanálů
S_{kn}	[m ²]	průřez kruhu nakrátko
S_t	[m ²]	průřez tyče
S_z	[m ²]	plocha zubu
s_z	[-] [%]	skluz zvratu
t_d	[m]	drážková rozteč
t_p	[m]	pólová rozteč
U_{mj}	[A]	magnetomotorické napětí jha
U_{mz}	[A]	magnetomotorické napětí zubu
$U_{m\delta}$	[A]	magnetomotorické napětí vzduchové mezery
V_d	[-]	počet efektivních vodičů v drážce
V_{dp}	[-]	celkový počet vodičů v drážce
X_μ	[Ω]	magnetizační reaktance
$X_{1\sigma}$	[Ω]	rozptylová reaktance statoru
$X_{2\sigma}$	[Ω]	rozptylová reaktance rotoru
$X'_{2\sigma}$	[Ω]	rozptylová reaktance rotoru přepočtená na stator
$x'_{2\sigma}$	[-]	poměrná hodnota $X'_{2\sigma}$
y_1	[-]	krok cívky v počtu cívkových stran
y_{1d}	[-]	přední cívkový krok v počtu drážek
α	[W.m ⁻² K ⁻¹]	součinitel přestupu tepla
α_δ	[-]	činitel pólového krytí
β	[-]	činitel zkrácení kroku
β_y	[-]	činitel natočení drážek
Δ	[-]	činitel přepočtu proudu v kruhu na proud v tyči

ΔP	[W]	Celkové ztráty
ΔP_{Fe}	[W]	celkové ztráty v železe
ΔP_{Feh}	[W]	hlavní ztráty v železe
ΔP_{Fej}	[W]	ztráty v železe jha
ΔP_{Fep}	[W]	dodatečné ztráty
ΔP_j	[W]	Jouleovy ztráty
ΔP_{j0}	[W]	ztráty ve statoru při chodu naprázdno
ΔP_m	[W]	mechanické ztráty
ΔP_p	[W]	pulzační ztráty v zubech
$\Delta P_{\delta p}$	[W]	povrchové ztráty
$\Delta P'_{jd}$	[W]	Jouleovy ztráty v drážce
$\Delta P'_{jč}$	[W]	Jouleovy ztráty v čele
$\Delta p_{1,5}$	[W.kg ⁻¹]	ztráty v železe při indukci 1,5 T
$\Delta \vartheta_{ič}$	[K]	teplotní spád v izolaci čel
$\Delta \vartheta_{id}$	[K]	teplotní spád v izolaci drážky
$\Delta \vartheta_{pov}$	[K]	oteplení povrchu
$\Delta \vartheta_{povč}$	[K]	oteplení povrchu izolace čel
$\Delta \vartheta_v$	[K]	oteplení vzduchu uvnitř stroje
$\Delta \vartheta$	[K]	střední oteplení vinutí nad teplotu okolního vzduchu
$\Delta \vartheta'$	[K]	střední oteplení vinutí nad teplotu ve stroji
η	[-]	účinnost
$\lambda_{č}$	[-]	činitel magnetické vodivosti rozptylu čel
λ_d	[-]	činitel magnetické vodivosti drážky
λ_{ekv}	[W.m ⁻¹ K ⁻¹]	střední ekvivalentní tepelná vodivost izolace
λ_{dif}	[-]	činitel magnetické vodivosti diferenčního rozptylu
ξ	[-]	činitel pro výpočet diferenčního rozptylu
ρ	[Ω.m]	rezistivita
ρ_{Fe}	[kg.m ⁻³]	hustota železa
$\Sigma \Delta P$	[W]	součet ztrát při jmenovitém chodu
$\Sigma \Delta P'_v$	[W]	ztráty odváděné do vzduchu ve stroji

ϕ [Wb] magnetický tok
 ω_s [rad/s] synchronní úhlová rychlost

Indexy:

1 stator
2 rotor

1 Úvod

Tato diplomová práce volně navazuje na bakalářskou práci s názvem Asynchronní stroje pro trakční účely [2], v jejímž závěru byla nastíněna základní rozvaha pro elektromagnetický návrh stroje. Zadaný motor má následující parametry:

Výkon na hřídeli:	$P_2 = 300 \text{ kW}$
Napájecí napětí:	$U_1 = 600 \text{ V}$ ($U_{nf} = 346,41 \text{ V}$)
Synchronní otáčky:	$n_s = 1600 \text{ ot/min}$
Napájecí frekvence:	$f_1 = 80 \text{ Hz}$
Počet fází:	$m_1 = 3$

Z těchto údajů vyšlo najevo, že zadaný stroj bude šestipólový:

$$p = \frac{60 \cdot f}{n_s} = \frac{60 \cdot 80}{1600} = 3 \quad (1.1)$$

Na počátku návrhu je třeba určit hlavní rozměry stroje. Po konzultaci s vedoucím práce bylo jako výchozí rozměr zvoleno vrtání statoru:

$$D_1 = 350 \text{ mm}$$

Po zvolení tohoto údaje byla určena pólová rozteč motoru:

$$t_{p1} = \frac{\pi D_1}{2p} = \frac{\pi \cdot 0,35}{2 \cdot 3} = 0,1833 \text{ m} \quad (1.2)$$

Následujícím krokem byl vypočten vnitřní výpočtový výkon stroje. K jeho určení bylo potřeba předběžně zvolit či jinak určit hodnoty několika veličin či koeficientů, např. účinnosti, účinníku, činitele indukovaného napětí a podobně. Tato volba byla provedena na základě konzultace a použití literatury [1], případně [3]. Mezi tyto na počátku základního návrhu volené údaje patří následující:

Účinník:	$\cos\varphi = 0,9$
Účinnost:	$\eta = 0,94$
Indukce přes vzduchovou mezeru:	$B_\delta = 0,9 \text{ T}$
Lineární hustota proudu:	$A = 55000 \text{ A/m}$
Činitel:	$k_E = 0,97$
Činitel:	$k_B = 1,11$
Činitel:	$k_{V1} = 0,92$
Činitel:	$\alpha_\delta = 0,64$

Nyní již bylo možno přikročit k výpočtu vnitřního výkonu stroje:

$$P_i = P_2 \frac{k_E}{\eta \cdot \cos\varphi} = 300000 \frac{0,97}{0,94 \cdot 0,9} = 343971,63 \text{ VA.} \quad (1.3)$$

Z výkonové rovnice elektromotoru byla předběžně určena délka stroje:

$$P_i = C \cdot D^2 \cdot l_i \cdot n_s \text{ [VA]} \quad (1.4)$$

K dosažení do výkonové rovnice elektromotoru ale bylo zapotřebí vypočítat tzv. Essonův činitel, jenž se počítá dle následujícího vztahu:

$$C = \frac{\pi^2}{60} \alpha_\delta \cdot A \cdot B_\delta \cdot k_B \cdot k_{v1} = \frac{\pi^2}{60} 0,64 \cdot 55000 \cdot 0,9 \cdot 1,11 \cdot 0,92 = 5321,63 \frac{\text{VA}}{\text{m}^3 \cdot \text{ot}} \quad (1.5)$$

Délka stroje byla určena z rovnice (1.4) po její úpravě a vyšla následující hodnota:

$$l_i = \frac{P_i}{C \cdot D^2 \cdot n_s} = \frac{343971,6312}{5321,628 \cdot 0,35^2 \cdot 1600} \doteq 0,33 \text{ m} \quad (1.6)$$

V tomto místě byl výpočet asynchronního motoru v bakalářské práci [2] ukončen, neb tento nebyl předmětem jejího hlavního zájmu. Další pokračování výpočtu je obsahem této diplomové práce. V práci bude také proveden orientační tepelný výpočet stroje a v poslední kapitole bude provedena kontrola správnosti provedení elektromagnetického výpočtu pomocí metody konečných prvků.

2 Výpočet

V této kapitole bude předvedeno, jak bylo postupováno při návrhu trakčního asynchronního motoru s kotvou nakrátko. Jako základ, ze kterého bylo vycházeno, posloužila předběžná rozvaha z bakalářské práce [2]. Hodnoty, které z ní vzešly, posloužily jako výchozí a dalším výpočtem byly dále upřesňovány a rozvíjeny.

2.1 Návrh statoru

Výpočet statoru stroje byl zahájen určením počtu drážek. Po konzultaci s vedoucím práce byl zvolen následující počet:

$$Q_1 = 72$$

Poté mohlo být určeno několik dalších hodnot, jako je počet drážek na pól:

$$Q_p = \frac{Q_1}{2p} = \frac{72}{2 \cdot 3} = 12 \quad (2.1)$$

Počet drážek na pól a fázi je pak:

$$q = \frac{Q_1}{2p \cdot m} = \frac{72}{2 \cdot 3 \cdot 3} = 4 \quad (2.2)$$

Drážková rozteč statoru:

$$t_{d1} = \frac{\pi \cdot D_1}{2p \cdot m \cdot q} = \frac{\pi \cdot 0,35}{2 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 4} = 0,0153 \text{ m} \quad (2.3)$$

Plný cívkový krok y_{1d} by byl roven počtu drážek na pól (2.1). S ohledem na potlačení vlivu nejvíce výrazných harmonických, což jsou 5. a 7., a zároveň nepřilíšnému snížení napětí 1. harmonické se u dvouvrstvých vinutí asynchronních motorů zkracuje krok přibližně na hodnotu $\beta = 0,83$. Tomuto požadavku nejlépe odpovídá takovéto zkrácení cívkového kroku:

$$y_{1d} = 10$$

Při tomto cívkovém kroku vychází činitel zkrácení kroku β následovně:

$$\beta = \frac{y_{1d}}{Q_p} = \frac{10}{12} = 0,8\bar{3} \quad (2.4)$$

Výpočet činitele vinutí sestává ze součinu činitele kroku vinutí a rozlohy vinutí. Činitelé kroku a rozlohy vinutí se počítají dle následujících vztahů:

$$k_y = \sin\left(\frac{y_{1d}}{Q_p} \cdot 90^\circ\right) = \sin\left(\frac{10}{12} \cdot 90^\circ\right) = 0,966 \quad (2.5)$$

$$k_r = \frac{\sin 30^\circ}{q \cdot \sin\left(\frac{30^\circ}{q}\right)} = \frac{\sin 30^\circ}{4 \cdot \sin\left(\frac{30^\circ}{4}\right)} = 0,958 \quad (2.6)$$

Z toho činitel vinutí pro 1. harmonickou:

$$k_{v1} = k_y \cdot k_r = 0,965925826 \cdot 0,957662197 = 0,925 \quad (2.7)$$

Předběžně byl na počátku zvolen činitel vinutí 0,92.

Další výpočet se týkal jmenovitého proudu asynchronního motoru, který vyšel následovně:

$$I_n = \frac{P_2}{\sqrt{3}U_1\eta\cos\phi} = \frac{300000}{\sqrt{3} \cdot 600 \cdot 0,94 \cdot 0,9} = 341,22 \text{ A} \quad (2.8)$$

Vinutí je dvojrvtvé, tedy $2u = 2$, takže počet cívkových stran ve vrstvě vinutí je $u = 1$. Počet paralelních větví vinutí byl zvolen $a = 3$, takže proud paralelní větví je následující:

$$I_a = \frac{I_n}{a} = \frac{341,2235634}{3} = 113,741 \text{ A} \quad (2.9)$$

Následovalo určení prozatímního počtu efektivních vodičů v drážce, který se hned poté násobil počtem paralelních větví:

$$V'_d = \frac{\pi D_1 A}{I_n Q_1} = \frac{\pi \cdot 0,35 \cdot 55000}{341,2235634 \cdot 72} = 2,462 \quad (2.10)$$

$$V_d = V'_d a = 2,461552462 \cdot 3 = 7,384 \quad (2.11)$$

Tento výsledek byl zaokrouhlen na celé sudé číslo, což dvojrvtvé vinutí vyžaduje, tedy předběžný počet efektivních vodičů v jedné drážce je $V_d = 8$. Z toho vychází počet závitů ve fázi vinutí:

$$N_{s1} = \frac{V_d Q_1}{2 a m_1} = \frac{8 \cdot 72}{2 \cdot 3 \cdot 3} = 32 \quad (2.12)$$

Budeme-li uvažovat i počet paralelních vodičů, který byl určen na hodnotu $N_p = 2$ z důvodů uvedených dále při určování vodiče v drážce, vychází celkový počet elementárních vodičů v jedné drážce:

$$V_{dp} = N_p V_d = 2 \cdot 8 = 16 \quad (2.13)$$

Proud elementárním vodičem je následující:

$$I_v = \frac{I_a}{N_p} = \frac{113,7411878}{2} = 56,871 \text{ A} \quad (2.14)$$

Z dosud určených veličin již bylo možno přistoupit k určení magnetického toku dle následujícího vztahu:

$$\Phi = \frac{U_n f k_E}{4 N_{s1} f_1 k_B k_{v1}} = \frac{346,41016 \cdot 0,97}{4 \cdot 32 \cdot 80 \cdot 1,11 \cdot 0,925030649} = 0,032 \text{ Wb} \quad (2.15)$$

Jako další přišla na řadu průběžná kontrola, která ukázala, zdali takto navržené a vypočítané hodnoty nebude třeba upravit a přepočítat. Nejprve byla přepočítána indukce ve vzduchové mezeře dle následujícího vztahu:

$$B_{\delta k} = \frac{\Phi}{\alpha_{\delta} t_{p1} l_1} = \frac{0,031958273}{0,64 \cdot 0,183259571 \cdot 0,33} = 0,826 \text{ T} \quad (2.16)$$

Poté byla určena nově upravená proudová hustota:

$$A_{upr} = \frac{2m_1 N_{s1} I_n}{\pi D_1} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 32 \cdot 341,2235634}{\pi \cdot 0,35} = 59582,99 \text{ A/m} \quad (2.17)$$

Essonův činitel je po této úpravě následující (dle vztahu 1.5):

$$C = \frac{\pi^2}{60} \alpha_{\delta} \cdot A_{upr} \cdot B_{\delta} \cdot k_B \cdot k_{v1} = \frac{\pi^2}{60} 0,64 \cdot 59582,99444 \cdot 0,9 \cdot 1,11 \cdot 0,9250306429 = \\ = 5796,59 \frac{\text{VA}}{\text{m}^3 \cdot \text{ot}}$$

Z výkonové rovnice a nově upravených hodnot byla dle vztahu (1.6) upřesněna délka stroje:

$$l_1 = \frac{P_i}{D_1^2 n_s C} = \frac{343971,6312}{0,35^2 \cdot 1600 \cdot 5796,587623} = 0,3028 \text{ m}$$

Tento údaj byl zaokrouhlen na celé milimetry, takže efektivní délka stroje je takováto:

$$l_1 = 0,303 \text{ m}$$

Tato efektivní hodnota délky stroje je zároveň délkou skutečnou, protože ve stroji nejsou uvažovány radiální větrací kanály, které délku zvětšují.

Indukce ve vzduchové mezeře po úpravách některých veličin vychází dle vztahu (2.16) takto:

$$B_{\delta} = \frac{\Phi}{\alpha_{\delta} t_{p1} l_1} = \frac{0,031958273}{0,64 \cdot 0,183259571 \cdot 0,303} = 0,899 \text{ T}$$

Je vidět, že hodnota indukce přes vzduchovou mezeru je již téměř totožná s předem volenou, což bylo 0,9 T. Po této kontrole zůstaly stejné i hodnoty počtu vodičů v drážce či počet závitů v sérii. Nově získané hodnoty jsou používány v dalších výpočtech.

Jako další část výpočtu statoru stroje přišla na řadu drážka a vodič v ní. Výpočet byl započat zvolením součinu AJ, který byl zvolený tak, aby hodnota proudové hustoty nepřekročila hodnotu $J = 7 \text{ A/mm}^2$. Proto volba proběhla následovně:

$$AJ = 4 \cdot 10^{11}$$

Z toho vychází hodnota proudové hustoty takto:

$$J = \frac{AJ}{A} = \frac{4 \cdot 10^{11}}{59582,99444} = 6,71 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2 = 6,713 \text{ A/mm}^2 \quad (2.18)$$

Z takto volených hodnot mohl být již spočten průřez vodičů v drážce. Průřez jednoho efektivního vodiče byl určen dle následujícího vztahu:

$$S_{ef} = \frac{I_a}{J} = \frac{113,7411878}{6,713324897} = 16,94 \text{ mm}^2 \quad (2.19)$$

Průřez všech vodičů v drážce:

$$S_c = V_d S_{ef} = 8.16,9426014 = 135,54 \text{ mm}^2 \quad (2.20)$$

K dalšímu výpočtu musely být zvoleny další veličiny nutné k pokračování, což byly dovolené hodnoty indukce a čísel plnění železa:

$$\text{Indukce ve jhu statoru:} \quad B_{j1} = 1,5 \text{ T}$$

$$\text{Indukce v zubu statoru:} \quad B_{z1} = 2 \text{ T}$$

$$\text{Čísel plnění železa:} \quad k_{Fe} = 0,97$$

Dále byl zvolen tvar drážky, který je v [1] označen jako M. Jelikož tato drážka má rovnoběžné strany, je zřejmé, že zub bude mít lichoběžníkový tvar, čili při povrchu statoru bude mít nejmenší šířku. Tato šířka se vypočte takto:

$$b_{z1min} = \frac{t_{d1} B_{z1}}{B_{z1} k_{Fe}} = \frac{0,015271631 \cdot 0,899278127}{2 \cdot 0,97} = 0,0071 \text{ m} \quad (2.21)$$

Tuto hodnotu jsem zaokrouhlil nahoru na:

$$b_{z1min} = 0,0072 \text{ m} = 7,2 \text{ mm}$$

Od této hodnoty se bezprostředně odvíjí šířka drážky:

$$b_{d1} = t_{d1} - b_{z1min} = 0,015271631 - 0,0072 = 0,0081 \text{ m} \quad (2.22)$$

Dále byla určena výška jha statoru:

$$h_{j1} = \frac{\Phi}{2 B_{j1} l_1 k_{Fe}} = \frac{0,031958273}{2 \cdot 1,5 \cdot 0,303 \cdot 0,97} = 0,0362 \text{ m} \quad (2.23)$$

Zde je ale nutno říci, že takto vypočtená výška statorového jha není konečná, neb ještě neuvažuje zvětšení kvůli axiálním ventilačním kanálům, které jhem procházejí. Tato další výška uvažující kanály má hodnotu $h_{j1} = 0,0398295 \text{ m}$, po zaokrouhlení na celé milimetry $0,04 \text{ m}$. Zvětšení výšky jha po zauvažování ventilačních kanálů je odvozeno od plochy kanálů. O tuto plochu bylo jho zvětšeno, takže plocha jha původní i nová je shodná, jen v případě s kanály je tedy jho o něco vyšší.

Dále následovalo určení velikosti vodičů v drážce. Tomu předcházelo definování izolací, vyložení drážky a podobně. Elementární vodiče jsou izolovány kaptonem, dále je použita cívková izolace, vyložení drážky a nebyla opomenuta ani technologická vůle. Zde je uveden přehled oboustranného přírůstku:

$$\text{kapton:} \quad 0,18 \text{ mm}$$

$$\text{cívková izolace:} \quad 0,78 \text{ mm}$$

$$\text{vyložení drážky:} \quad 0,8 \text{ mm}$$

$$\text{technologická vůle:} \quad 1 \text{ mm}$$

Součet těchto hodnot je označen b_i a vychází takto: $b_i = 2,76 \text{ mm}$

Při zauvažování všech těchto a dříve spočtených rozměrů vychází šířka vodiče následovně:

$$b_v = b_d - b_i = 0,008071631 - 0,00276 = 0,005311630955 \text{ m} = 5,31 \text{ mm} \quad (2.24)$$

Hodnota byla zaokrouhlena a zvolena takto:

$$b_v = 5,3 \text{ mm}$$

Odvozením od průřezu efektivního vodiče by vyšla výška vodiče takto:

$$h_{vef} = \frac{S}{b_v} = \frac{16,9426014}{5,3} = 3,2 \text{ mm} \quad (2.25)$$

Vodič s takovými rozměry je ale nevhodný, protože při této výšce se již nepříznivě projevuje povrchový jev, tzv. skin-efekt. Proto bylo zavedeno rozdělení efektivního vodiče na dva paralelní, jak již bylo výše zmíněno a poprvé uvedeno ve vztahu (2.13). Pak výška vodiče vychází poloviční:

$$h_v = \frac{h_{vef}}{N_p} = \frac{3,196717245}{2} = 1,6 \text{ mm} \quad (2.26)$$

Tento výsledek byl zaokrouhlen na hodnotu $h_v = 1,7 \text{ mm}$. Dále byl spočítán skutečný průřez vodičů. Nejprve elementárního:

$$S_1 = b_v h_v = 5,3 \cdot 1,7 = 9,01 \text{ mm}^2 \quad (2.27)$$

Dále efektivního:

$$S_{ef} = S_1 N_p = 9,01 \cdot 2 = 18,02 \text{ mm}^2 \quad (2.28)$$

A nakonec celkový:

$$S_c = S_{ef} V_d = 18,02 \cdot 8 = 144,16 \text{ mm}^2 \quad (2.29)$$

Oproti vztahům (2.19) a (2.20) vycházejí hodnoty průřezů o něco větší, což je úmyslně z důvodů nepřekročení proudové hustoty při respektování toho, že se nepovede vyrobit tyč ve tvaru dokonalého obdélníku a v rozích bude malé zaoblení, které o něco zmenší skutečný průřez tyče. Při známých rozměrech vodičů je další na řadě výpočet hloubky drážky. I zde je třeba uvažovat velikosti izolací, mezivložek, klínu a podobně. Taktéž je zde uveden přehled položek již sečtených při násobném použití na výšku drážky:

kapton:	2,88 mm
cívková izolace:	1,56 mm
vyložení drážky:	0,4 mm
mezivložky:	3 mm
klín:	2 mm
vrchol drážky:	1 mm

Součet těchto hodnot je takový: $v_i = 10,84 \text{ mm}$

Celková výška drážky byla určena takto:

$$h_{d1} = h_v V_{dp} + v_i = 1,7.16 + 10,84 = 38,04 \text{ mm} \quad (2.30)$$

Při znalosti hloubky drážky statoru je již možné určit šířku zubu v jeho širším konci:

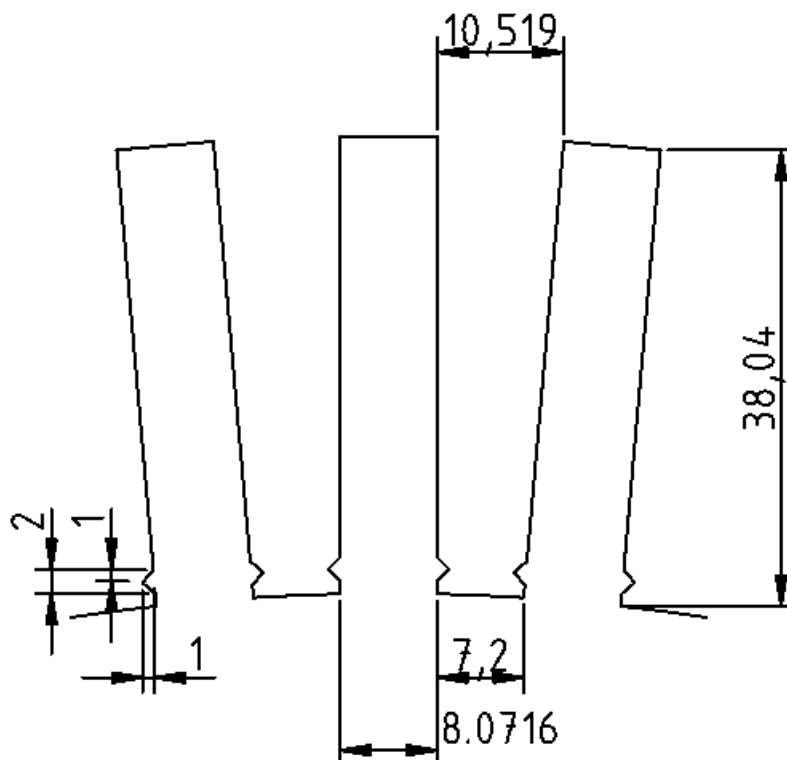
$$b_{z1max} = t_{d1} \left(1 + \frac{2h_{d1}}{D_1} \right) - b_d = 0,015271631 \left(1 + \frac{2 \cdot 0,03804}{0,35} \right) - 0,008071631 = 0,0105 \text{ m} \quad (2.31)$$

Z důvodu pozdějšího využití v dalších výpočtech byly určeny i šířky zubu v 1/3 a 1/2 výšky:

$$b_{z1/3} = t_{d1} \left(1 + \frac{2h_{d1}}{3D_1} \right) - b_d = 0,015271631 \left(1 + \frac{2 \cdot 0,03804}{3 \cdot 0,35} \right) - 0,008071631 = 0,0083 \text{ m} \quad (2.32)$$

$$b_{z1/2} = t_{d1} \left(1 + \frac{2h_{d1}}{2D_1} \right) - b_d = 0,015271631 \left(1 + \frac{2 \cdot 0,03804}{2 \cdot 0,35} \right) - 0,008071631 = 0,0089 \text{ m} \quad (2.33)$$

Pro lepší přehled o velikostech statorové drážky a zubu je zde přiložen výkres s hodnotami v milimetrech:



Obrázek 1 – statorové drážky a zuby

Nakonec již bylo možné určit i vnější průměr stroje:

$$D_e = D_1 + 2h_{j1} + 2h_{d1} = 0,035 + 2,0,036244965 + 2,0,03804 = 0,4986 \text{ m} \quad (2.34)$$

Tato hodnota vznikla jako první, ještě bez respektování použití chladicích kanálů ve jhu. Při užití hodnoty výšky jha s již uvažovanými kanály bude výsledný vnější průměr elektromotoru následující:

$$D_e = D_1 + 2h_{j1} + 2h_{d1} = 0,035 + 2,0,04 + 2,0,03804 = 0,50608 \text{ m}$$

Při zaokrouhlení na celé milimetry je tedy vnější průměr stroje $D_e = 506 \text{ mm}$. Postup pro zvětšení jha statoru (a tedy i vnějšího průměru) je popsán výše.

Tímto byly získány základní údaje týkající se statoru. Následovalo určení vzduchové mezery, která byla po konzultaci zvolena takto:

$$\delta = 0,0007 \text{ m} = 0,7 \text{ mm}$$

2.2 Návrh rotoru

První, co bylo při návrhu rotoru spočteno, byl jeho průměr. Ten vyšel takto:

$$D_2 = D_1 - 2\delta = 0,35 - 2,0,0007 = 0,3486 \text{ m} \quad (2.35)$$

Délka svazku rotoru byla zvolena stejná jako statoru:

$$l_2 = l_1 = 0,303 \text{ m}$$

Délka tyče byla ale zvolena o 10 milimetrů delší, tedy na každém konci o 5. Důvodem bylo lepší ochlazování.

$$l_t = 0,313 \text{ m}$$

Z technologického hlediska by mohlo být prodloužení ještě větší, např. 10 mm na každé straně. To z důvodu, že při indukčním pájení, které se užívá pro připevnění kruhu nakrátko na rotorové tyče, je vyvíjeno velké množství tepla, které prohřívá rotorový svazek a tím se tepelně namáhá, což může mít negativní vliv na izolaci plechů.

V dalším kroku byl určován počet drážek rotoru. Ty nelze volit libovolně, neb na vzájemném poměru statorových a rotorových drážek závisí např. mechanické vlastnosti elektromotoru či ovlivňují hlučnost stroje. Ve vzduchové mezeře se vyskytuje nejen základní, ale i mnoho vyšších harmonických, které pak indukují napětí do rotorových tyčí a tedy i v rotoru jsou obsaženy tyto vyšší harmonické. Vzájemným působením polí pak vznikají momenty, které v případě nevhodně zvoleného poměru počtu statorových a rotorových drážek nepříznivě ovlivňují výsledný moment stroje, neb ve výsledné momentové charakteristice tvoří sedla. Hluk a vibrace ovlivňují tzv. zubové harmonické, které vznikají při určitém poměru drážek. Dlouhodobým výzkumem, vývojem a empirickými zkušenostmi z velkého množství již realizovaných strojů byly stanoveny doporučené poměry statorových a

rotorových drážek právě s ohledem na minimalizaci nežádoucích jevů. Z těchto doporučených poměrů bylo při volbě čerpáno i v této práci a zvoleno bylo následovně:

$$Q_2 = 62$$

Pro výpočet počtu fází rotoru byl určen koeficient:

$$\kappa = D(Q_2, p) = D(62, 3) = 1 \quad (2.36)$$

Počet fází rotoru vyšel roven počtu drážek:

$$m_2 = \frac{Q_2}{\kappa} = \frac{62}{1} = 62 \quad (2.37)$$

Dále byl vypočítán proudový převod stroje:

$$p_i = \frac{2m_1 N_{s1} k_{v1}}{m_2} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 32 \cdot 0,925030649}{62} = 2,865 \quad (2.38)$$

Pro výpočet proudu v rotorové tyči byl nejprve určen činitel uvažující vliv magnetizačního proudu a odporů vinutí $k_i = 0,93$:

$$I_t = k_i p_i I_n = 0,93 \cdot 2,864611042 \cdot 341,2235634 = 909,05 \text{ A} \quad (2.39)$$

K výpočtu proudu v kruzích nakrátko byla nejprve určena hodnota činitele přepočtu proudů v kruhu na proud v tyči:

$$\Delta = 2 \sin \frac{\pi p}{Q_2} = 2 \sin \frac{\pi \cdot 3}{62} = 0,303 \quad (2.40)$$

Poté již bylo možno vypočítat proud kruhem nakrátko:

$$I_{kn} = \frac{I_t}{\Delta} = \frac{909,0496922}{0,302855555} = 3001,595 \text{ A} \quad (2.41)$$

Proudová hustota v tyčích rotoru byla zvolena následovně:

$$J_2 = 6 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2 = 6 \text{ A/mm}^2$$

Hustota proudu v kruzích nakrátko byla zvolena nižší než v tyčích a to z toho důvodu, že kruh se ochlazuje lépe než tyče a proto se tímto řešením zajistí určité odvedení tepla z tyčí do kruhu. Toto zmenšení bylo zvoleno takto:

$$J_{kn} = 0,8 J_t = 0,8 \cdot 6 = 4,8 \text{ A/mm}^2$$

Následovalo vypočtení průřezů tyčí a kruhů, přičemž se vycházelo z hodnot proudů a proudových hustot.

$$S_t = \frac{I_t}{J_2} = \frac{909,0496922}{6} = 151,508 \text{ mm}^2 \quad (2.42)$$

$$S_{kn} = \frac{I_{kn}}{J_{kn}} = \frac{3001,594909}{4,8} = 625,332 \text{ mm}^2 \quad (2.43)$$

Další kroky vedly k určení rozměrů rotorové drážky. Drážka byla zvolena lichoběžníková, s širší základnou při povrchu rotoru a užší směrem doprostřed tak, aby rotorové zuby měly konstantní šířku. Drážka není z technologických důvodů zcela uzavřená. Pro začátek bylo nutné určit drážkovou rozteč rotoru:

$$t_{d2} = \frac{\pi D_2}{Q_2} = \frac{\pi 0,3486}{62} = 0,0177 \text{ m} \quad (2.44)$$

Maximální povolená indukce v zubu rotoru byla zvolena takto:

$$B_{z2} = 1,8 \text{ T}$$

Poté již bylo možno vypočítat šířku zubu:

$$b_{z2} = \frac{B_{\delta} t_{d2}}{B_{z2} k_{Fe}} = \frac{0,899278127 \cdot 0,017663858}{1,8 \cdot 0,97} = 0,0091 \text{ m} \quad (2.45)$$

Tato hodnota byla zaokrouhlena směrem nahoru takto:

$$b_{z2} = 0,0095 \text{ m} = 9,5 \text{ mm}$$

Další výpočty se týkaly definování rozměrů drážky tyče. Nejprve bylo zvoleno její otevření b_0 a vzdálenost od povrchu h_p .

$$b_0 = 0,002 \text{ m}$$

$$h_p = 0,0025 \text{ m}$$

Dále bylo možné vypočítat větší šířku drážky, tedy tu při povrchu rotoru:

$$b_{d2max} = \frac{\pi(D_2 - 2h_p)}{Q_2} - b_{z2} = \frac{\pi(0,3486 - 2 \cdot 0,0025)}{62} - 0,0095 = 0,0079 \text{ m} \quad (2.46)$$

Hloubka drážky byla zvolena s ohledem na průřez tyče a rovnoběžnost stran zubů:

$$h_{d2} = 0,023 \text{ m}$$

Z těchto údajů byla určena užší šířka drážky:

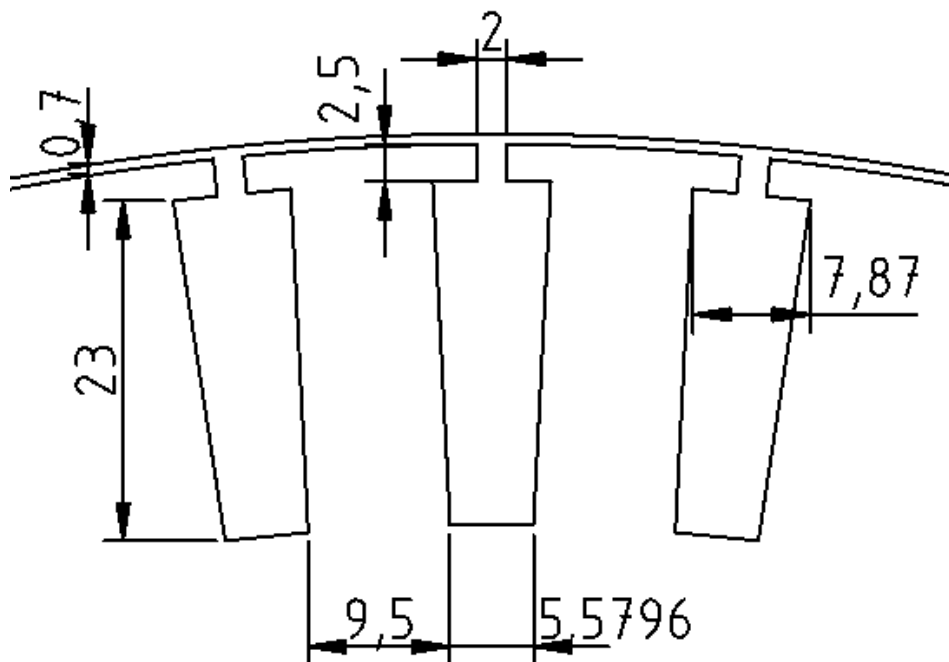
$$b_{d2min} = \frac{\pi(D_2 - 2h_p - 2h_{d2})}{Q_2} - b_{z2} = \frac{\pi(0,3486 - 2 \cdot 0,0025 - 2 \cdot 0,023)}{62} - 0,0095 = 0,0056 \text{ m} \quad (2.47)$$

Pro užití v dalších fázích výpočtu byly vypočítány i hodnoty ve dvou třetinách hloubky drážky:

$$h_{d2/3} = \frac{2}{3} h_{d2} = \frac{2}{3} 0,023 = 0,0153 \text{ m} \quad (2.48)$$

$$b_{d2/3} = \frac{\pi(D_2 - 2h_p - 2h_{d2/3})}{Q_2} - b_{z2} = \frac{\pi(0,3486 - 2 \cdot 0,0025 - 2 \cdot 0,015333)}{62} - 0,0095 = 0,0064 \text{ m} \quad (2.49)$$

Na následujícím obrázku je přiložen výkres rotorové drážky a zubu v milimetrech včetně naznačení vzduchové mezery:



Obrázek 2 – rotorové drážky a zuby

Nyní, při určených rozměrech rotorové drážky, bylo možné spočítat skutečný průřez této drážky:

$$S_t = \frac{(b_{d2max} + b_{d2min})h_{d2}}{2} = \frac{(0,007910504 + 0,005579645)0,023}{2} = 0,000155137 \text{ m}^2 = 155,137 \text{ mm}^2 \quad (2.50)$$

Tento skutečný průřez vyšel o něco větší než předem vypočítaný dle vztahu (2.41), což je ze stejných důvodů jako u statorových tyčí žádoucí. Jako další byly určeny rozměry kruhu nakrátko, neboť ten má, jak již bylo zmíněno výše, jinak určenou proudovou hustotu a jiný protékající proud, proto jeho průřez není totožný s tyčemi. Shodná není ani jeho výška, ta byla zvolena takto:

$$a_{kn} = 1,2h_{d2} = 1,2 \cdot 0,023 = 0,0276 \text{ m} \quad (2.51)$$

Z toho již byla jednoduše určena šířka kruhu:

$$b_{kn} = \frac{S_{kn}}{a_{kn}} = \frac{0,000625332}{0,0276} = 0,0227 \text{ m} \quad (2.52)$$

Na závěr návrhu rozměrů rotoru byl určen průměr hřídele. Zprvu bylo vycházeno z tabulek a zvolen činitel pro výpočet hřídele:

$$k_h = 0,23$$

Poté průměr hřídele vyšel takto:

$$D_h = k_h D_2 = 0,23 \cdot 0,3486 = 0,0802 \text{ m} \quad (2.53)$$

V pozdějších fázích se ale ukázalo, že s ohledem na velikost jha rotoru je možné průměr hřídele ještě zvětšit, což bylo učiněno a zvoleno:

$$D_h = 0,11 \text{ m}$$

Výška jha rotoru po této úpravě volby velikosti hřídele vyšla následovně:

$$h_{j2} = \frac{D_2 - D_h}{2} - (h_{d2} + h_p) = \frac{0,3486 - 0,11}{2} - (0,023 + 0,0025) = 0,0938 \text{ m} \quad (2.54)$$

Tímto byla završena volba rozměrů stroje. V příloze A je orientační pohled na celý stroj (stator i rotor). Z důvodu přehlednosti není výkres okótován, výjimku tvoří vnější průměr stroje.

2.3 Výpočet magnetického obvodu

Výpočet magnetického obvodu byl zahájen určením indukcí v zubech i jzích statoru a rotoru. Jelikož zub statoru má tvar lichoběžníku, byly pro něj spočítány hodnoty ještě v 1/3 a 1/2 výšky.

$$B_{z1max} = \frac{B_\delta t_{d1}}{b_{z1min} k_{Fe}} = \frac{0,899278127 \cdot 0,01527}{0,0072 \cdot 0,97} = 1,966 \text{ T} \quad (2.55)$$

$$B_{z1min} = \frac{B_\delta t_{d1}}{b_{z1max} k_{Fe}} = \frac{0,899278127 \cdot 0,01527}{0,010519616 \cdot 0,97} = 1,346 \text{ T} \quad (2.56)$$

$$B_{z1/3} = \frac{B_\delta t_{d1}}{b_{z1/3} k_{Fe}} = \frac{0,899278127 \cdot 0,01527}{0,008306539 \cdot 0,97} = 1,704 \text{ T} \quad (2.57)$$

$$B_{z1/2} = \frac{B_\delta t_{d1}}{b_{z1/2} k_{Fe}} = \frac{0,899278127 \cdot 0,01527}{0,008859808 \cdot 0,97} = 1,598 \text{ T} \quad (2.58)$$

$$B_{j1} = \frac{\Phi}{2h_{j1} l_1 k_{Fe}} = \frac{0,031958273}{2 \cdot 0,036244965 \cdot 0,303 \cdot 0,97} = 1,5 \text{ T} \quad (2.59)$$

$$B_{z2} = \frac{B_\delta t_{d2}}{b_{z2} k_{Fe}} = \frac{0,899278127 \cdot 0,017663858}{0,0095 \cdot 0,97} = 1,724 \text{ T} \quad (2.60)$$

$$B_{j2} = \frac{\Phi}{2h_{j2} l_1 k_{Fe}} = \frac{0,031958273}{2 \cdot 0,0938 \cdot 0,303 \cdot 0,97} = 0,58 \text{ T} \quad (2.61)$$

Pro další výpočet musela být určena hodnota Carterova činitele drážkování. Ta se určí zvlášť pro stator a rotor a výsledný činitel je jejich součinem. Aby mohly být z grafu hodnoty odečteny, musely být provedeny pomocné výpočty:

$$\frac{b_{d1}}{\delta} = \frac{0,008071631}{0,0007} = 11,5301; \quad \frac{b_{d1}}{b_{z1min}} = \frac{0,008071631}{0,0072} = 1,121$$

$$\frac{b_0}{\delta} = \frac{0,002}{0,0007} = 2,857; \quad \frac{b_0}{t_{d2} - b_0} = \frac{0,002}{0,017663858 - 0,002} = 0,128$$

Pomocí těchto výpočtů byly odečítány Carterovy činitele:

$$k_{c1} = 1,58; \quad k_{c2} = 1,043$$

$$k_c = k_{c1}k_{c2} = 1,58 \cdot 1,043 = 1,6479 \quad (2.62)$$

Následoval výpočet magnetomotorického napětí vzduchové mezery:

$$Um_\delta = \frac{2}{\mu_0} B_\delta \delta k_c = \frac{2}{4\pi \cdot 10^{-7}} 0,899278127 \cdot 0,0007 \cdot 1,64794 = 1651,025 \text{ A} \quad (2.63)$$

kde μ_0 je permeabilita vakua v $\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$.

Intenzita magnetického pole přes vzduchovou mezeru se potom určí takto:

$$H_\delta = \frac{B_\delta}{\mu_0} = \frac{0,899278127}{4\pi \cdot 10^{-7}} = 715622,796 \text{ A/m} \quad (2.64)$$

Pro další postup při výpočtech intenzit magnetického pole a magnetomotorických napětí byly určeny elektrotechnické plechy pro navrhovaný elektromotor. Po konzultaci byly vybrány plechy M350-50A od firmy Thyssen-Krupp. Tento plech má při indukci $B = 1,5 \text{ T}$ ztráty $\Delta p = 3,5 \text{ W/kg}$, viz příloha B. Hodnoty intenzit pro jednotlivé indukce, které jsou určeny z magnetizační charakteristiky, jsou přiloženy v následující tabulce:

Pro:				
$B_{j1} =$	1,5	T	$H_{j1} =$	820 A/m
$B_{j2} =$	0,78	T	$H_{j2} =$	61 A/m
$B_{z1\max} =$	1,966	T	$H_{z1\max} =$	8100 A/m
$B_{z1\min} =$	1,346	T	$H_{z1\min} =$	372 A/m
$B_{z1/3} =$	1,704	T	$H_{z1/3} =$	1630 A/m
$B_{z1/2} =$	1,598	T	$H_{z1/2} =$	932 A/m
$B_{z2} =$	1,724	T	$H_{z2} =$	1870 A/m

Tabulka 1 – přiřazení intenzit k jednotlivým indukčním

Z hodnot intenzit zubu statoru v různých výškách zubu byla určena jedna intenzita H_{z1} , která byla užívána dál při uvažované aproximaci lichoběžníkového tvaru zubu statoru na obdélníkový.

$$H_{z1} = \frac{1}{6} (H_{z1\max} + 4H_{z1/2} + H_{z1\min}) = \frac{1}{6} (8100 + 4 \cdot 932 + 372) = 2033, \bar{3} \text{ A/m} \quad (2.65)$$

Magnetomotorické napětí zubů statoru je následující:

$$Um_{z1} = 2h_{d1}H_{z1} = 2 \cdot 0,03804 \cdot 2033,33333 = 154,696 \text{ A} \quad (2.66)$$

A magnetomotorické napětí zubů rotoru je takové:

$$Um_{z2} = 2h_{d2}H_{z2} = 2 \cdot 0,023 \cdot 1870 = 86,02 \text{ A} \quad (2.67)$$

Činitel nasycení zubů vyšel takto:

$$k_z = 1 + \frac{Um_{z1} + Um_{z2}}{Um_\delta} = 1 + \frac{154,696 + 86,02}{1651,024802} = 1,146 \quad (2.68)$$

K výpočtům magnetomotorického napětí jha bylo třeba určit délky středních magnetických indukčních čar ve jzích statoru i rotoru:

$$l_{j1} = \frac{\pi(D_e - h_{j1})}{2p} = \frac{\pi(0,505739 - 0,0398295)}{6} = 0,2439 \text{ m} \quad (2.69)$$

$$l_{j2} = \frac{\pi(D_h + h_{j2})}{2p} = \frac{\pi(0,11 + 0,0938)}{6} = 0,1067 \text{ m} \quad (2.70)$$

$$Um_{j1} = l_{j1}H_{j1} = 0,243949654.820 = 200,039 \text{ A} \quad (2.71)$$

$$Um_{j2} = l_{j2}H_{j2} = 0,10670943.61 = 6,509 \text{ A} \quad (2.72)$$

Výsledné magnetomotorické napětí na jednu pólovou dvojici vyšlo následovně:

$$\begin{aligned} Fm &= Um_{\delta} + Um_{z1} + Um_{z2} + Um_{j1} + Um_{j2} = \\ &= 1651,024802 + 154,696 + 86,02 + 200,038716 + 6,509275258 = 2098,289 \text{ A} \end{aligned} \quad (2.73)$$

Poměr magnetomotorického napětí celkového a přes vzduchovou mezeru určí činitele nasycení magnetického obvodu:

$$k_{\mu} = \frac{Fm}{Um_{\delta}} = \frac{2098,288793}{1651,024802} = 1,271 \quad (2.74)$$

Nyní bylo možno určit magnetizační proud stroje:

$$I_{\mu} = \frac{p.Fm}{0,9mk_{v1}N_{s1}} = \frac{3.2098,288793}{0,9.3.0,925030649.32} = 78,762 \text{ A} \quad (2.75)$$

Tento proud se někdy též vyjadřuje poměrně nebo v procentech:

$$i_{\mu} = \frac{I_{\mu}}{I_n} = \frac{78,76198465}{341,2235634} = 0,23082 = 23,082\% \quad (2.76)$$

2.4 Odpory a reaktance

Z hodnoty magnetizačního proudu, který byl určen na závěr předchozí podkapitoly, je možné vypočítat magnetizační reaktanci. Ta je následující:

$$X_{\mu} = \frac{k_E U_{nf}}{I_{\mu}} = \frac{0,97.346,41016}{78,76198465} = 4,266 \Omega \quad (2.77)$$

Pro další výpočty odporů a reaktancí bylo nutno nejprve určit množství různých koeficientů a pomocných výpočtů, aby bylo možno pokračovat v dalším určování.

Činitel nárůstu odporu působením povrchového jevu se při malých elementárních vodičích neuvažuje, proto:

$$k_{\sim} = 1$$

Rezistivita mědi. Při nyní uvažované teplotě 180 °C má následující hodnotu:

$$\rho_{\theta} = 2,84 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$$

Pro určení odporu jedné fáze vinutí bylo nutno vypočítat různé rozměry cívek. Započato bylo šířkou mědi v čele, což odpovídá zvolené šířce elementárního vodiče, tedy:

$$b = b_v = 0,0053 \text{ m} = 5,3 \text{ mm}$$

Přípustná vzdálenost mezi mědí vodičů sousedních cívek byla zvolena dle tabulek:

$$s = 0,0035 \text{ m}$$

Stejně tak i délka přímé části cívky na výstupu z drážky:

$$b_p = 0,025 \text{ m}$$

Následovalo několik činitelů:

$$m_{\xi} = \frac{(b+s)}{t_{d1}} = \frac{(0,0053+0,0035)}{0,015271631} = 0,576 \quad (2.78)$$

$$K_{\xi} = \frac{1}{\sqrt{1-m_{\xi}^2}} = \frac{1}{\sqrt{1-0,57623184^2}} = 1,224 \quad (2.79)$$

$$K_v = \frac{1}{2} K_{\xi} m_{\xi} = \frac{1}{2} 1,223561464 \cdot 0,57623184 = 0,352 \quad (2.80)$$

Nyní bylo opět možno počítat rozměry cívky. Nejprve její střední šířku:

$$b_c = \frac{\pi(D_1+h_{d1})}{2p} \beta = \frac{\pi(0,35+0,03804)}{2p} 0,8333 = 0,1693 \text{ m} \quad (2.81)$$

Vyložení čel:

$$l_v = K_v b_c + b_p - 0,5 h_{d1} = 0,352527537 \cdot 0,169314391 + 0,025 - 0,5 \cdot 0,03804 = 0,0657 \text{ m} \quad (2.82)$$

Délka čela:

$$l_{\xi} = K_{\xi} b_c + 2b_p + h_{d1} = 1,223561464 \cdot 0,169314391 + 2 \cdot 0,025 + 0,03804 = 0,2952 \text{ m} \quad (2.83)$$

Délka drážkové části je rovna délce stroje, tedy:

$$l_d = l_1 = 0,303 \text{ m}$$

Střední délka závitu vinutí:

$$l_{av} = 2(l_{\xi} + l_d) = 2(0,295206564 + 0,303) = 1,1964 \text{ m} \quad (2.84)$$

Celková délka efektivních vodičů jedné fáze vinutí:

$$l_{v1} = l_{av} N_{s1} = 1,196413128 \cdot 32 = 38,2852 \text{ m} \quad (2.85)$$

Nyní bylo konečně možno určit velikost odporu jedné fáze statorového vinutí. Jelikož koeficient k_{\sim} nemá na výsledky žádný vliv, je uveden pro příklad pouze v jednom vztahu a dále již není uvažován.

$$R_1 = k_{\sim} \rho_{\vartheta} \frac{l_{v1}}{S_{efa}} = 1,2,84 \cdot 10^{-8} \frac{38,28522009}{0,000018023} = 0,0201 \Omega \quad (2.86)$$

Odpor tyče rotoru:

$$R_t = \rho_{\vartheta} \frac{l_t}{S_t} = 2,84 \cdot 10^{-8} \frac{0,313}{0,000155137} = 5,731 \cdot 10^{-5} \Omega \quad (2.87)$$

K dalšímu výpočtu byl určen střední průměr kruhu nakrátko:

$$D_{kn} = D_2 - a_k = 0,3486 - 0,0276 = 0,321 \text{ m} \quad (2.88)$$

Odpor kruhu nakrátko:

$$R_{kn} = \rho_{\vartheta} \frac{\pi D_{kn}}{Q_2 S_{kn}} = 2,84 \cdot 10^{-8} \frac{\pi 0,321}{62 \cdot 0,000625332} = 7,389 \cdot 10^{-7} \Omega \quad (2.89)$$

Odpor jedné fáze rotoru nakrátko:

$$R_2 = R_t + 2 \frac{R_k}{\Delta^2} = 5,73133 \cdot 10^{-5} + 2 \frac{7,38887 \cdot 10^{-7}}{0,302855555^2} = 7,342 \cdot 10^{-5} \Omega \quad (2.90)$$

Odpor fáze rotoru přepočtený na počet závitů statoru:

$$R'_2 = 4 R_2 m \frac{(N_{s1} k_{v1})^2}{Q_2} = 4 \cdot 7,34248 \cdot 10^{-5} \cdot 3 \frac{(32 \cdot 0,925030649)^2}{62} = 0,0125 \Omega \quad (2.91)$$

Poměrná hodnota tohoto vztahu je následující:

$$r'_2 = R'_2 \frac{I_n}{U_{nf}} = 0,012452161 \frac{341,2235634}{346,41016} = 0,0123 \quad (2.92)$$

Dále přišly na řadu výpočty reaktancí. I zde bylo třeba nejprve určit hodnoty různých koeficientů, jakož i několik dosud nepočítaných rozměrových hodnot.

Výška mezivložky: $h_m = 0,0015 \text{ m}$

Výška otevření drážky: $h_1 = 0,003 \text{ m}$

Výška mědi s mezivložkami: $h_2 = 0,034 \text{ m}$

Činitel natočení drážek: $\beta_v = 0$ (drážky nejsou natočené)

Činitel: $k'_\beta = 0,25(1 + 3\beta) = 0,25(1 + 3 \cdot 0,833333) = 0,875 \quad (2.93)$

Činitel: $k_\beta = 0,25(1 + 3k'_\beta) = 0,25(1 + 3 \cdot 0,875) = 0,906 \quad (2.94)$

Pro odečet dalšího činitele byly určeny následující poměry:

$$\frac{b_{d1}}{t_{d1}} = \frac{0,008071631}{0,015271631} = 0,528; \quad \frac{b_{d1}}{\delta} = \frac{0,008071631}{0,0007} = 11,531$$

Tedy činitel: $\Delta_{z1} = 0,225$

Činitel pro výpočet diferenčního rozptylu statorového vinutí:

$$\begin{aligned} \xi_1 &= \left(2 \frac{t_{d2}}{t_{d1}} - \frac{t_{d1}}{t_{d2}} \Delta_{z1}\right) k_\beta - k_{v1} \left(\frac{t_{d2}}{t_{d1}}\right)^2 = \\ &= \left(2 \frac{0,017663858}{0,015271631} - \frac{0,015271631}{0,017663858} 0,225\right) 0,90625 - \left(\frac{0,017663858}{0,015271631}\right)^2 = 0,683 \end{aligned} \quad (2.95)$$

Činitel magnetické vodivosti drážky statoru:

$$\begin{aligned} \lambda_{d1} &= \frac{h_2 - h_m}{3b_{d1}} k_\beta + \frac{h_1}{b_{d1}} k'_\beta + \frac{h_m}{4b_{d1}} = \\ &= \frac{0,03407 - 0,0015}{3 \cdot 0,008071631} 0,90625 + \frac{0,003}{0,008071631} 0,875 + \frac{0,0015}{4 \cdot 0,008071631} = 1,591 \end{aligned} \quad (2.96)$$

Činitel magnetické vodivosti rozptylu čel:

$$\begin{aligned} \lambda_{\xi 1} &= 0,34 \frac{q}{l_1} (l_\xi - 0,64\beta t_{p1}) = 0,34 \frac{4}{0,303} (0,295206564 - 0,64 \cdot 0,8333 \cdot 0,183259571) = \\ &= 0,886 \end{aligned} \quad (2.97)$$

Činitel magnetické vodivosti diferenčního rozptylu:

$$\lambda_{dif1} = \frac{t_{d1}}{12\delta k_c} \xi_1 = \frac{0,015271631}{12 \cdot 0,0007 \cdot 1,64794} 0,682596323 = 0,753 \quad (2.98)$$

A konečně rozptylová reaktance statoru vyšla takto:

$$\begin{aligned} X_{1\sigma} &= 15,8 \frac{f_1}{100} \left(\frac{N_{s1}}{100}\right)^2 \frac{l_2}{pq} (\lambda_{d1} + \lambda_{\xi 1} + \lambda_{dif1}) = \\ &= 15,8 \frac{80}{100} \left(\frac{32}{100}\right)^2 \frac{0,303}{3,4} (1,590614615 + 0,886325581 + 0,753058446) = 0,1056 \Omega \end{aligned} \quad (2.99)$$

Následovalo určení rozptylové reaktance rotoru, jejímuž výpočtu opět předcházelo vyčíslení některých koeficientů. Pro to byly opět určeny některé poměry:

$$\frac{b_0}{t_{d2}} = \frac{0,002}{0,017663858} = 0,113; \quad \frac{b_0}{\delta} = \frac{0,002}{0,0007} = 2,857$$

Z toho činitel: $\Delta_{z2} = 0,02$

Činitel: $k_d = 1$ (pro jmenovitý chod stroje)

A opět koeficient ξ :

$$\xi_2 = 1 + \frac{1}{5} \left(\frac{\pi p}{Q_2}\right)^2 - \frac{\Delta_{z2}}{1 - \left(\frac{p}{Q_2}\right)^2} = 1 + \frac{1}{5} \left(\frac{\pi 3}{62}\right)^2 - \frac{0,02}{1 - \left(\frac{3}{62}\right)^2} = 0,985 \quad (2.100)$$

Činitel magnetické vodivosti drážkového rozptylu klecového vinutí. Pro výpočet byl lichoběžníkový tvar drážky aproximován na obdélníkový a uvažován se zmenšenou výškou a šířkou ve 2/3. Postup byl takový:

$$\lambda_{d2} = \frac{h_{d2}}{3b_{d2}} k_d + \frac{h_1}{b_0} = \frac{0,015333}{3 \cdot 0,006356598} 1 + \frac{0,0025}{0,002} = 2,054 \quad (2.101)$$

Činitel magnetické vodivosti rozptylu čel:

$$\lambda_{\xi 2} = \frac{2,3D_{kn}}{Q_2 l_2 A^2} \log \frac{4,7D_{kn}}{2(a_{kn}+b_{kn})} = \frac{2,3 \cdot 0,321}{62 \cdot 0,303 \cdot 0,302855555^2} \log \frac{4,7 \cdot 0,321}{2(0,00276+0,022656966)} = 0,504 \quad (2.102)$$

Činitel magnetické vodivosti diferenčního klecového vinutí:

$$\lambda_{dif2} = \frac{t_{d2}}{12\delta k_c} \xi_2 = \frac{0,017663858}{12 \cdot 0,0007 \cdot 1,64794} 0,985 \quad (2.103)$$

Rozptylová reaktance rotoru je takováto:

$$\begin{aligned} X_{2\sigma} &= 7,9f_1 l_2 (\lambda_{d2} + \lambda_{\xi 2} + \lambda_{dif2}) \cdot 10^{-6} = \\ &= 7,9 \cdot 80 \cdot 0,303 (2,054063951 + 0,504050266 + 0,984574627) \cdot 10^{-6} = 7,305 \cdot 10^{-4} \quad \Omega \end{aligned} \quad (2.104)$$

Rozptylová reaktance přepočtená na statorové vinutí:

$$X'_{2\sigma} = X_{2\sigma} 4m_1 \frac{(N_{s1} k_{v1})^2}{Q_2} = 7,30456 \cdot 10^{-4} \cdot 4 \cdot 3 \frac{(32 \cdot 0,925030649)^2}{62} = 0,124 \quad \Omega \quad (2.105)$$

Poměrná hodnota:

$$x'_{2\sigma} = X'_{2\sigma} \frac{I_n}{U_{nf}} = 0,123878506 \frac{341,2235634}{346,41016} = 0,122 \quad (2.106)$$

Pro lepší přehled je zde uvedena tabulka s parametry prvků náhradního schématu:

R_1	0,02012 Ω
R'_2	0,0125 Ω
$X_{1\sigma}$	0,1056 Ω
$X'_{2\sigma}$	0,1239 Ω
X_μ	4,2662 Ω

Tabulka 2 – hodnoty prvků náhradního schématu

2.5 Určení ztrát

Ztráty velkou měrou ovlivňuje volba plechů. Základním údajem je specifická hmotnost železa:

$$\rho_{Fe} = 7850 \text{ kg/m}^3$$

Měrné ztráty v železe zde zvolených plechů M350-50A při indukci 1,5 T jsou tyto:

$$\Delta p_{1,5} = 3,5 \text{ W/kg}$$

Jedná se o ztráty garantované normou. Výrobce sám udává dokonce ztráty 3,16 W/kg (viz příloha B), pro potřeby výpočtu je ale uvažována normou daná hodnota.

K určení ztrát je nutné znát hmotnosti jednotlivých částí stroje. Nejprve byla určena hmotnost zubů statoru. K tomu bylo zapotřebí znát jejich plochu, kde muselo být zohledněno i vybrání pro klín:

$$\text{Vybrání pro klín: } v_k = 0,000002 \text{ m}^2$$

Plocha jednoho zubu byla vypočítána následovně:

$$S_{z1} = \frac{(b_{z1min} + b_{z1max})h_{d1}}{2} - v_k = \frac{(0,0072 + 0,010519616)0,03804}{2} - 0,000002 = 0,000335027 \text{ m}^2 \quad (2.107)$$

Tato plocha po vynásobení délkou stroje, počtem drážek, činitelem plnění železa a hustotou železa již dala očekávaný výsledek v podobě hmotnosti všech zubů statoru:

$$m_{z1} = S_{z1} l_1 Q_1 k_{Fe} \rho_{Fe} = 0,000335027 \cdot 0,303 \cdot 72 \cdot 0,97 \cdot 7850 = 55,654 \text{ kg} \quad (2.108)$$

Pro výpočet ztrát v železe v zubech byl z tabulky převzat koeficient, který náleží voleným plechům:

$$\beta = 1,3$$

Ztráty v zubech statoru se určují takto:

$$\begin{aligned} \Delta P_{Fez1} &= \Delta p_{1,5} \left(\frac{B_{z1/2}}{1,5} \right)^2 \left(\frac{f_1}{50} \right)^\beta m_{z1} = \\ &= 3,5 \left(\frac{1,598024379}{1,5} \right)^2 \left(\frac{80}{50} \right)^{1,3} 55,65400915 = 407,291 \text{ W} \end{aligned} \quad (2.109)$$

Podobně bylo postupováno při určení ztrát ve jhu statoru. Napřed byla určena jeho plocha:

$$\begin{aligned} S_{j1} &= \pi \left(\frac{D_e}{2} \right)^2 - \pi \left(\frac{D_e - h_{j1}}{2} \right)^2 = \pi \left(\frac{0,49856993}{2} \right)^2 - \pi \left(\frac{0,49856993 - 0,036244965}{2} \right)^2 = \\ &= 0,0274 \text{ m}^2 \end{aligned} \quad (2.110)$$

Plocha byla vypočtena s užitím původních hodnot vnějšího průměru D_e a výšky jha h_{j1} bez uvažovaných chladicích kanálů. Tento postup mohl být použit, neboť o plochu, kterou chladicí kanály ve jhu zabírají, bylo jho zvětšeno, takže se změnilo pouze rozměry, nikoliv však hodnoty plochy. Tím

pádem vliv na hmotnost nenastal a tedy ani výpočet ztrát v železe tím nebude ovlivněn. Hmotnost jha byla nyní určena obdobně jako u zubů statoru.

$$m_{j1} = S_{j1} l_1 k_{Fe} \rho_{Fe} = 0,027353534 \cdot 0,303 \cdot 0,97 \cdot 7850 = 63,11 \text{ kg} \quad (2.111)$$

Ztráty v železe ve jhu statoru:

$$\Delta P_{Fej1} = \Delta p_{1,5} \left(\frac{B_{j1}}{1,5} \right)^2 \left(\frac{f_1}{50} \right)^\beta m_{j1} = 3,5 \left(\frac{1,5}{1,5} \right)^2 \left(\frac{80}{50} \right)^{1,3} 63,1098966 = 406,932 \text{ W} \quad (2.112)$$

Hlavní ztráty v železe jsou součtem těchto dvou:

$$\Delta P_{Feh} = \Delta P_{Fez1} + \Delta P_{Fej1} = 407,2909495 + 406,9316698 = 814,223 \text{ W} \quad (2.113)$$

Dalšími ztrátami, které byly určovány, jsou pulsní, též nazývané pulzační, ztráty v železe zubů, které vznikají od pulzací indukce v zubech. I zde bylo nutno nejprve určit některé potřebné dosud nepočítané hodnoty a neužívané činitele. Např. náhradní otevření drážky, které se užívá, jsou-li užity otevřené drážky a pro něž je nutno určit i jeden činitel:

$$\kappa_\delta = 3$$

K určení tohoto koeficientu byl využit již výše určený poměr $\frac{b_{d1}}{\delta} = 11,531$.

$$b'_{01} = \frac{b_{d1}}{3} \left(1 + \frac{0,5 t_{d1}}{t_{d1} b_{d1} + \kappa_\delta} \right) = \frac{0,008071631}{3} \left(1 + \frac{0,5 \cdot 0,015271631}{0,015271631 \cdot 0,008071631 + 3} \right) = 0,0027 \text{ m} \quad (2.114)$$

Poté byly určeny další 2 koeficienty:

$$\gamma_1 = \frac{\left(\frac{b'_{01}}{\delta} \right)^2}{5 + \frac{b'_{01}}{\delta}} = \frac{\left(\frac{0,002697392}{0,0007} \right)^2}{5 + \frac{0,002697392}{0,0007}} = 1,677 \quad (2.115)$$

$$\gamma_2 = \frac{\left(\frac{b_0}{\delta} \right)^2}{5 + \frac{b_0}{\delta}} = \frac{\left(\frac{0,002}{0,0007} \right)^2}{5 + \frac{0,002}{0,0007}} = 1,039 \quad (2.116)$$

Dále bylo možno určit amplitudy pulzací pole v zubech statoru a rotoru:

$$B_{p1} = \frac{\gamma_2 \delta}{2 t_{d1}} B_{z1/2} = \frac{1,038961039 \cdot 0,0007}{2 \cdot 0,015271631} 1,598024379 = 0,0381 \text{ T} \quad (2.117)$$

$$B_{p2} = \frac{\gamma_1 \delta}{2 t_{d2}} B_{z2} = \frac{1,67718514 \cdot 0,0007}{2 \cdot 0,017663858} 1,723789602 = 0,0573 \text{ T} \quad (2.118)$$

Pulsní ztráty v zubech statoru vyšly takto:

$$\Delta P_{p1} = 0,11 \left(\frac{Q_2 n_s}{1000} B_{p1} \right)^2 m_{z1} = 0,11 \left(\frac{62 \cdot 1600}{1000} 0,038050931 \right)^2 55,65400915 = 87,225 \text{ W} \quad (2.119)$$

K výpočtu pulsních ztrát v zubech rotoru bylo třeba určit jejich hmotnost. Nejprve byla vypočtena plocha jednoho zubu:

$$\begin{aligned} S_{z2} &= b_{z2}h_{d2} + h_p(t_{d2} - b_0) = \\ &= 0,0095 \cdot 0,023 + 0,0025(0,017663858 - 0,002) = 0,000248 \text{ m}^2 \end{aligned} \quad (2.120)$$

Po vynásobení délkou rotorového svazku, hustotou železa, činitelem plnění železa a počtem drážek byla získána hmotnost zubů:

$$m_{z2} = S_{z2}l_2Q_2\rho_{Fe}k_{Fe} = 0,000248409 \cdot 0,303 \cdot 62 \cdot 7850 \cdot 0,97 = 35,534 \text{ kg} \quad (2.121)$$

A nyní pulsní ztráty v zubech rotoru:

$$\Delta P_{p2} = 0,11 \left(\frac{Q_1 n_s}{1000} B_{p2} \right)^2 m_{z2} = 0,11 \left(\frac{72 \cdot 1600}{1000} 0,0572859 \right)^2 35,53384864 = 170,23 \text{ W} \quad (2.122)$$

Následně byly vypočítány ztráty povrchové. Ty vznikají v povrchové vrstvě hlav zubů statoru i rotoru od pulzací indukce ve vzduchové mezeře. Dohromady s pulsními ztrátami se někdy udávají jako dodatečné ztráty. Na počátku určování těchto ztrát byly opět jako první určeny některé koeficienty či poměry, které jsou pro výpočet nezbytné.

$$\frac{b_{d1}}{\delta} = 11,531; \quad \frac{b_0}{\delta} = 2,857$$

Pomocí těchto poměrů byly odečteny následující činitele:

$$\beta_{01} = 0,2$$

$$\beta_{02} = 0,42$$

Dále byly zvoleny činitele opracování povrchů hlav zubů statoru i rotoru:

$$k_{01} = 2$$

$$k_{02} = 2$$

Pokračováno bylo výpočtem pulzace pole ve vzduchové mezeře:

$$B_{01} = \beta_{01} k_c B_\delta = 0,2 \cdot 1,64794 \cdot 0,899278127 = 0,296 \text{ T} \quad (2.123)$$

$$B_{02} = \beta_{02} k_c B_\delta = 0,42 \cdot 1,64794 \cdot 0,899278127 = 0,622 \text{ T} \quad (2.124)$$

Poté již bylo možno vypočítat hustoty povrchových ztrát, což jsou měrné ztráty vztahované na 1 m² povrchu:

$$\begin{aligned} p_{\delta p1} &= 0,5 k_{01} \left(\frac{Q_2 n_s}{10000} \right)^{1,5} (B_{01} t_{d2} 10^3)^2 = \\ &= 0,5 \cdot 2 \left(\frac{62 \cdot 1600}{10000} \right)^{1,5} (0,296391279 \cdot 0,017663858 \cdot 10^3)^2 = 856,386 \text{ W/m}^2 \end{aligned} \quad (2.125)$$

$$\begin{aligned}
 p_{\delta p2} &= 0,5k_{02} \left(\frac{Q_1 n_s}{10000} \right)^{1,5} (B_{02} t_{d1} 10^3)^2 = \\
 &= 0,5 \cdot 2 \left(\frac{72 \cdot 1600}{10000} \right)^{1,5} (0,622421687 \cdot 0,015271631 \cdot 10^3)^2 = 3532,8 \text{ W/m}^2
 \end{aligned} \tag{2.126}$$

Celkové povrchové ztráty ve statoru a rotoru vyšly následující:

$$\begin{aligned}
 \Delta P_{\delta p1} &= p_{\delta p1} (t_{d1} - b_{d1}) Q_1 l_1 = \\
 &= 856,3858501 (0,015271631 - 0,008071631) 72 \cdot 0,303 = 134,517 \text{ W}
 \end{aligned} \tag{2.127}$$

$$\begin{aligned}
 \Delta P_{\delta p2} &= p_{\delta p2} (t_{d2} - b_0) Q_2 l_2 = \\
 &= 3532,799515 (0,017663858 - 0,002) 62 \cdot 0,303 = 1039,566 \text{ W}
 \end{aligned} \tag{2.128}$$

Celkem tedy činí dodatečné ztráty tolik:

$$\begin{aligned}
 \Delta P_{Fep} &= \Delta P_{\delta p1} + \Delta P_{\delta p2} + \Delta P_{p1} + \Delta P_{p2} = \\
 &= 134,5169787 + 1039,565956 + 87,22541744 + 170,2297156 = 1431,538 \text{ W}
 \end{aligned} \tag{2.129}$$

A celkové ztráty v železe mají takovou velikost:

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_{Feh} + \Delta P_{Fep} = 814,2226193 + 1431,538068 = 2245,761 \text{ W} \tag{2.130}$$

Dále byly určeny Jouleovy ztráty. Nejprve ve vinutí statoru:

$$\Delta P_{j1} = m_1 I_n^2 R_1 = 3 \cdot 341,2235634^2 \cdot 0,020117812 = 7027,163 \text{ W} \tag{2.131}$$

Následně ve vinutí rotoru:

$$\Delta P_{j2} = m_2 I_t^2 R_2 = 62 \cdot 909,0496922^2 \cdot 7,34248 \cdot 10^{-5} = 3761,923 \text{ W} \tag{2.132}$$

Součtem je tento výsledek:

$$\Delta P_j = \Delta P_{j1} + \Delta P_{j2} = 7027,163023 + 3761,923063 = 10789,086 \text{ W} \tag{2.133}$$

Mechanické ztráty se počítají podle empirických zkušeností z množství postavených elektrických strojů. Jejich určení je pouze přibližné. Užito bylo následujícího vztahu:

$$\Delta P_m = 1,3(1 - D_e) \left(\frac{n_s}{10} \right)^2 D_e^4 = 1,3(1 - 0,506) \left(\frac{1600}{10} \right)^2 0,506^4 = 1076,082 \text{ W} \tag{2.134}$$

Celkové ztráty elektrického stroje jsou součet tří dílčích složek – ztrát v železe, ztrát Jouleových a mechanických ztrát:

$$\begin{aligned}
 \Delta P &= \Delta P_{Fe} + \Delta P_j + \Delta P_m = \\
 &= 2245,760687 + 10789,08609 + 1076,08243 = 14110,93 \text{ W}
 \end{aligned} \tag{2.135}$$

Jsou-li známy ztráty a výkon na hřídeli, je možné určit účinnost stroje. Ta v tomto případě vyšla takováto:

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P} = \frac{300000}{300000 + 14110,9292} = 0,955076605 = 95,508\% \quad (2.136)$$

Podíváme-li se na samotný začátek této práce, vidíme, že předem uvažovaná účinnost stroje byla stanovena na 94%. Zde vypočtená účinnost se tedy liší o 1,5%, což značí, že v návrhu vznikly nepřesnosti. Pokud by stroj byl přepočten s ohledem na dosažení předpokládané účinnosti, došlo by ke změnám některých hodnot a ovlivněny by byly rozměrové údaje stroje.

Dále byla určena činná složka proudu naprázdno. K jejímu výpočtu bylo potřebné znát ztráty ve statoru při chodu naprázdno:

$$\Delta P_{j0} = m_1 R_1 I_\mu^2 = 3.0,020117812 \cdot 78,76198465^2 = 374,4 \text{ W} \quad (2.137)$$

Potom:

$$I_{Fe} = \frac{\Delta P_{Fe} + \Delta P_m + \Delta P_{j0}}{m_1 U_{nf}} = \frac{2245,760687 + 1076,08243 + 374,3995369}{3.346,41016} = 3,557 \text{ A} \quad (2.138)$$

Jalová složka proudu naprázdno odpovídá magnetizačnímu proudu.

Proud naprázdno se pak spočte z Pythagorovy věty:

$$I_o = \sqrt{I_{Fe}^2 + I_\mu^2} = \sqrt{3,556711153^2 + 78,76198465^2} = 78,842 \text{ A} \quad (2.139)$$

Účinník při chodu naprázdno je následující:

$$\cos \varphi_0 = \frac{I_{Fe}}{I_o} = \frac{3,556711153}{78,84225022} = 0,0451 \quad (2.140)$$

Dále byl určen skluz zvratu:

$$s_z = \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_{1\sigma} + X'_{2\sigma})^2}} = \frac{0,012452161}{\sqrt{0,020117812^2 + (0,105562764 + 0,123878506)^2}} = 0,0541 \quad (2.141)$$

V procentech je tedy skluz zvratu takový: $s_z = 5,4064243 \%$

Moment stroje:

$$M = \frac{P_2}{\omega_s} = \frac{300000}{167,5516082} = 1790,493 \text{ N.m} \quad (2.142)$$

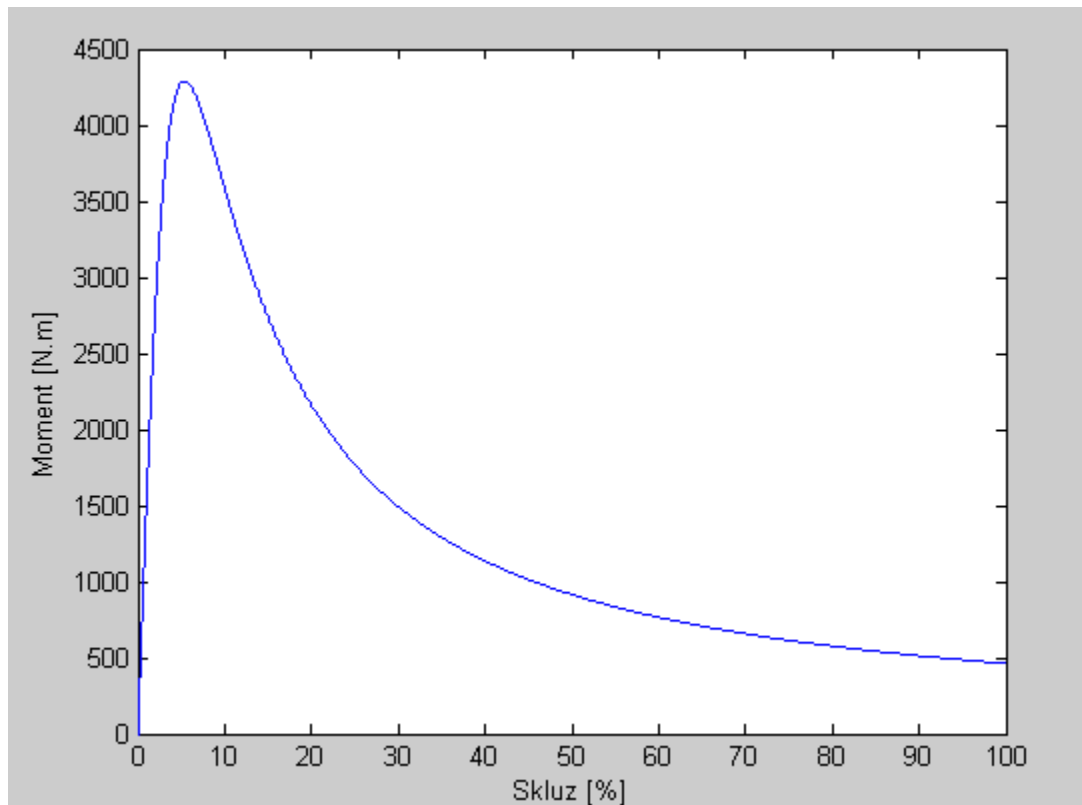
Vztah pro výpočet momentu zvratu:

$$\begin{aligned} M_z &= \frac{pm_1 U_{nf}^2}{4\pi f_1 \left(R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_{1\sigma} + X'_{2\sigma})^2} \right)} = \\ &= \frac{3.3.346,41016^2}{4\pi 80 \left(0,020117812 + \sqrt{0,020117812^2 + (0,105562764 + 0,123878506)^2} \right)} = 4289,644 \text{ N.m} \end{aligned} \quad (2.143)$$

Pro získání momentové charakteristiky slouží Klossův vztah:

$$M(s) = \frac{2M_z}{\frac{sZ_1 + s}{s} + \frac{s}{sZ_2}} \quad (2.144)$$

Zde vypočtené hodnoty skluzu zvratu a momentu zvratu byly dosazeny do Klossova vztahu a přes program Matlab byla zobrazena momentová charakteristika stroje. V příloze C je uveden zápis v Matlabu.



Obrázek 3 – momentová charakteristika

3 Tepelný výpočet

Orientační výpočet oteplení motoru je dalším bodem zadání této diplomové práce. Oteplení stroje je důležité z hlediska stárnutí izolace, neboť tato, je-li přehřívána, rychle ztrácí své vlastnosti, což má neblahý vliv na životnost stroje a může dojít k jeho zničení. Výpočet oteplení stroje byl prováděn ponejvíce podle [1] a konzultován

3.1 Oteplení statoru

Nejprve bylo započato s určením oteplení statoru. Jako první byl určen koeficient zvýšení ztrát, což není nic jiného než teplotní závislost odporu mědi. Zprvu byl určen předběžně a později, při pokračování výpočtů, byl tento koeficient upravován tak, aby korespondoval s vycházejícími hodnotami. Zde uvedený koeficient je již ten výsledný, se kterým byly provedeny ty konečné výpočty.

$$k_{\rho 1} = 1,472$$

Dále byly z tabulek odečteny některé koeficienty, které jsou třeba pro další postup. Jedná se o součinitel přestupu tepla z povrchu:

$$\alpha_1 = 200 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$\alpha_v = 1400 \text{ W/m}^2\text{K}$$

V této fázi výpočtu již musely být definovány axiální ventilační kanály statoru. Jejich množství a průměr byly zvoleny takto:

$$m_{vk} = 72$$

$$d_{vk} = 0,01 \text{ m}$$

Toto uspořádání má následující ochlazovací povrch:

$$S_{ch} = \pi d_{vk} l_1 m_{vk} = \pi 0,01 \cdot 0,303 \cdot 72 = 0,68537 \text{ m}^2 \quad (3.1)$$

Průřez ventilačních kanálů vyšel takto:

$$S_k = \pi \left(\frac{d_{vk}}{2} \right)^2 m_{vk} = \pi \left(\frac{0,01}{2} \right)^2 72 = 0,005655 \text{ m}^2 \quad (3.2)$$

Původní průřez jha statoru byl o tuto plochu ventilačních kanálů zvětšen, takže v konečném důsledku je plocha jha stejná jako zpočátku vypočítaná. Jho má ale větší výšku h_{j1} a tím je větší i vnější obvodu D_e , jak již bylo zmíněno výše u vztahů (2.23) a (2.34). Počet kanálů byl zvolen stejný jako drážek statoru a umístěny jsou v polovině výšky jha v ose zubů.

K pokračování výpočtů oteplení byly určeny ještě některé potřebné rozměry a koeficienty. Jednalo se například o činitel pro výpočet oteplení povrchu stroje:

$$K = 0,78$$

Určena byla jednostranná tloušťka izolace čel cívký:

$$b_{i\check{c}} = 0,0008 \text{ m}$$

Jednostranná tloušťka izolace v drážce statoru byla určena podle již výše uvedených tloušťek užitých izolací vodičů v drážce:

$$b_{i1} = (b_{d1} - b_v)0,5 = (0,008071631 - 0,0053)0,5 = 0,001386 \text{ m} \quad (3.3)$$

Určen byl taktěž výpočtový obvod statorové drážky:

$$O_{d1} = 2(h_{d1} + b_{d1}) = 2(0,03804 + 0,008071631) = 0,09222 \text{ m} \quad (3.4)$$

Obvod chladicího povrchu čel vinutí se uvažuje shodný, tedy:

$$O_{\check{c}1} = O_{d1} = 0,09222 \text{ m}$$

Určena byla také střední ekvivalentní tepelná vodivost drážkové izolace:

$$\lambda_{ekv} = 0,3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$$

Po určení těchto hodnot bylo přikročeno k určení Jouleových ztrát ve vinutí statoru – zvlášť v drážkách a zvlášť v čelech:

$$\Delta P'_{jd1} = k_{\rho 1} \Delta P_{j1} \frac{2l_1}{l_{av1}} = 1,472.7027,163023 \frac{2.0,303}{1,196413128} = 5239,373 \text{ W} \quad (3.5)$$

$$\Delta P'_{j\check{c}1} = k_{\rho 1} \Delta P_{j1} \frac{2l_{\check{c}1}}{l_{av1}} = 1,472.7027,163023 \frac{2.0,295206564}{1,196413128} = 5104,611 \text{ W} \quad (3.6)$$

Oteplení vnitřního povrchu statoru bylo určeno dle následujícího vztahu:

$$\Delta \vartheta_{pov1} = K \frac{\Delta P'_{jd1} + \Delta P_{Feh}}{\pi D_1 l_1 \alpha_1} = 0,78 \frac{5239,372705 + 814,2226193}{\pi 0,35.0,303.200} = 70,863 \text{ K} \quad (3.7)$$

Teplotní spád v izolaci drážkové části statoru:

$$\Delta \vartheta_{id1} = \frac{\Delta P'_{jd1}}{Q_1 O_{d1} l_1} \frac{b_{i1}}{\lambda_{ekv}} = \frac{5239,372705}{72.0,092223262.0,3} \frac{0,001385815}{0,3} = 12,03 \text{ K} \quad (3.8)$$

Teplotní spád na tloušťce izolace čel:

$$\Delta \vartheta_{i\check{c}1} = \frac{\Delta P'_{j\check{c}1}}{2Q_1 O_{\check{c}1} l_{\check{c}1}} \frac{b_{i\check{c}1}}{\lambda_{ekv}} = \frac{5104,611264}{2.72.0,092223262.0,295206564} \frac{0,0008}{0,3} = 3,472 \text{ K} \quad (3.9)$$

Oteplení vnějšího povrchu izolace čel:

$$\Delta \vartheta_{pov\check{c}1} = \frac{K \Delta P'_{j\check{c}1}}{2\pi D_1 l_{v1} \alpha_1} = \frac{0,78.5104,611264}{2\pi 0,35.0,065667985.200} = 137,856 \text{ K} \quad (3.10)$$

Střední oteplení statorového vinutí nad teplotu vzduchu ve stroji:

$$\begin{aligned}\Delta\vartheta'_1 &= \frac{(\Delta\vartheta_{pov1} + \Delta\vartheta_{id1})2l_1 + (\Delta\vartheta_{ič1} + \Delta\vartheta_{povč1})2l_{č1}}{l_{av1}} = \\ &= \frac{(70,86265942 + 12,02950736)2,0,303 + (3,472181557 + 137,8560015)2,0,295206564}{1,196413128} = 111,73 \text{ K}\end{aligned}\quad (3.11)$$

Pro další výpočty bylo opět nutno určit některé další hodnoty, tentokrát týkající se ztrát. Nejprve součet všech ztrát v motoru při jmenovitém chodu, což je totéž jako hodnota určená vztahem (2.135):

$$\sum \Delta P = \Delta P = 14110,929 \text{ W}$$

Tato hodnota posloužila pro další výpočet:

$$\begin{aligned}\sum \Delta P' &= \sum \Delta P + (k\rho_1 - 1)(\Delta P_{j1} + \Delta P_{j2}) = \\ &= 14110,9292 + (1,472 - 1)(7027,163023 + 3761,923063) = 19203,378 \text{ W}\end{aligned}\quad (3.12)$$

A ten ještě pro určení ztrát odváděných do vzduchu uvnitř stroje:

$$\begin{aligned}\sum \Delta P'_v &= \sum \Delta P' - (1 - K)(\Delta P'_{jč1} + \Delta P_{Feh}) = \\ &= 19203,37784 - (1 - 0,78)(5104,611264 + 814,2226193) = 17901,234 \text{ W}\end{aligned}\quad (3.13)$$

Oteplení vzduchu uvnitř stroje se nyní určí dle následujícího vztahu:

$$\Delta\vartheta_v = \frac{\sum \Delta P'}{S_{ch\alpha v}} = \frac{17901,23438}{0,685369853 \cdot 1400} = 18,656 \text{ K}\quad (3.14)$$

Střední oteplení statorového vinutí nad teplotu okolního vzduchu pak vyšlo následovně:

$$\Delta\vartheta_1 = \Delta\vartheta'_1 + \Delta\vartheta_v = 111,7295227 + 18,65649025 = 130,386 \text{ K}\quad (3.15)$$

3.2 Oteplení rotoru

Po předchozím výpočtu pokračovalo určování oteplení rotoru. I pro něj bylo zapotřebí určit některé koeficienty či hodnoty dosud nevypočítané. Podobně jako při určování oteplení statoru byl i zde určen koeficient zvýšení ztrát. Postupnými iteracemi byl také tento koeficient přizpůsoben tak, aby výsledný výpočet odpovídal jeho hodnotě. Zde je již tedy uvedena taková hodnota, která odpovídá konečným výsledkům:

$$k_{\rho 2} = 1,516$$

Součinitel přestupu tepla:

$$\alpha_2 = 100 \text{ W/m}^2\text{K}$$

I v rotoru jsou umístěny axiální ventilační kanály. Jejich počet i průměr je zcela shodný jako v případě statoru, tedy:

$$m_{vk} = 72$$

$$d_{vk} = 0,01 \text{ m}$$

Z tohoto je zřejmé, že i ochlazovací povrch je shodný, viz vztah (3.1). Kanály jsou ve jhu rotoru umístěny ve dvou řadách. Střed bližší řady kanálů je vzdálen 36 mm od kořene zubu, druhá řada je pak umístěna na kružnici vzdálené 12,7 mm od první. Ventilační kanály jsou od sebe navzájem o polovinu přesazeny. Vzhledem k poměru počtu ventilačních kanálů a rotorových drážek je zřejmé, že orientace umístění kanálů není spjata s polohou drážek.

Určeny byly i některé rozměrové údaje, jako například střední délka závitu vinutí rotoru, což je v našem případě délka rotorové tyče a k ní příslušející část kruhů nakrátko:

$$l_{av2} = l_t + 2 \left(\frac{\pi D_{kn}}{Q_2} \right) = 0,313 + 2 \left(\frac{\pi 0,321}{62} \right) = 0,3455 \text{ m} \quad (3.16)$$

Samotná délka části kruhu nakrátko připadajícího k jedné tyči:

$$l_{kn} = \frac{\pi D_{kn}}{Q_2} = \frac{\pi 0,321}{62} = 0,01627 \text{ m} \quad (3.17)$$

Odsazení čela kruhu nakrátko od rotorového svazku:

$$l_{v2} = \frac{l_t - l_2}{2} + b_k = \frac{0,313 - 0,303}{2} + 0,022656966 = 0,02766 \text{ m} \quad (3.18)$$

Určen byl taktéž odpor části kruhu nakrátko připadající jedné fázi rotoru:

$$R_{kn} = \rho_{\vartheta} \frac{l_{kn}}{S_{kn}} = 2,84 \cdot 10^{-8} \frac{0,016265343}{0,000625332} = 7,389 \cdot 10^{-7} \Omega \quad (3.19)$$

Následovalo určení ztrát v drážkové části rotoru:

$$\Delta P'_{jd2} = k_{\rho 2} \Delta P_{j2} \frac{2l_2}{l_{av2}} = 1,516 \cdot 3761,923063 \frac{2 \cdot 0,303}{0,345530685} = 5001,095 \text{ W} \quad (3.20)$$

A hned poté elektrických ztrát v čele:

$$\Delta P'_{j\check{c}2} = k_{\rho 2} R_{kn} I_{kn}^2 Q_2 = 1,516 \cdot 7,38887 \cdot 10^{-7} \cdot 3001,594909^2 \cdot 62 = 625,71 \text{ W} \quad (3.21)$$

Nyní bylo přikročeno k určení oteplení železa rotoru nad teplotu vzduchu uvnitř stroje dle následujícího vztahu:

$$\Delta \vartheta_{pov2} = \frac{\Delta P'_{jd2}}{S_{ch} \alpha_2} = \frac{5001,095153}{0,685369853 \cdot 100} = 72,969 \text{ K} \quad (3.22)$$

Oteplení vnějšího povrchu čel nad teplotu vzduchu uvnitř motoru:

$$\Delta\vartheta_{\text{povč2}} = \frac{\Delta P'_{jč2}}{2\pi D_2 l_{v2} \alpha_2} = \frac{625,7099534}{2\pi \cdot 0,3486 \cdot 0,027656966 \cdot 100} = 103,291 \text{ K} \quad (3.23)$$

Střední oteplení rotorového vinutí nad teplotu vzduchu ve stroji:

$$\Delta\vartheta'_2 = \frac{\Delta\vartheta_{\text{pov2}} l_2 + \Delta\vartheta_{\text{povč2}} l_{kn}}{l_{av2}} = \frac{72,96928992 \cdot 0,303 + 103,2907118 \cdot 0,016265343}{0,345530685} = 68,85 \text{ K} \quad (3.24)$$

Konečně střední oteplení rotorového vinutí nad teplotu okolí bylo určeno takto:

$$\Delta\vartheta_2 = \Delta\vartheta'_2 + \Delta\vartheta_v = 68,84990156 + 18,65649025 = 87,506 \text{ K} \quad (3.25)$$

4 Ověření platnosti elektromagnetického návrhu

Dalším z bodů zadání je ověření elektromagnetického návrhu z kapitoly 2 metodou konečných prvků. K tomuto byl využit program FEMM, který zadanou metodou řeší elektromagnetické úlohy dvourozměrných modelů. FEMM je zkratkou anglického výrazu Finite Element Method Magnetics. Metoda se začala rozšiřovat v 50. letech 20. století po nástupu digitálních počítačů. Zprvu se užívala k řešení problémů v leteckém průmyslu, rychle si ale našla cestu da dalších oblastí, kde jsou úlohy řešeny diferenciálními rovnicemi.[4]

4.1 Příprava k simulaci

Pro analýzu stroje v programu FEMM (použita byla verze 4.2) byl nejprve vyhotoven výkres stroje v CAD programu, konkrétně v QCADu. Výkres obsahoval stator i rotor a znázorněna byla i měď v drážkách, u statoru ve dvou vrstvách včetně zajišťovacího klínu. Výsledný výkres ve formátu .dxf byl importován do FEMMu, kde bylo zapotřebí nadefinovat parametry a materiály. Upřesněno bylo to, že vložený 2D model má být uvažovaný jako 3D vysunutím, poněvadž FEMM umožňuje toto také orotováním. Zvoleny byly rozměrové jednotky a zadána frekvence. Dány byly jednotlivé parametry materiálů, vzduch do chladicích kanálů, vzduchové mezery a otvoru pro hřídel, železu bylo určeno složení z plechů (tloušťka plechů a činitel plnění železa), do rotorových drážek byla zadána měď. Statorové cívky byly nakonfigurovány podle níže uvedeného Tingleyho schématu. Kromě Tingleyho schématu bylo pro zadání cívek do drážek třeba znát i amplitudy proudů připadající jednotlivým fázím. Ty byly určeny takto:

$$I_A = \frac{\sqrt{2}I_\mu}{a} = \frac{\sqrt{2.78,76198465}}{3} = 37,129 \text{ A} \quad (4.1)$$

$$I'_A = \frac{-\sqrt{2}I_\mu}{a} = \frac{-\sqrt{2.78,76198465}}{3} = -37,129 \text{ A} \quad (4.2)$$

$$I_B = \frac{-\sqrt{2}I_\mu}{2a} = \frac{-\sqrt{2.78,76198465}}{2.3} = -18,564 \text{ A} \quad (4.3)$$

$$I'_B = \frac{\sqrt{2}I_\mu}{2a} = \frac{\sqrt{2.78,76198465}}{2.3} = 18,564 \text{ A} \quad (4.4)$$

$$I_C = \frac{-\sqrt{2}I_\mu}{2a} = \frac{-\sqrt{2.78,76198465}}{2.3} = -18,564 \text{ A} \quad (4.5)$$

$$I'_C = \frac{\sqrt{2}I_\mu}{2a} = \frac{\sqrt{2.78,76198465}}{2.3} = 18,564 \text{ A} \quad (4.6)$$

K odvození velikosti Tingleyho schématu posloužily následující údaje:

$$\text{Počet řádek} = 2p = 6$$

$$\text{Počet sloupců} = m \cdot n = 3 \cdot 4 = 12$$

přičemž m je počet fází a n je čítec ze zlomku počtu drážek na pól a fázi q . Jelikož q je celé číslo, je čítec roven q ($q = 4/1$). Jmenovatel z tohoto údaje dále říká, které každé pole schématu bude vyplněno, zde v případě hodnoty 1 se tedy jedná o každé pole. Dále je vinutí dvojvrstvé, což znamená, že v každém poli budou čísla 2. Krok cívky v počtu cívkových stran vyšel takto:

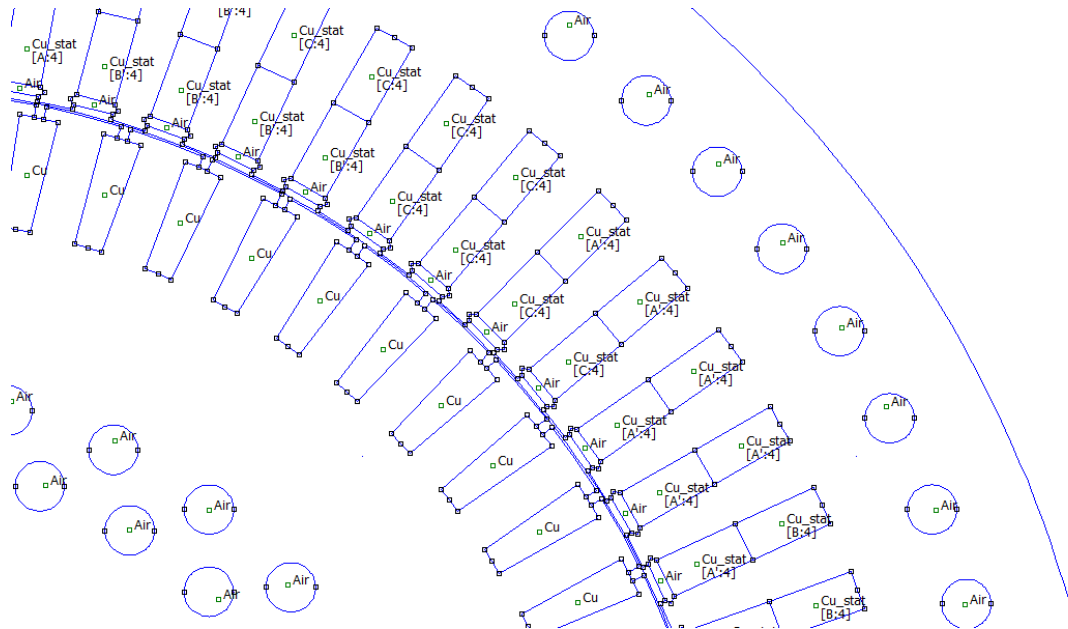
$$y_1 = 2u \cdot y_{1d} + 1 = 2 \cdot 10 + 1 = 21$$

Po tomto určení již nic nebránilo ve vytvoření Tingleyho schématu:

	A A'				C' C				B B'			
1	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	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	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	73	75	77	79	81	83	85	87	89	91	93	95
	74	76	78	80	82	84	86	88	90	92	94	96
5	97	99	101	103	105	107	109	111	113	115	117	119
	98	100	102	104	106	108	110	112	114	116	118	120
6	121	123	125	127	129	131	133	135	137	139	141	143
	122	124	126	128	130	132	134	136	138	140	142	144

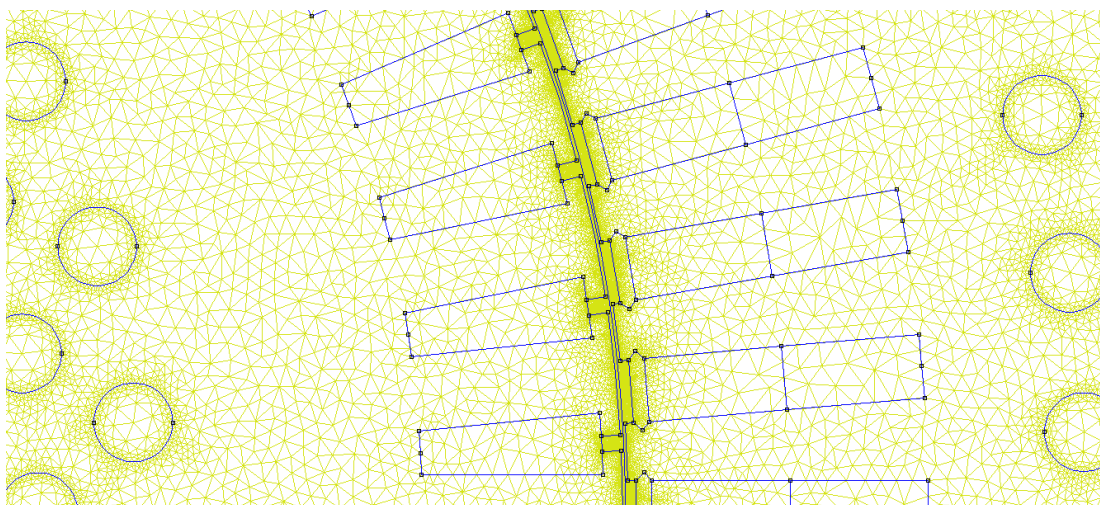
Tabulka 3 – Tingleyho schéma

A v této fázi již mohly být nadefinovány cívky v modelu ve FEMMu. Vytvořeno jich bylo šest, každé byl přidělen jeden výše určený proud, závity a podle Tingleyho schématu byly rozmístěny do statorových drážek. Přiložený obrázek ukazuje část v této diplomové práci navrhovaného motoru s definovanými vlastnostmi:



Obrázek 4 – definování materiálových vlastností

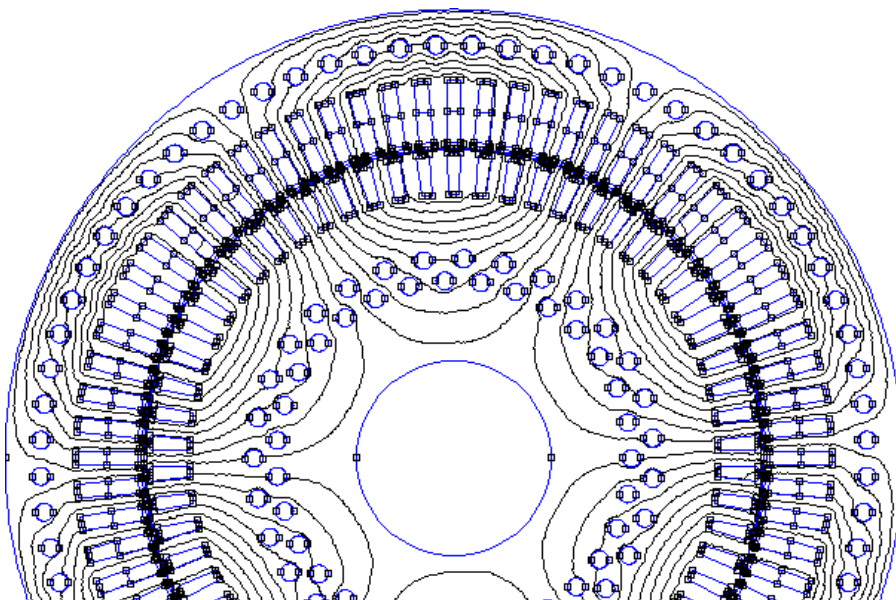
Na okraj byla nastavena Dirichletova okrajová podmínka (magnetický vektorový potenciál $A = 0$) na vnějším obvodu stroje a byla vytvořena síť trojúhelníků (konečných prvků). Ta byla nastavena tak, aby svojí hustotou odpovídala požadavkům na simulaci. Celkem se v tomto případě skládala z 365 867 trojúhelníků a 731 011 uzlů. Detail sítě elektromotoru, kde je vidět různá hustota sítě v různých místech, je přiložen zde:



Obrázek 5 – vygenerovaná síť

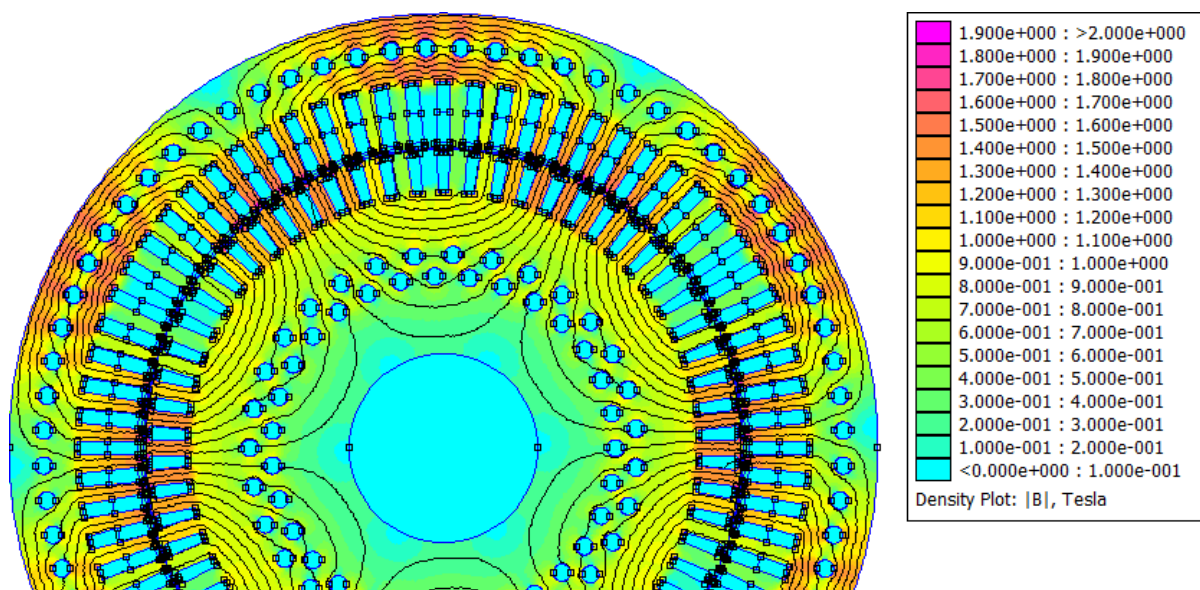
4.2 Vlastní simulace

Poté již proběhl vlastní výpočet. Po jeho otevření je možné zobrazit různé pohledy na model v závislosti na požadované veličině. Na obrázku níže je uveden navrhovaný motor se zobrazenými siločarami magnetického pole.

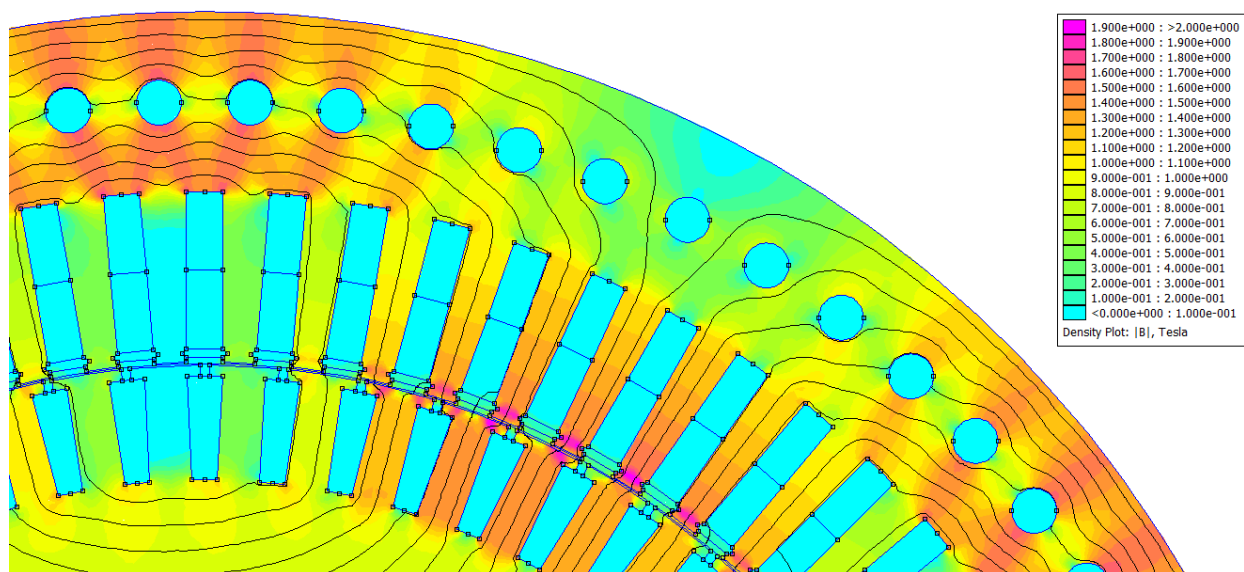


Obrázek 6 – siločáry magnetického pole

Jednoduše jde pak zobrazit též rozložení magnetické indukce. To je i včetně siločar magnetického pole znázorněno na dalším příloženém obrázku, který vzešel ze simulace, s legendou k barevnému odlišení hodnot indukce. Jelikož v celkovém pohledu v této velikosti není snadné rozeznat detaily, následuje ještě jeden detail navrhovaného motoru, který názorněji zobrazuje hodnoty indukce.



Obrázek 7 – rozložení indukce



Obrázek 8 – detail siločar a indukce

Z předchozích obrázků je vidět, že pole je symetrické a z toho tedy plyne, že cívky byly správně zvoleny a zadány. V tomto stádiu, kdy výpočet již byl proveden, je možné odečítat hodnoty v konkrétním místě stroje, což program FEMM umožňuje. Nejprve by na tomto místě bylo vhodné, aby byly uvedeny původně zvolené hodnoty maximálních indukcí v jednotlivých místech a také hodnoty později vypočítané. Tato simulace ověřuje, nakolik se ony hodnoty přibližují.

Nejprve hodnoty volené:

$$B_{j1} = 1,5 \text{ T}$$

$$B_{z1} = 2 \text{ T}$$

$$B_{z2} = 1,8 \text{ T}$$

Následně hodnoty počítané:

$B_{j1} = 1,5 \text{ T}$ (jelikož pomocí této hodnoty byly počítány další veličiny, vyšla indukce ve jhu statoru stejně jako zvolená, čili pro další výpočty byla výchozí)

$$B_{j2} = 0,58 \text{ T}$$

$$B_{z1} = 1,966 \text{ T}$$

$$B_{z2} = 1,724 \text{ T}$$

Určeny byly i hodnoty v 1/2 a 1/3 hloubce zubu statoru:

$$B_{z1/3} = 1,704 \text{ T}$$

$$B_{z1/2} = 1,598 \text{ T}$$

Tyto hodnoty mohly být přímo konfrontovány s elektromagnetickým výpočtem modelu. Po simulaci je možné určit některé hodnoty, což platí v případě indukce. Proto byl proveden odečet hodnot tak, aby mohlo být určeno, zdali se zpočátku vypočtené hodnoty shodují s realitou. Pro kontrolu bylo zvoleno přímé odečítání hodnot, což znamená, že bylo klikáno přímo do modelu do míst, kde byl požadavek na odečet hodnot. Tyto požadavky byly voleny tak, aby co nejvíce odpovídaly předpokládaným a výpočtovým hodnotám a samozřejmě místům, pro něž byly určeny. Několik příkladů tohoto přímého odečtení je přiloženo v příloze D, kde je vidět výřez a též konkrétní odečtená hodnota indukce.

Další postup byl tedy takový, že z nasimulovaného modelu byly přímo z konkrétních míst odečítány hodnoty. Nejprve byly odečteny hodnoty ve jhu statoru. Jak je v Output window programu FEMM vidět, je ve jhu statoru dosahováno indukce až přes 1,6 T, což je více než původně uvažovaná hodnota 1,5 T.

Dále byla porovnána hodnota indukce vypočtené ve jhu rotoru s toutéž hodnotou určenou programem FEMM. Vypočtená hodnota byla na úrovni necelých 0,6 T, výpočtem modelu ale byla určena o něco vyšší hodnota v závislosti na konkrétním místě. V pozicích blízkých drážkové části rotoru těsně nad zubem se hodnoty indukce pohybovaly výše než hodnoty teoreticky vypočítané, zhruba do hodnoty lehce přes 1 T.

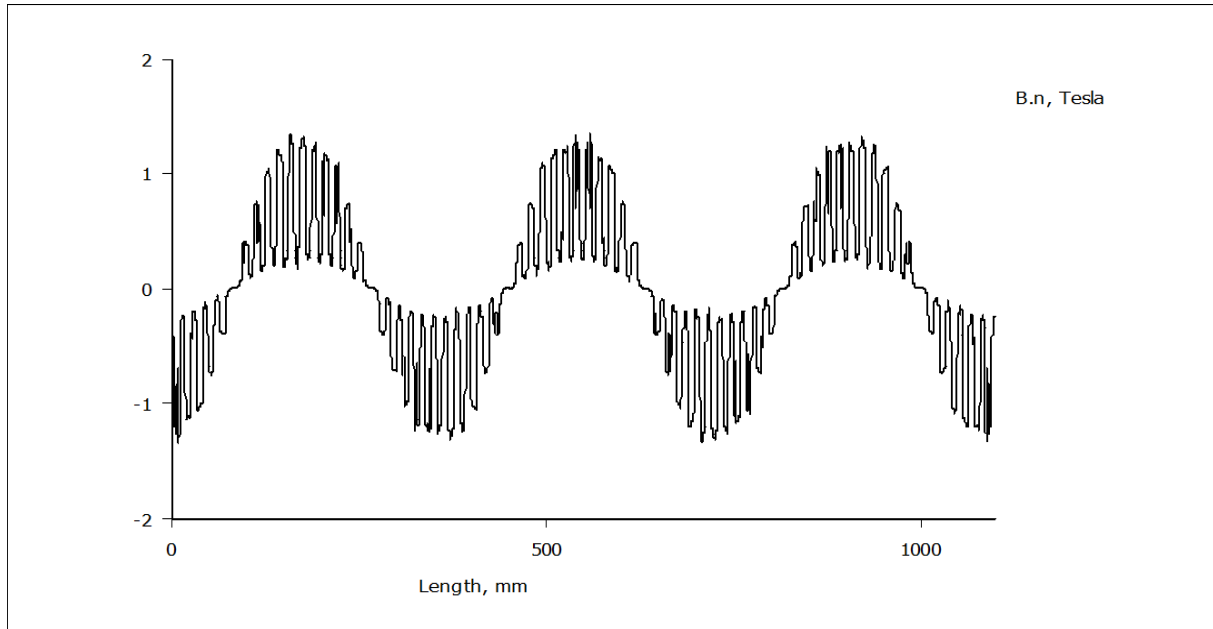
Další ze zkoumaných bodů byly zuby statoru. Tam bylo určeno výpočtem několik hodnot v závislosti na poloze, neboť zuby statoru nemají konstantní šířku. Nejvyšší hodnota indukce v zubu statoru byla vypočítána při povrchu, tedy v nejužším místě. Teoreticky vypočítaná hodnota činila téměř 2 T, konkrétně 1,966 T. Simulací bylo dosaženo hodnoty nižší, zhruba na úrovni 1,9 T v pozici mezi vybráními pro zajišťovací klín. Hodnoty v 1/2 a 1/3 výšky jha se od výpočtů odlišovaly už více, viz přiložená tabulka.

Následovaly zuby rotoru. Protože tyto zuby jsou s ohledem na volbu tvaru rotorové drážky po celé výšce stejně široké, byl teoretický předpoklad na konstantní velikost indukce v zubu. Splnění tohoto předpokladu dokazuje simulační výpočet, který ukazuje, že v celé výšce rotorové drážky je hodnota indukce prakticky stejná s výjimkou míst při povrchu rotoru, kde je z důvodu hlavy zubu indukce jiná. Model tak přesvědčivě dokazuje, že indukce v zubech rotoru je konstantní. Hodnoty indukce v zubu rotoru se nejvíce odlišovaly od hodnot vypočítaných. Obrázky znázorňující detail s pohledem na output window programu FEMM jsou přiloženy v příloze D. Zde pro lepší přehled je přiložena tabulka porovnávající zadané, vypočtené a nasimulované hodnoty:

	Volené	Vypočítané	Simulace
B_{j1}	1,5 T	1,5 T	1,6 T
B_{j2}	-	0,58 T	0,6 T (1 T u zubu)
B_{z1}	2 T	1,966 T	1,9 T
$B_{z1/3}$	-	1,704 T	1,4 T
$B_{z1/2}$	-	1,598 T	1,3 T
B_{z2}	1,8 T	1,724 T	1,45 T

Tabulka 4 – porovnání indukcí

Program FEMM umožňuje i vykreslení různých grafů, čehož zde bylo využito například u vzduchové mezeře. Přiložený obrázek ukazuje průběh indukce ve vzduchové mezeře na celém jejím obvodu. Vykreslit jdou i dílčí části.



Obrázek 9 – průběh indukce ve vzduchové mezeře

Amplituda indukce ve vzduchové mezeře vyšla $B_{\delta} = 0,821$ T. Vypočtená hodnota byla o něco větší - $B_{\delta} = 0,899$ T. Tento rozdíl činí 8,7 %. Zde uvedená nepřesnost mohla vzniknout např. nesprávně zvoleným Carterovým činitelem drážkování, neboť různá literatura užívá k jeho získání ne zcela shodný postup. Existují postupy zcela početní, ale také takové, kde je k odečtení na základě určitých údajů použito grafické řešení. Tyto různé postupy mohou dát rozdílný výsledek činitele k_c .

Závěr

V této diplomové práci byl proveden elektromagnetický výpočet 300kW trakčního asynchronního elektromotoru s kotvou nakrátko. Jednalo se o stroj, který byl zadán již v bakalářské práci, kde byl proveden pouze základní výpočet pro určení předběžných rozměrů stroje. Tyto předběžné rozměry byly v této diplomové práci dále rozvedeny a upřesněny.

Výpočet rozměrů vycházel z údaje o vrtání statoru – to bylo zadáno $D_1 = 350$ mm. Délka stroje l_1 pak po výpočtech v této práci činí 303 mm (přičemž předběžná hodnota z bakalářské práce činila 330 mm), vnější průměr D_e po zaokrouhlení na celé milimetry vychází 506 mm a vzduchová mezera δ byla zvolena 0,7 mm. Určeny byly počty drážek statoru i rotoru – $Q_1 = 72$ a $Q_2 = 62$. Od těchto hodnot se odvíjely další výpočty, ovlivněny byly především drážkové rozteče a další hodnoty přímo svázané s počty drážek. Určeny byly tvary a rozměry drážek, k čemuž byly určeny povolené proudové hustoty ve vodiči, vypočítán proud a určeny vodiče ve statorových drážkách. Statorová drážka je otevřená s rovnoběžnými stěnami a vybráním pro zajišťovací klín. Z tohoto řešení vyplývá, že zub statoru má v každé výšce jinou šířku. Uspořádání zubu a drážky na rotoru je oproti statoru zvoleno opačně – zub má konstantní šířku, zatímco drážka tvar lichoběžníku. Drážka je uzavřená s úzkým otevřením k technologickým účelům. Hlava zubu je tedy širší než jeho tělo. Pro lepší přehled o rozměrech drážek a zubů jsou v příslušných pasážích v textu přiloženy rozměrové výkresy. Určeny byly rotorové proudy v tyčích i kruzích naprázdno.

Dále byly určeny hodnoty magnetických indukcí a intenzit. Vycházeno bylo ze zadaných indukcí pro určité místo (jho, zuby) stroje a výpočtem byly zpřesněny a určeny ještě pro další konkrétní místa. Ve výše uvedené tabulce je přehledně zobrazen seznam těchto vypočítaných indukcí včetně porovnání se zadanými hodnotami a hodnotami, které vzešly ze simulace. Intenzity pro konkrétní místa byly odečteny z magnetizační charakteristiky zvolených plechů s ohledem na dosaženou indukci. Na závěr této části výpočtu byla určena hodnota magnetizačního proudu I_μ . Ta činí 78,762 A.

Pokračováno bylo určováním odporů a reaktancí stroje. Byly určeny hodnoty odporů vinutí statoru i rotoru, odpor kruhu nakrátko. Odpor fáze rotoru nakrátko byl přepočítán na stator. Vypočítány byly rozptylové reaktance, opět statoru i rotoru, taktéž magnetizační reaktance. Rotorová rozptylová reaktance byla též přepočtena na stator. Získány tak byly hodnoty prvků náhradního schématu.

V dalším oddílu byly určeny ztráty stroje. Zde byly opět využity parametry užitých plechů, konkrétně jeho měrné ztráty. Ty jsou potřeba pro určení ztrát v železe, k čemuž je také nutné znát hmotnost příslušné části stroje. Nejprve byly určeny hlavní ztráty v železe. Jako další byly určeny ztráty pulzační (též pulsní) a ztráty povrchové. Tato dvojice ztrát bývá dohromady označována jako dodatečné ztráty. Celkové ztráty v železe vyšly jako součet hlavních a dodatečných ztrát v železe. Významnou složkou ztrát jsou Jouleovy ztráty. Určeny byly zvlášť pro vinutí statoru a zvlášť pro klec rotoru. Celkové Jouleovy ztráty jsou součtem těchto dvou složek. Mechanické ztráty byly určeny přibližně podle empirických zkušeností nabytých za dlouhá léta konstrukce elektrických strojů. Celkové ztráty stroje jsou součtem všech těchto složek a v případě v této práci počítaného elektromotoru činí $\Delta P = 14110,93$ W. To při zadaném výkonu na hřídeli činí účinnost $\eta = 95,508\%$.

Tato hodnota ne zcela přesně koresponduje s předem uvažovanou účinností 94%. V této fázi práce byl určen skluz zvratu a moment zvratu a byla vytvořena momentová charakteristika.

Dalším z bodů zadání diplomové práce bylo provedení orientačního tepelného výpočtu. Zde byly k motoru zauvažovány axiální ventilační kanály, které způsobily změnu některých rozměrů stroje. Tyto změny jsou v práci popsány a jsou uvažovány po celou dobu výpočtu. Ve statorovém jhu bylo užito 72 ventilačních kanálů, tedy stejně jako je počet statorových drážek. Umístěny jsou v ose zubu statoru. V rotoru je umístěno stejné množství kanálů, z důvodu menšího prostoru jsou však rozloženy ve dvou řadách. Všechny ventilační kanály ve stroji mají průměr $d_{vk} = 10$ mm. Oteplení bylo počítáno pro stator i rotor stroje zvlášť, střední oteplení statorového vinutí nad teplotu okolního vzduchu $\Delta\vartheta_1$ vyšlo 130,386 K, tatáž hodnota pro rotor pak činí $\Delta\vartheta_2 = 87,506$ K.

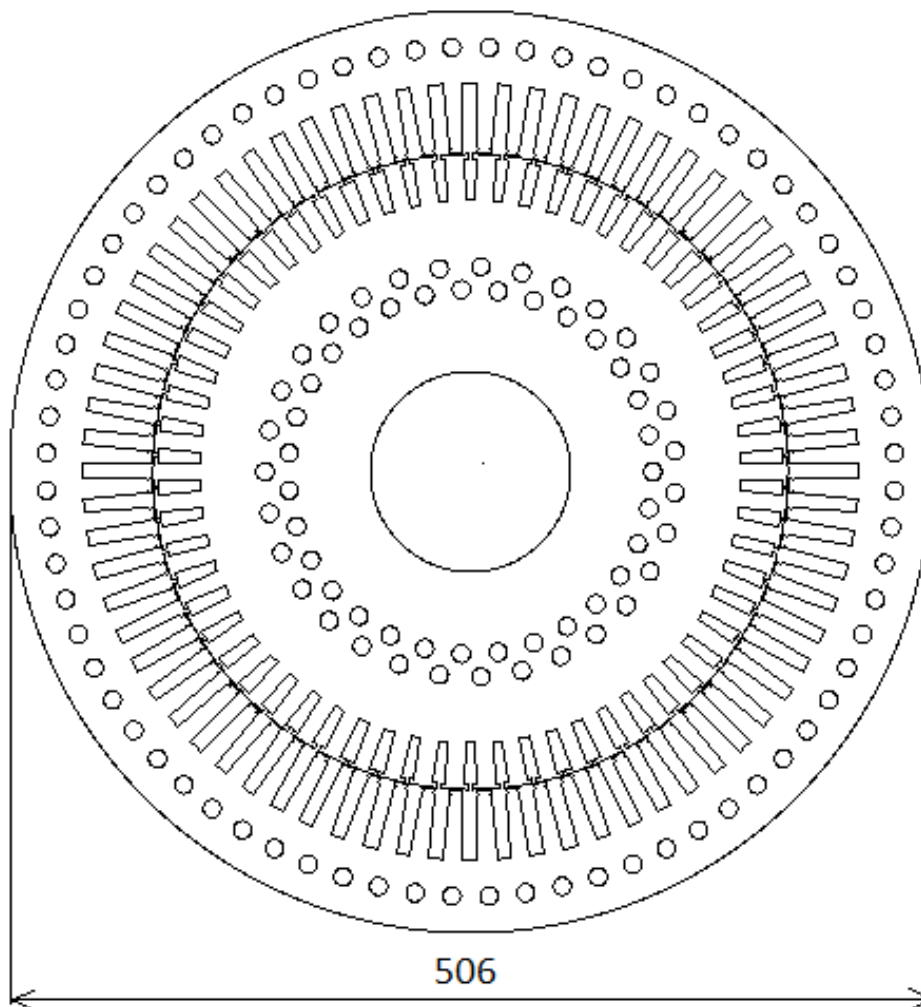
Posledním bodem zadání práce bylo ověření správnosti elektromagnetického návrhu metodou konečných prvků. Toto bylo provedeno programem FEMM (Finite Element Method Magnetics). Aby simulace mohla být provedena, musel být nakreslen 2D model stroje, vytvořeno Tingleyho schéma vinutí a určeny amplitudy proudů ve fázích. V samotném programu pak došlo k nadefinování materiálových vlastností a cívek stroje. Po vlastním výpočtu simulace již bylo možné zobrazit různé údaje stroje, například siločáry magnetického pole nebo rozložení indukce ve stroji. Z tohoto je vidět, že vinutí bylo nadefinováno správně, neboť magnetické pole je symetrické. Hodnoty indukce lze velmi jednoduše odečítat přímo kliknutím do požadovaného místa. V již zmíněné tabulce jsou pro srovnání vypočtených hodnot a hodnot získaných simulací uvedeny i tyto odečtené hodnoty. Program například také umožňuje vykreslení různých grafů. V práci je ukázán průběh indukce ve vzduchové mezeře. Předem uvažovaná indukce ve vzduchové mezeře měla hodnotu $B_\delta = 0,9$ T, po upřesňujících výpočtech byla zkorigována na 0,899 T a ze simulace byla získána její hodnota $B_\delta = 0,821$ T.

Použitá literatura

- [1] KOPYLOV, Igor Petrovič, et al. Stavba elektrických strojů. Praha : SNTL - Nakladatelství technické literatury, n.p., 1988. 688 s.
- [2] Hrubý, Ladislav. Asynchronní stroje pro trakční účely. Plzeň, 2011. 45 s. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni, FEL, KEV.
- [3] CIGÁNEK, Ladislav. Stavba elektrických strojů. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, n.p., 1958.
- [4] PEŠEK, M. *Program FEMM - podklady pro výuku v elektronické formě*. Brno: FEKT VUT v Brně, 2009. 54 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.
- [5] SEQUENZ, Heinrich, et al. Technologie vinutí elektrických strojů točivých. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1980.
- [6] BARTOŠ, Václav. Teorie elektrických strojů. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2006.
- [7] Power core M350-50A. ThyssenKrupp Steel Europe [online]. [cit. 2013-05-08]. Dostupné z: <http://www.thyssenkrupp-steel-europe.com/tiny/mk/download.pdf>
- [8] NOVOTNÝ, Pavel. Inovace ventilačního systému uzavřeného tramvajového motoru. Odbornecasopisy.cz [online]. 2004, č. 7, [cit. 2011-04-30]. Dostupný z WWW: < http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=25901 >.
- [9] DANZER, Jiří. Elektrická trakce I. Plzeň : Západočeská univerzita v Plzni, 2000. 198 s.
- [10] DANZER, Jiří. Elektrická trakce II. Plzeň : Západočeská univerzita v Plzni, 2001. 167 s.

Přílohy

Příloha A – celkový pohled na stroj



Příloha B – použité elektromagnetické plechy

Magnetische Eigenschaften*Magnetic properties*

	Garantiewerte nach DIN EN 10106 <i>Guaranteed values according to DIN EN 10106</i>	Sortentypische Mittelwerte ThyssenKrupp Steel AG <i>Typical mean values ThyssenKrupp Steel AG</i>
Ummagnetisierungsverlust bei 50Hz <i>Core loss at 50Hz</i>		
1,0* T	1,50 W/kg	1,42 W/kg
1,5 T	3,50 W/kg	3,16 W/kg
Magnetische Polarisation bei <i>Magnetic polarization at</i>		
2500 A/m	1,50 T	1,59 T
5000 A/m	1,60 T	1,67 T
10000 A/m	1,70 T	1,79 T

*Die Größe des Ummagnetisierungsverlustes bei 1,0 T ist ein Anhaltswert und dient zur Information

*The core loss value at 1.0 T is a reference value and is for information purposes only

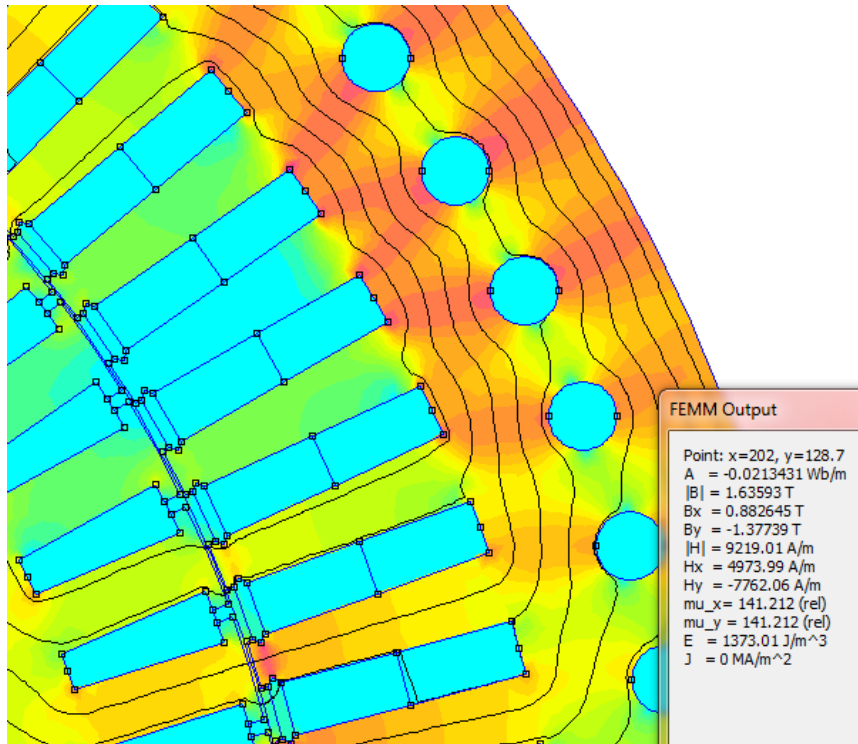
Převzato ze [7], podrobná magnetizační charakteristika je uvedena v [1]

Příloha C – zápis v Matlabu pro vykreslení momentové charakteristiky

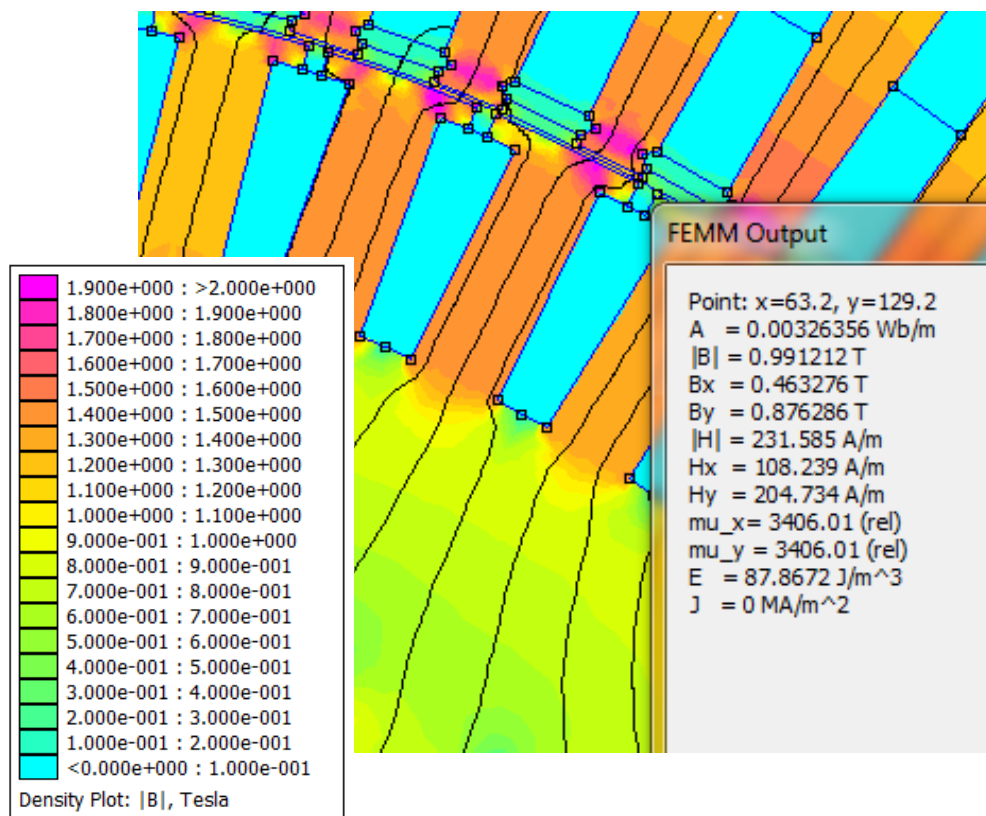
```
clear;          %smazání proměnných
clc;           %vyčištění obrazovky
Mz=4289,644403;      %moment zvratu
sz=5,4064243;       %skluz zvratu v %
s=linspace(0,100,1000000); %vektor skluzů od 0 do 1 s krokem 1000
Ms=(2*Mz)./(sz./s)+(s./sz); %Klossův vztah
plot(s,Ms,'b');     %vytištění grafu(modrá barva)
xlabel('Skluz [%]'); %název osy x
ylabel('Moment [N.m]'); %název osy y
```

Příloha D – detailnější pohled na různá místa stroje a odečet hodnoty indukce

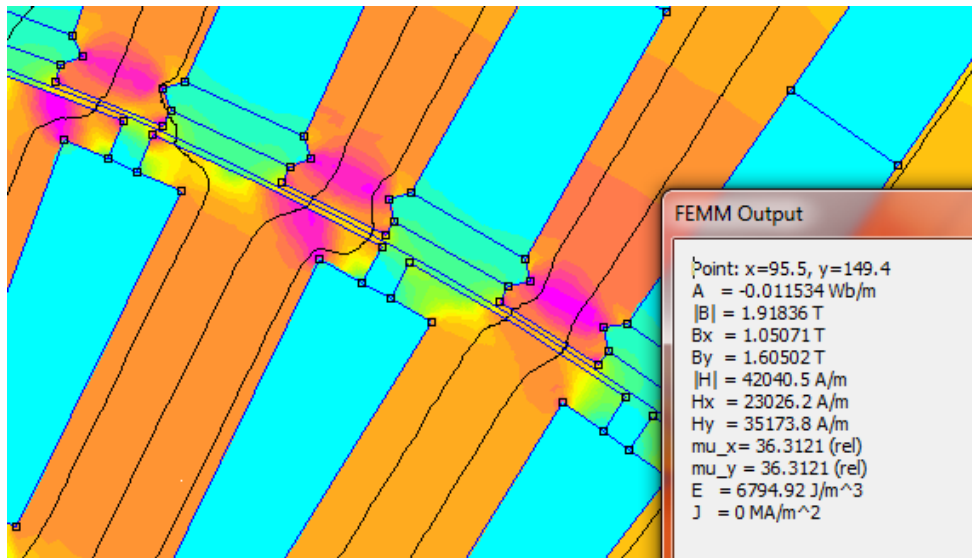
1) Odečet ve jhu statoru



2) Odečet ve jhu rotoru



3) Odečet v zubu statoru



4) Odečet v zubu rotoru

