

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ
ELEKTRONIKY**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Elektromagnetický návrh a FEM analýza trakčního
asynchronního stroje**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan LIMBURSKÝ**
Osobní číslo: **E13N0045K**
Studijní program: **N2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Elektromagnetický návrh a FEM analýza trakčního asynchronního stroje**
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

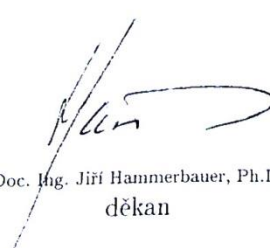
1. Proveďte elektromagnetický návrh asynchronního trakčního stroje o šítkových hodnotách: $P_n=120$ kW, $n=2369$ ot/min, $f_n=80$ Hz, $U_n=640$ V, $I_n=145$ A, $\cos \phi=0,81$ zapojeného do hvězdy a s minimální účinností 90 procent.
2. Elektromagnetický návrh ověřte metodou konečných prvků.
3. Vytvořte model stroje v libovolném CAD programu.
4. Diskutujte možnosti provedení klece rotoru se šikmými drážkami.

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


1. Elektronické informační zdroje.
2. Pyrhönen, J., Jokinen, T., Hrabovcová, V.: Design of rotation electrical machines. John Wiley & Sons, Ltd, 2008.
3. Kopylov, I., P.: Stavba elektrických strojů. SNTL/MIR, 1988.
4. Náповěda SW použitého k analýze.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Vladimír Kindl, Ph.D.
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání diplomové práce: 15. října 2014
Termín odevzdání diplomové práce: 11. května 2015


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




Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na základní analytický návrh trakčního uzavřeného asynchronního stroje a ověření analytického návrhu metodou konečných prvků v software FEMM. Součástí práce je též úvaha nad použitím klece nakrátko se zešíkmenými drážkami a příčný řez stroje v CAD software.

Klíčová slova

asynchronní stroj, FEM analýza, analytický návrh, oteplení, FEMM, CAD

Abstract

This master theses is focused on the basic analytical design of the traction induction machine and design verification using finite element method (FEMM software). Part of the work is also an effect on the use of skewed rotor and CAD model.

Key words

induction machine, FEM analysis, analytical design, winding, CAD, FEMM

Prohlášení

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

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

.....
podpis

V Plzni dne 7.5.2015

Jan Limburský

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu a konzultantovi diplomové práce Ing. Vladimíru Kindlovi, Ph.D. a Ing. Romanu Pechánkovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce a ochotu vždy okamžitě pomoci.

0 Obsah

0	OBSAH.....	8
1	SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
2	ÚVOD	14
3	ANALYTICKÝ VÝPOČET	15
3.1	VOLBA ČINITELŮ A PŘEDBĚŽNÝ VÝPOČET ROZMĚRŮ:.....	15
3.2	NÁVRH VINUTÍ:	16
3.3	VÝPOČET PROUDŮ:.....	19
3.4	URČENÍ MAGNETICKÉHO TOKU A UPŘESNĚNÍ VOLENÝCH VELIČIN:	20
3.5	VÝPOČET ROZMĚRŮ DRÁŽEK A VODIČŮ STATORU:	21
3.6	NÁVRH ROTORU:	24
3.7	VÝPOČET MAGNETICKÉHO OBVODU:	28
3.8	ODPORY, ROZPTYLY A REAKTANCE:.....	32
3.9	VÝPOČET HLAVNÍCH ZTRÁT:	38
3.10	VÝPOČET OTEPLENÍ:.....	43
3.10.1	<i>Výpočet množství chladiva:</i>	<i>46</i>
3.11	OVĚŘENÍ A DOKONČENÍ ANALYTICKÉHO NÁVRHU:	47
4	MOŽNOSTI PROVEDENÍ KLECE NAKRÁTKO SE ZEŠIKMENÝMI DRÁŽKAMI:.....	54
4.1	VÝROBA KLECOVÝCH ROTORŮ SE ZEŠIKMENÝMI DRÁŽKAMI:	57
5	PODÉLNÝ ŘEZ STROJEM:.....	58
6	SHRNUTÍ A ZÁVĚR:.....	59
7	SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....	60

1 Seznam symbolů a zkratk

p	[-]	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
$b_{i\check{c}}$	[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	$[\frac{VA}{m^3 \cdot ot}]$	Essonův činitel
$\cos \phi$	[-]	účinník
$\cos \phi_0$	[-]	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_{kn}	[A]	proud kruhem nakrátko
I_n	[A]	jmenovitý proud
I_v	[A]	proud elementárním vodičem
I_μ	[A]	magnetizační proud
I_0	[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_ρ	[-]	koeficient zvýšení ztrát
k_0	[-]	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
$O_č$	[m]	výpočtový obvod povrchu čel
O_d	[m]	výpočtový obvod statorové drážky
P_i	[VA]	vnitřní výkon
P_2	[W]	výkon na hřídeli
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'
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
y_1	[-]	krok cívký v počtu cívkových stran
y_{1d}	[-]	přední cívkový krok v počtu drážek
α	[W.m ⁻²]	součinitel přestupu tepla
α_δ	[-]	činitel pólového krytí
β	[-]	činitel zkrácení kroku
β_γ	[-]	činitel natočení drážek
Δ	[-]	činitel přepočtu proudu v kruhu na proud v tyči
ΔP	[W]	Celkové ztráty
ΔP_{Fe}	[W]	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
$\Delta \vartheta_{i\check{c}}$	[K]	teplotní spád v izolaci čel
$\Delta \vartheta_{id}$	[K]	teplotní spád v izolaci drážky
$\Delta \vartheta_{pov}$	[K]	oteplení povrchu
$\Delta \vartheta_{pov\check{c}}$	[K]	oteplení povrchu izolace čel
$\Delta \vartheta_v$	[K]	oteplení vzduchu uvnitř stroje
$\Delta \vartheta$	[K]	střední oteplení vinutí nad teplotu okolního vzduchu

$\Delta\theta'$	[K]	střední oteplení vinutí nad teplotu ve stroji
η	[-]	účinnost
λ_{ξ}	[-]	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
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

2 Úvod

Asynchronní stroje jsou v současné době masově nasazovány v dopravním strojírenství z důvodu jejich spolehlivosti. Tě je dosaženo díky tomu, že tyto stroje nepotřebují žádné mechanické kontakty pro vedení proudu a zajištění funkce stroje. Fungují čistě na principu indukce proudů do rotoru prostřednictvím magnetického pole statoru. Indukce proudů je dosaženo tím, že se rotor otáčí pomaleji než magnetické pole statoru. Rotor vytváří vlastní magnetické pole, které je statorovým polem přitahováno. Asynchronní stroj byl vynalezen Nikolou Teslou v roce 1887.

Nasazování těchto strojů v dopravě vyžaduje spoustu jejich modifikací z hlavně z mechanického hlediska. Stroje mohou mít oba vlastní štíty a klasicky dvě ložiska (trolejbusové motory, lokomotivní motory), nebo mohou být bez štítu i bez ložiska na straně pohonu a v tomto případě jsou upevněny přímo na převodovou skříň (tramvajové motory i lokomotivní motory). Mohou být profukované nuceně externím zdroje vzduchu nebo mít vlastní ventilátor. Mohou být otevřené s krytím IP23 nebo uzavřené s krytím IP44.

Tato předkládaná diplomová práce je zaměřena na základní analytický návrh asynchronního trakčního stroje, jeho ověření metodou konečných prvků v software FEMM a orientačnímu výpočtu oteplení a ztrát. Text je rozdělen do čtyř částí: první část se zabývá samotným analytickým návrhem a výpočtem oteplení, druhá část ověřením analytického návrhu metodou FEM. Třetí část obsahuje úvahu při použití rotoru se zešikmenými drážkami o jednu drážkovou rozteč a výhodami této konfigurace rotoru a podélný řez strojem vytvořeným v CAD programu.

Navrhovaný stroj v této práci má následující štítkové hodnoty, jedná se tedy o uzavřený stroj s dvěma ventilačními okruhy:

U_1	f_{jm}	P_2	n_s	$\cos(\varphi)$	η	IP
640 V	80 Hz	120 kW	$2400 \frac{ot}{min}$	0,81	90 %	44

(tab. 1 Štítkové hodnoty stroje)

3 Analytický výpočet

3.1 Volba činitelů a předběžný výpočet rozměrů:

- $k_E = 0,97$ (činitel indukovaného napětí)

Je dán poměrem indukované napětí statoru vůči jmenovitému, volba dle [1].

- $k_B = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1,11$ (činitel tvaru pole při nasycení zubů)

- $k_{v1} = 0,90$ (činitel statorového vinutí)

Předběžná volba dle [1], později bude upřesněn v 4.2.14

- $\alpha_\delta = \frac{2}{\pi} \cong 0,64$ (činitel pólového krytí)

Je dán výpočtem, společně s činitelem k_B takto uvažují sinusový průběh pole v mezeře dle [1] a zploštění křivky pole při nasycení zubů stroje.

- $B_{jho} = 1,5T$

- $zuby (stat. i rot.) = 2T$

- $B_\delta = 0,9T$ (vlastní předběžná volba indukci)

- $A = 45 \text{ kA/m}$ (volba lin. proud. hustoty – nižší z důvodu chlazení)

Předběžná volba dle [2], bude později upřesněna výpočtem v 4.4.4.

- $Q_1 = 48$

- $Q_2 = 36$ (volba počtu drážek)

Statorové vinutí má volený počet drážek v závislosti na velikosti vrtání stroje.

Rotorové vinutí musí mít vždy nižší počet drážek než statorové. Tento počet je dán tabulkově, dle [1] z důvodu stabilizace průběhu momentu stroje.

Počet pólpárů: (3.1.1)

$$p = \frac{60 \cdot f_1}{n_s} = \frac{60 \cdot 80}{2400} = 2$$

Volba vrtání: (3.1.2)

$$D_1 = 0,230 \text{ m}$$

Pólová rozteč: (3.1.3)

$$t_{p1} = \frac{\pi \cdot D_1}{2 \cdot p} = \frac{\pi \cdot 0,230}{2 \cdot 2} \cong 0,18064 \text{ m}$$

Vnitřní výkon stroje: (3.1.4)

$$P_i = P_2 \cdot \frac{k_E}{\eta \cdot \cos \varphi} = 120000 \cdot \frac{0,97}{0,9 \cdot 0,81} = 159670,782 \text{ VA}$$

Essonův činitel: (3.1.5)

$$C = \frac{\pi^2}{60 \cdot \sqrt{2}} \cdot A \cdot B_\delta \cdot k_{V1} = \frac{\pi^2}{60 \cdot \sqrt{2}} \cdot 45000 \cdot 0,9 \cdot 0,9 = 4239,66 \frac{\text{VA}}{\text{m}^3 \cdot \text{ot}}$$

Předběžná délka stroje: (3.1.6)

$$l_1 = \frac{P_i}{C \cdot D^2 \cdot n_s} = \frac{159670,782}{4239,66 \cdot 0,230^2 \cdot 2400} \cong 0,3 \text{ m}$$

3.2 Návrh vinutí:

Počet drážek na pól: (3.2.1)

$$Q_p = \frac{Q_1}{2 \cdot p} = \frac{48}{2 \cdot 2} = 12$$

Počet drážek na pól a fázi: (3.2.2)

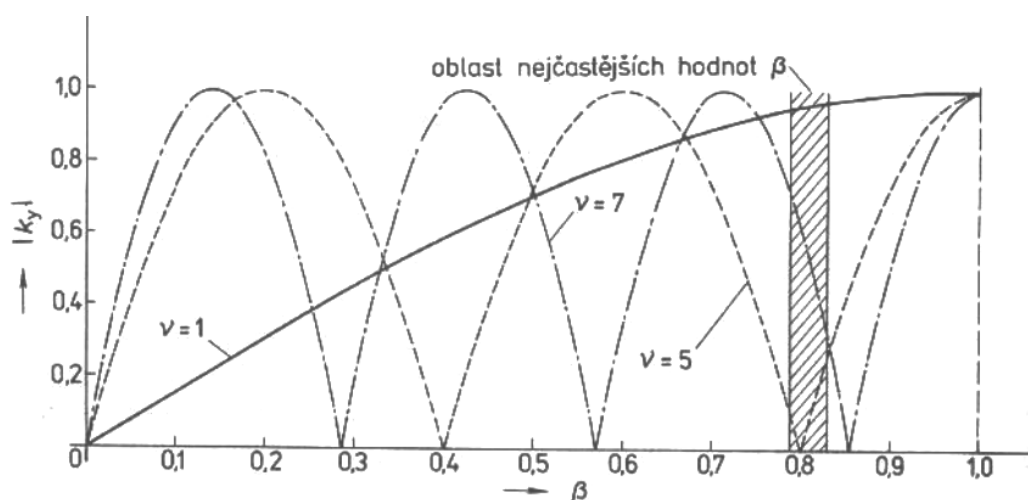
$$q = \frac{Q_1}{2 \cdot p \cdot m} = \frac{48}{2 \cdot 2 \cdot 3} = 4$$

Plný cívkový krok: (3.2.3)

$$y_{d1} = \frac{Q}{2p} = \frac{48}{4} = 12$$

- Krácení cívkového kroku pro co nejlepší potlačení 5. a 7. harmonické složky magnetického pole ve vzduchové mezeře a co nejvyšší zvýraznění 1. harmonické:

$$\beta \in (0,79 \text{ až } 0,833) \Rightarrow \text{pokud } y_{d1} = 10, \text{ pak } \beta = \frac{y_{d1}}{Q_p} = 0,833$$



(obr. 1. Volba β v závislosti na průběhu harmonických, převzato z [1])

Přední cívkový krok: (3.2.4)

$$y_1 = 2u \cdot y_{d1} + 1 = 2 \cdot 10 + 1 = 21$$

$2u = 2$, jedná se dvouvrstvé vinutí

Krok na fiktivním komutátoru: (3.2.5)

$$y_k = \frac{a}{p} = \frac{2}{2} = 1$$

Počet paralelních větví vinutí $a = 2$, vzhledem k podmínce:

[$a \leq 2p$; $\frac{Q_1}{a} = \text{celé číslo}$; $\frac{2p}{a} = \text{celé číslo}$]

Spojkový krok (3.2.6)

$$y_2 = 2 \cdot y_k - y_1 = 2 \cdot 1 - 21 = -19$$

Počet fázových svazků: (3.2.7)

$$S_c = 2 \cdot m \cdot a = 2 \cdot 3 \cdot 2 = 12$$

Počet svazků na fázi: (3.2.8)

$$f_f = \frac{S_c}{m} = \frac{12}{3} = 4$$

Počet cívek ve svazku: (3.2.9)

$$K_1 = \frac{Q}{2 \cdot m \cdot a} = \frac{48}{2 \cdot 3 \cdot 2} = 4$$

Šířka Tingleyho schématu: (3.2.10)

$$\frac{n}{c} = 4, \text{ pak: } Q_p = \frac{3 \cdot n}{c} = \frac{3 \cdot 8}{2} = \frac{24}{2} = 12 \text{ sloupců}$$

Tingleyho schéma, které později poslouží pro definování zapojení vinutí ve FEMM software:

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

(tab. 2 Tingleyho schéma)

Číslo nahoře v každém řádku tabulky je první vrstva vinutí, číslo pod ním druhá vrstva vinutí. Kromě jednotlivých fází se musí ve vinutí po obvodu statoru střídát také paralelní větve, zapojení vinutí je tady následující:

- první vrstva:

AAAA C_pC_pC_pC_p BBBB A_pA_pA_pA_p CCCC B_pB_pB_pB_p
 AAAA C_pC_pC_pC_p BBBB A_pA_pA_pA_p CCCC B_pB_pB_pB_p

- druhá vrstva se zkráceným krokem o 2:

AA C_pC_pC_pC_p BBBB A_pA_pA_pA_p CCCC B_pB_pB_pB_p
 AAAA C_pC_pC_pC_p BBBB A_pA_pA_pA_p CCCC B_pB_pB_pB_pAA

Drážková rozteč statoru: (3.2.11)

$$t_{d1} = \frac{\pi \cdot D_1}{2 \cdot p \cdot m \cdot q} = \frac{\pi \cdot 0,230}{2 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4} \cong 0,01505 \text{ m}$$

Činitel kroku vinutí: (3.2.12)

$$k_y = \sin\left(\frac{y_{d1}}{Q_p} \cdot \frac{\pi}{2}\right) = \sin\left(\frac{10}{12} \cdot \frac{\pi}{2}\right) = 0,965926$$

Činitel rozlohy vinutí: (3.2.13)

$$k_r = \frac{0,5}{q \cdot \sin\left(\frac{30^\circ}{q}\right)} = \frac{0,5}{4 \cdot \sin\left(\frac{30^\circ}{4}\right)} = 0,957662$$

Skutečný činitel vinutí pro 1 harmonickou: (3.2.14)

$$k_{V1} = k_y \cdot k_r = 0,925$$

3.3 Výpočet proudů:

Jmenovitý proud motoru: (3.3.1)

$$I_n = \frac{P_2}{\sqrt{3} \cdot U_1 \cdot \cos\varphi \cdot \eta} = \frac{120000}{\sqrt{3} \cdot 640 \cdot 0,91 \cdot 0,81} = 148,5 \text{ A}$$

Proud paralelní větví: (3.3.2)

$$I_a = \frac{I_n}{a} = \frac{148,495}{2} = 74,248 \text{ A}$$

Předběžný počet efektivních vodičů v drážce bez paralelních větví: (3.3.3)

$$V_{d'} = \frac{\pi \cdot D_1 \cdot A}{I_n \cdot Q_1} = \frac{\pi \cdot 0,230 \cdot 45000}{148,495 \cdot 48} \cong 4,562 \gg 5 \text{ vodičů v drážce pro jednu vrstvu vinutí}$$

Předběžný počet efektivních vodičů v drážce pro $a = 2$: (3.3.4)

$$V_d = V_{d'} \cdot a = 9,1236 \gg 10 \text{ vodičů v drážce celkem na obě vrstvy vinutí.}$$

Počet závitů v jedné fázi vinutí: (3.3.5)

$$N_{S1} = \frac{V_d \cdot Q_1}{2 \cdot a \cdot m_1} = \frac{10 \cdot 48}{2 \cdot 2 \cdot 3} = 40$$

Celkový počet elementárních vodičů v jedné drážce: (n_p volím 1) (3.3.6)

$$V_{dp} = N_p \cdot V_d = 1 \cdot 10 = 10$$

3.4 Určení magnetického toku a upřesnění volených veličin:

Určení magnetického toku: (3.4.1)

$$\Phi = \frac{U_{nf} \cdot k_E}{4 \cdot N_{S1} \cdot f_1 \cdot k_B \cdot k_{V1}} = \frac{\frac{640}{\sqrt{3}} \cdot 0,97}{4 \cdot 40 \cdot 80 \cdot 1,11 \cdot 0,925} = 0,02727106 \text{ Wb}$$

Přepočít indukce ve vzduchové mezeře dle předběžné délky stroje: (3.4.2)

$$B_{\delta k} = \frac{\Phi}{\alpha_{\delta} \cdot t_{p1} \cdot l_1} = \frac{0,02727106}{0,64 \cdot 0,18064 \cdot 0,3} = 0,7863 \text{ T}$$

Přepočít lineární proudové hustoty: (3.4.3)

$$A_{upr} = \frac{2 \cdot m \cdot N_{S1} \cdot I_n}{\pi \cdot D_1} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 40 \cdot 148,495}{\pi \cdot 0,230} = 49322,67807 \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

Přepočít Essonova činitele: (3.4.4)

$$C = \frac{\pi^2}{60} \cdot \alpha_{\delta} \cdot A_{upr} \cdot B_{\delta} \cdot k_B \cdot k_{V1} = \frac{\pi^2}{60} \cdot 0,64 \cdot 49322,67807 \cdot 0,9 \cdot 1,11 \cdot 0,925 = \\ = 4798,4031 \frac{\text{VA}}{\text{m}^3 \cdot \text{ot}}$$

Upřesnění délky stroje: (3.4.5)

$$l_1 = \frac{P_i}{D_1^2 \cdot n_s \cdot C} = \frac{159670,78189}{0,2302 \cdot 2400 \cdot 4798,4031} \cong 0,2621 \text{ m}$$

Nová velikost indukce ve vzduchové mezeře po úpravě délky stroje: (3.4.6)

$$B_\delta = \frac{\theta}{\alpha_\delta \cdot t_{p1} \cdot l_1} = \frac{0,02727106}{0,64 \cdot 0,18064 \cdot 0,2621} = 0,9 \text{ T} \gg \text{shoda s volenou hodnotou pro konečnou délku magnetického obvodu } 0,2621 \text{ m}$$

3.5 Výpočet rozměrů drážek a vodičů statoru:

Po konzultaci, volím hodnotu součinu A·J tak, aby hodnota proudové hustoty v drážce byla přibližně rovna $J = 5 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$ z důvodu horšího chlazení statoru v uzavřeném stroji. (3.5.1)

$$J = \frac{AJ}{A} = \frac{2,4 \cdot 10^{11}}{49322,678066} \cong 5 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$$

Průřez jednoho vodiče v drážce: (3.5.2)

$$S_{ef} = \frac{I_a}{J} = \frac{74,24772}{5} \cong 14,9 \text{ mm}^2$$

Počet efektivních vodičů je roven počtu elementárních vodičů. Což odpovídá vodiči o rozměrech 7,1 x 2,1 mm neizolovanému, zvětšení průřezu jsem provedl záměrně z důvodu toho, že vodič nebude mít dokonale obdélníkový tvar a vodič libovolných rozměrů dnes není problém vyrobit.

Průřez všech vodičů v drážce: (3.5.3)

$$S_c = V_d \cdot S_{ef} = 10 \cdot 14,9 = 149 \text{ mm}^2$$

Šířka zubu statoru při vrtání: (3.5.4)

$$b_{z1\min} = \frac{t_{d1} \cdot B_\delta}{B_{z1} \cdot k_{FE}} = \frac{0,01505 \cdot 0,9}{2 \cdot 0,97} \cong 0,00698202 \text{ m}$$

Upraveno na 0,0068535 m, kvůli rozšíření drážky pro volený rozměr vodiče a zároveň dosažení volené indukce v hlavě zubu stanovené na 2T.

U trakčních strojů, které mají vinutí statoru z měděných pásů, se používá výhradně drážka s rovnoběžnými stěnami, tj. zub má tvar lichoběžníku s největší šířkou při své základně a nejnižší uvnitř statoru (b_{z1min}).

Šířka drážky tedy: (3.5.5)

$b_{d1} = t_{d1} - b_{z1min} = 0,01505 - 0,0068535 \cong 0,0082$ m, kontrola výpočtu rozměrů:

$$\frac{(0,0082 \cdot 48) + (0,0068535 \cdot 48)}{\pi} = 230 \text{ mm (vrtání stroje)}$$

Výška jha statoru: (3.5.6)

$$h_{j1} = \frac{\theta}{2 \cdot B_{j1} \cdot l_1 \cdot k_{FE}} = \frac{0,02727106}{2 \cdot 1,5 \cdot 0,2621 \cdot 0,97} \cong 0,036 \text{ m}$$

Upraveno na $h_{j1} = 0,0455$ m z důvodu zvětšení plochy jha. Plochu jha statoru je nutné zvětšit z důvodu použití ventilačních kanálů.

Rozměry izolace vodičů na šířku: (3.5.7)

Rozměr izolovaného vodiče na šířku: 7,1 mm. Tj. na cívkovou izolaci a vyložení drážky zbývá $8,2 \text{ mm} - 7,1 \text{ mm} = 1,1 \text{ mm}$ tj. 0,55 mm z každé strany na papírové vyložení drážky, bílou tkanici a kapton (0,05 mm), kterým jsou jednotlivé vodiče cívky izolovány. Papír na vyložení drážky má tloušťku 0,2 mm tj. 0,3 mm zbývá na několik závitů bílé tkanice na každé straně, která má tloušťku 0,1 mm. U nízkonapěťových motorů má tkanice 4 závity, aby též nedocházelo k pohybům cívky.

Rozměry izolace vodičů na výšku pod klínem a určení výšky drážky:

Rozměr vodiče na výšku: 2,1 mm. Tj. výška deseti vodičů je 21 mm. Výška klínu je 2mm standardně. Klín je pod úrovní zubu 1mm. Papír, kterým je drážka vyložena, je pod klínem stočen, tak aby jím cívka byla celá obtočena. Tj. po sečtení těchto hodnot volím celkovou výšku drážky $h_{d1} = 28$ mm celkem, (25mm pod klínem) s ohledem na technologickou vůli 1mm, $h_{d1} = 21 + (0,05 \cdot 2 \cdot 10) + (2 \cdot 0,2) + (4 \cdot 0,1 \cdot 4)$ mm přičemž v první závorce je zohledněn rozměr kaptonu, v druhé rozměr papírového vyložení a ve třetí závorce 4x4 závity bílé tkanice.

Šířka základny zubu a šířka zubu v $\frac{1}{3}$ a $\frac{1}{2}$ délky: (3.5.8)

$$b_{z1\max} = t_{d1} \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot h_{d1}}{D_1}\right) - b_{d1} = 0,01505 \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot 0,028}{0,230}\right) - 0,0082 \cong 0,01051 \text{ m}$$

$$b_{z1(1/3)} = t_{d1} \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot h_{d1}}{3 \cdot D_1}\right) - b_{d1} = 0,01505 \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot 0,028}{3 \cdot 0,230}\right) - 0,0082 \cong 0,008071 \text{ m}$$

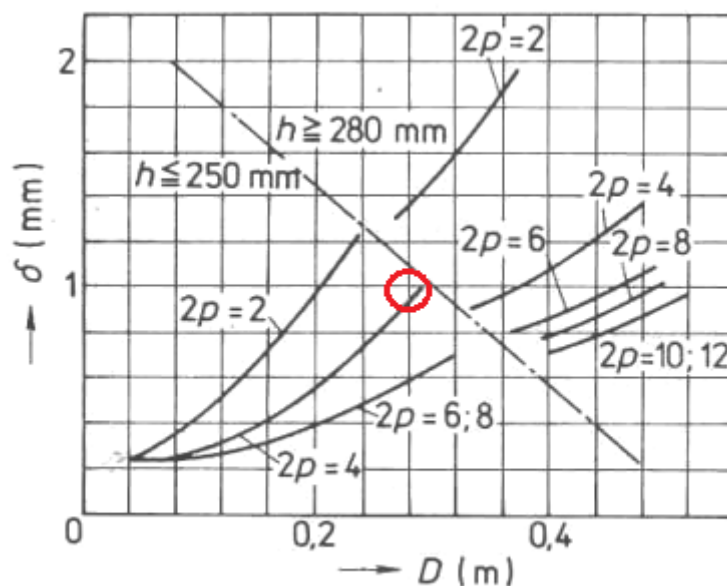
$$b_{z1(1/2)} = t_{d1} \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot h_{d1}}{2 \cdot D_1}\right) - b_{d1} = 0,01505 \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot 0,028}{2 \cdot 0,230}\right) - 0,0082 \cong 0,008682 \text{ m}$$

Vnější průměr magnetického obvodu: (3.5.9)

$$D_e = D_1 + 2 \cdot h_{j1} + 2 \cdot h_{d1} = 0,23 + 2 \cdot 0,04 + 2 \cdot 0,028 = 0,377 \text{ m}$$

Vzduchovou mezeru stanovují na 1 mm.

Dle grafu závislosti na průměru vrtání a počtu pólů v [1].



(obr. 2 Graf pro volbu délky vzduchové mezery se znázorněním bodu pro tento stroj, převzato z [1])

3.6 Návrh rotoru:

Vnější průměr rotoru: (3.6.1)

$$D_2 = D_1 - 2 \cdot \delta = 0,23 - 2 \cdot 0,001 = 0,228 \text{ m}$$

Délka tyčí rotoru: (3.6.2)

$$l_t = l_1 + 0,002 = 0,2721 \text{ m}$$

Přidáno 0,5cm na každou stranu z důvodu chlazení.

Proudový převod stroje: (3.6.3)

$$p_i = \frac{2 \cdot m_1 \cdot N_{s1} \cdot k_{v1}}{Q_2} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 40 \cdot 0,925}{36} = 6,166871$$

Proud v tyči: (3.6.4)

$$I_t = k_i \cdot p_i \cdot I_n = 0,85 \cdot 6,166871 \cdot 148,49544 = 778,3894 \text{ A}$$

Volba $k_i=0,85$ dle Kopylova str. 222 závislost k_i na $\cos(\varphi)$

Činitel přepočtu proudů v kruhu na proud v tyči: (3.6.5)

$$\Delta = 2 \cdot \sin \frac{\pi \cdot p}{Q_2} = 2 \cdot \sin \frac{\pi \cdot 2}{36} = 0,3473$$

Proud kruhem nakrátko: (3.6.6)

$$I_{kn} = \frac{I_t}{\Delta} = \frac{778,3894}{0,3473} = 2241,3 \text{ A}$$

Průřezy tyčí a kruhů: (3.6.7)

Nejprve volím proudovou hustotu v tyčích $J_2 = 5 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$ a proudovou hustotu v kruzích o 20% menší než v tyčích z důvodu zajištění druhotné funkce kruhů nakrátko a to odvodu tepla z tyčí tj. $J_{kn} = 4 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$. Proudová hustota v rotoru je opět nižší z důvodu horšího chlazení v uzavřeném stroji.

- Průřez tyče:

$$S_t = \frac{I_t}{J_2} = \frac{778,3894}{5} \cong 155,7 \text{ mm}^2$$

- Průřez kruhu nakrátko:

$$S_{kn} = \frac{I_{kn}}{J_{kn}} = \frac{2241,2829}{4} \cong 560,32 \text{ mm}^2 \text{ průřez kruhu nakrátko}$$

Drážková rozteč rotoru: (3.6.8)

$$t_{d2} = \frac{\pi \cdot D_2}{Q_2} = \frac{\pi \cdot 0,228}{36} \cong 0,019897 \text{ m}$$

Šířka zubu: (3.6.9)

$$b_{z2} = \frac{B_\delta \cdot t_{d2}}{B_{z2} \cdot k_{FE}} = \frac{0,9 \cdot 0,019897}{2 \cdot 0,97} \cong 0,00923 \text{ m}$$

Šířka drážky při povrchu: (3.6.10)

Otevření drážky $b_0 = 2,75 \text{ mm}$ a vzdálenosti od povrchu $h_p = 3 \text{ mm}$. Na základě vypočtené šířky a výšky drážky vychází její průřez $S_d = 167,9456 \text{ mm}^2$, vypočítaný průřez rotorové tyče je $S_t = 155,7 \text{ mm}^2$. Kruhy jsou mechanicky upevněny pouze pájením k tyčím. Zbýlých 12 mm^2 je z technologických důvodů nutná rezerva pro zasunutí tyče a jejího upevnění. Rotorová tyč ve tvaru lichoběžníku je ve svazku rotorových plechů mechanicky upevněna tak, že v zařízení jsou vždy dvě tyče naproti sobě roztemovány pomocí kotoučů, čímž se v drážce roztáhnou do stran a nelze již s nimi pohybovat. Tyč zcela vyplňuje prostor drážky.

$$B_{d2\max} = \frac{\pi \cdot (D_2 - 2 \cdot h_p)}{Q_2} - b_{z2} = \frac{\pi \cdot (0,228 - 2 \cdot 0,003)}{36} - 0,009231 \cong 0,010143 \text{ m}$$

Šířka drážky uvnitř rotoru: (3.6.11)

S ohledem na průřez tyče volím výšku drážky $h_{d2} = 20 \text{ mm}$.

$$b_{d2\min} = \frac{\pi \cdot (D_2 - 2 \cdot h_p - 2 \cdot h_{d2})}{Q_2} - b_{z2} = \frac{\pi \cdot (0,228 - 2 \cdot 0,003 - 2 \cdot 0,02)}{36} - 0,009231 \cong 0,0066512 \text{ m}$$

Šířka rotorové drážky ve dvou třetinách: (3.6.12)

$$b_{d(2/3)} = \frac{\pi \cdot (D_2 - 2 \cdot h_p - 2 \cdot (\frac{2}{3} \cdot h_{d2}))}{Q_2} - b_{z2} = \frac{\pi \cdot (0,228 - 2 \cdot 0,003 - 2 \cdot (\frac{2}{3} \cdot 0,02))}{36} - 0,009231 \cong 0,00782 \text{ m}$$

Rozměry kruhu nakrátko: (3.6.13)

Výška volena dle vztahu v [1] $a_{kn} \approx 1,1 \cdot h_{d2}$ tj.: $a_{kn} = 0,022 \text{ m}$

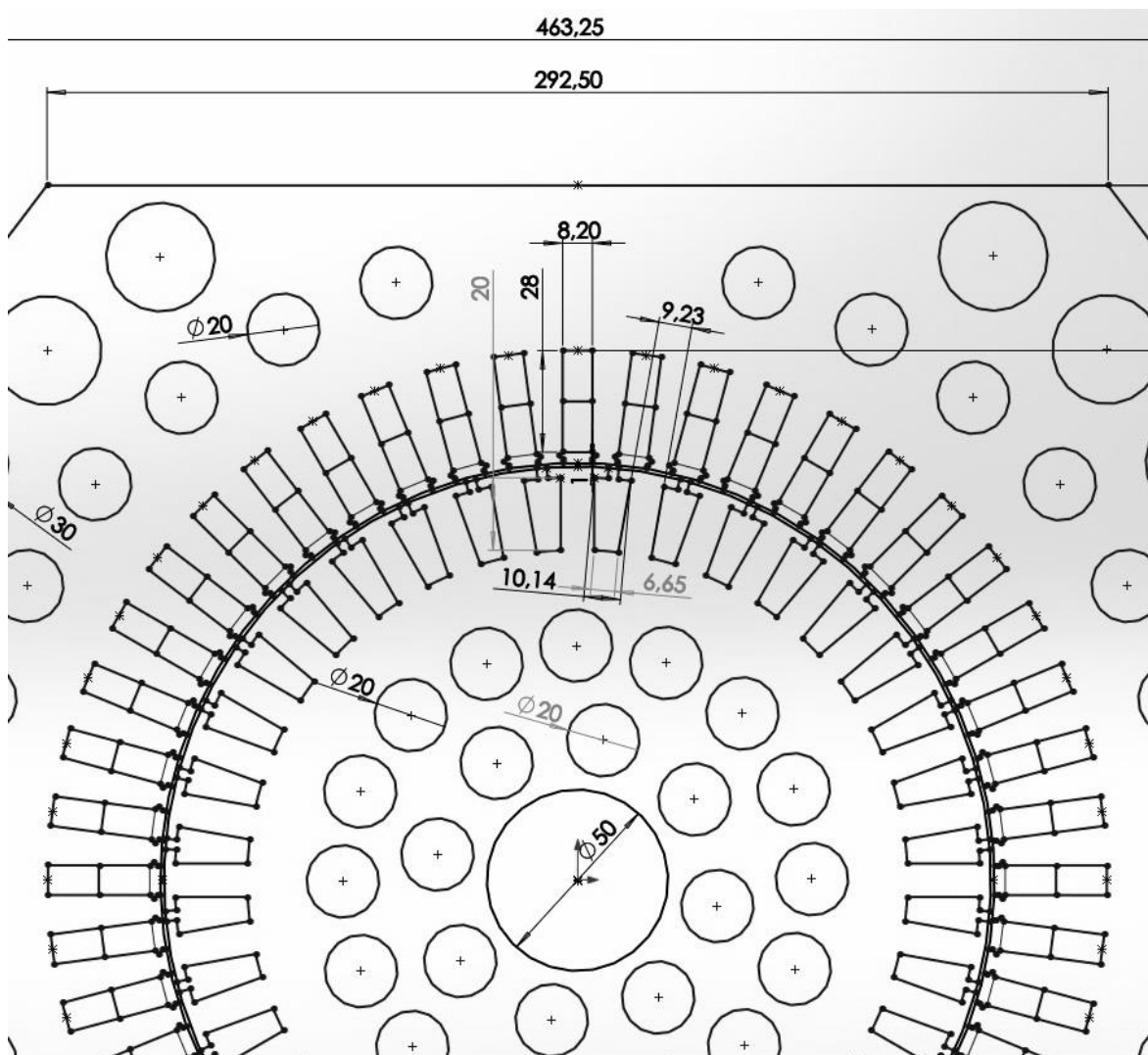
Šířka je tedy $b_{kn} = \frac{S_{kn}}{a_{kn}} = \frac{560,321 \cdot 10^{-6}}{0,022} \cong 0,0255 \text{ m}$

Volba průměru hřídele pod magnetickým obvodem rotoru: (3.6.14)

Volím $D_h = 0,05 \text{ m}$ vzhledem k předpokládanému momentu stroje a ploše ventilačních kanálů v rotoru, pak:

$$h_{j2} \text{ (výška jha rotoru)} = \frac{D_2 - D_h}{2} - (h_{d2} + h_p) = \frac{0,228 - 0,04}{2} - (0,02 + 0,003) = 0,066 \text{ m}$$

Následující obrázek ukazuje geometrické uspořádání drážek a jha statoru a rotoru dle výše uvedených výpočtů. Ventilační kanály jsou v nejužším místě jha statoru záměrně vynechány kvůli lokálnímu přesycování magnetického obvodu. Celkový pohled na plechy stroje je v kapitole ověření, obr. 18.



(obr. 3 Geometrie stroje - výřez)

3.7 Výpočet magnetického obvodu:

Indukce v nejširším místě statorového zubu: (3.7.1)

$$B_{z1\max} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{d1}}{b_{z1\min} \cdot k_{FE}} = \frac{0,9 \cdot 0,01505}{0,01051 \cdot 0,97} \cong 1,32864 \text{ T}$$

$$\text{Čemuž odpovídá intenzita } H_{z1\max} \cong 330,117 \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

Indukce statorového zubu uvnitř statoru: (3.7.2)

$$B_{z1\min} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{d1}}{b_{z1\max} \cdot k_{FE}} = \frac{0,9 \cdot 0,01505}{0,0068535 \cdot 0,97} \cong 2,04 \text{ T}$$

$$\text{Čemuž odpovídá intenzita } H_{z1\min} \cong 9372,522 \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

Indukce v $\frac{1}{3}$ výšky zubu: (3.7.3)

$$B_{z1(1/3)} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{d1}}{b_{z1} \cdot k_{FE}} = \frac{0,9 \cdot 0,01505}{0,008017 \cdot 0,97} \cong 1,73 \text{ T}$$

$$\text{Čemuž odpovídá intenzita } H_{z1/3} \cong 1658,908 \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

Indukce v $\frac{1}{2}$ výšky zubu: (3.7.4)

$$B_{z1(1/2)} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{d1}}{b_{z1} \cdot k_{FE}} = \frac{0,9 \cdot 0,01505}{0,008682 \cdot 0,97} \cong 1,0608 \text{ T}$$

$$\text{Čemuž odpovídá intenzita } H_{z1/2} \cong 936,887 \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

Indukce ve jhu statoru: (3.7.5)

$$B_{j1} = \frac{\theta}{2 \cdot h_{j1} \cdot l_1 \cdot k_{FE}} = \frac{0,02727}{2 \cdot 0,0445 \cdot 0,2621 \cdot 0,97} \cong 1,179 \text{ T}$$

$$\text{Čemuž odpovídá intenzita } H_{j1} \cong 249,5052 \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

Indukce v zubu rotoru: (3.7.6)

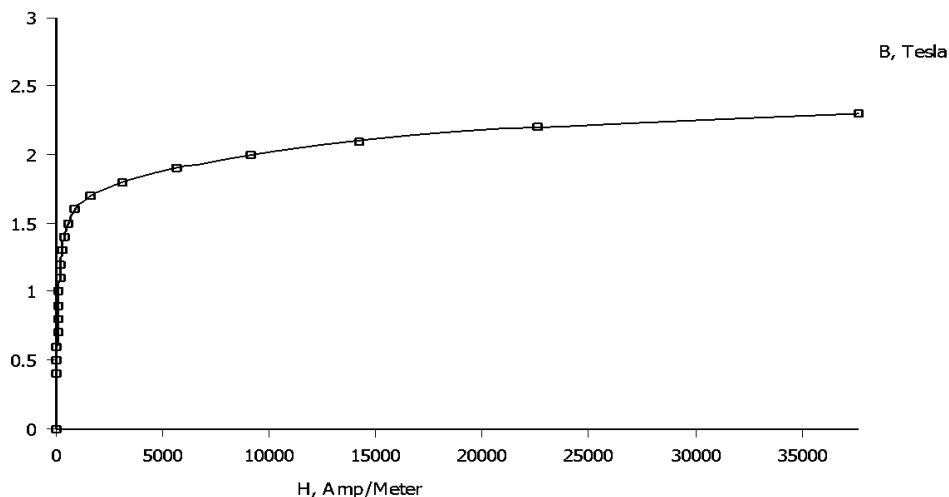
$$B_{z2} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{d2}}{b_{z2} \cdot k_{FE}} = \frac{0,9 \cdot 0,0199}{0,009231 \cdot 0,97} = 2 \text{ T}$$

Čemuž odpovídá intenzita $H_{z2} \cong 9200 \frac{\text{A}}{\text{m}}$

Indukce ve jhu rotoru: (3.7.7)

$$B_{j2} = \frac{\theta}{2 \cdot h_{j2} \cdot l_1 \cdot k_{FE}} = \frac{0,02727}{2 \cdot 0,071 \cdot 0,2621 \cdot 0,97} = 0,813$$

Čemuž odpovídá intenzita $H_{j2} \cong 123,93 \frac{\text{A}}{\text{m}}$



(obr. 4 Magnetizační charakteristika plechů)

Na tomto obrázku, je ukázána magnetizační charakteristika elektrotechnických plechů č. 2411 dle [1]. Odečet byl proveden přepsáním bodů charakteristiky do programu Microsoft Excel, kde byly body proloženy polynomem 6. stupně z důvodu přesnosti aproximace. Tento graf je již výsledkem definice plechů v software FEMM pomocí kterého bude analytický návrh v další části práce ověřován. Za obrázkem následuje další fáze výpočtu magnetického obvodu.

Výpočet Carterova činitele pro zohlednění drážkování: (3.7.8)

- Stator:

$$\gamma_1 = \frac{\left(\frac{b_{d1}}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{b_{d1}}{\delta}} = \frac{\left(\frac{0,0082}{0,001}\right)^2}{5 + \frac{0,0082}{0,001}} = 5,0939394;$$

$$k_{c1} = \frac{t_{d1}}{t_{d1} - \gamma_1 \cdot \delta} = \frac{0,01505}{0,0155 - 5,0939394 \cdot 0,001} = 1,5115$$

- Rotor:

$$\gamma_2 = \frac{\left(\frac{b_0}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{b_0}{\delta}} = \frac{\left(\frac{0,00275}{0,001}\right)^2}{5 + \frac{0,00275}{0,001}} = 0,97581$$

$$k_{c2} = \frac{t_{d2}}{t_{d2} - \gamma_2 \cdot \delta} = \frac{0,019897}{0,019897 - 0,97581 \cdot 0,001} = 1,05157$$

- Výsledný Carterův činitel:

$$k_c = k_{c1} \cdot k_{c2} = 1,5115 \cdot 1,05157 = 1,589414$$

Magnetické napětí vzduchové mezery: (3.7.9)

$$U_{m\delta} = \frac{2}{\mu_0} \cdot B_\delta \cdot \delta \cdot k_c = \frac{2}{4\pi \cdot 10^{-7}} \cdot 0,9 \cdot 0,001 \cdot 1,589414 = 2276,687 \text{ A}$$

Intenzita magnetického pole ve vzduchové mezeře: (3.7.10)

$$H_\delta = \frac{B_\delta}{\mu_0} = \frac{0,9}{4\pi \cdot 10^{-7}} = 716203,4987 \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

Aproximace lichoběžníkového tvaru zubu statoru na obdélníkový: (3.7.11)

$$\begin{aligned} H_{z1} &= \frac{1}{6} \cdot \left(H_{z1\max} + 4 \cdot H_{z\frac{1}{2}} + H_{z1\min} \right) = \\ &= \frac{1}{6} \cdot (330,117 + 4 \cdot 936,887 + 9372,522) = 2241,7 \frac{\text{A}}{\text{m}} \end{aligned}$$

Magnetomotorické napětí zubů statoru: (3.7.12)

$$U_{mz1} = 2 \cdot h_{d1} \cdot H_{z1} = 2 \cdot 0,028 \cdot 2241,7 = 125,54 \text{ A}$$

Magnetomotorické napětí zubů rotoru: (3.7.13)

$$U_{mz2} = 2 \cdot h_{d2} \cdot H_{z2} = 2 \cdot 0,02 \cdot 9200,0475 = 368,002 \text{ A}$$

Činitel nasycení zubů: (3.7.14)

$$k_z = 1 + \frac{U_{mz1} + U_{mz2}}{U_{m\delta}} = 1 + \frac{126,46 + 368,002}{2276,687} = 1,21678$$

Dle [1] vychází zuby optimálně nasycené vzhledem k hodnotě činitele.

Střední délky magnetických siločar: (3.7.15)

$$l_{j1} = \frac{\pi \cdot (D_e - h_{j1})}{2p} = \frac{\pi \cdot (0,377 - 0,0455)}{4} = 0,26 \text{ m}$$

$$l_{j2} = \frac{\pi \cdot (D_h + h_{j2})}{2p} = \frac{\pi \cdot (0,05 + 0,066)}{4} = 0,0911 \text{ m}$$

Magnetomotorické napětí jha statoru a rotoru: (3.7.16)

$$U_{mj1} = l_{j1} \cdot H_{j1} = 0,26 \cdot 249,505 = 64,96 \text{ A}$$

$$U_{mj2} = l_{j2} \cdot H_{j2} = 0,0911 \cdot 123,926 = 11,29 \text{ A}$$

Magnetomotorické napětí na pólovou dvojici: (3.7.17)

$$F_m = U_{m\delta} + U_{mz1} + U_{mz2} + U_{mj1} + U_{mj2} = 2846,47 \text{ A}$$

Magnetizační proud: (3.7.18)

$$I_\mu = \frac{p \cdot U_m}{0,9 \cdot m \cdot k_{v1} \cdot N_{s1}} = \frac{2 \cdot 2846,475}{0,9 \cdot 3 \cdot 0,925 \cdot 40} = 56,98 \text{ A}$$

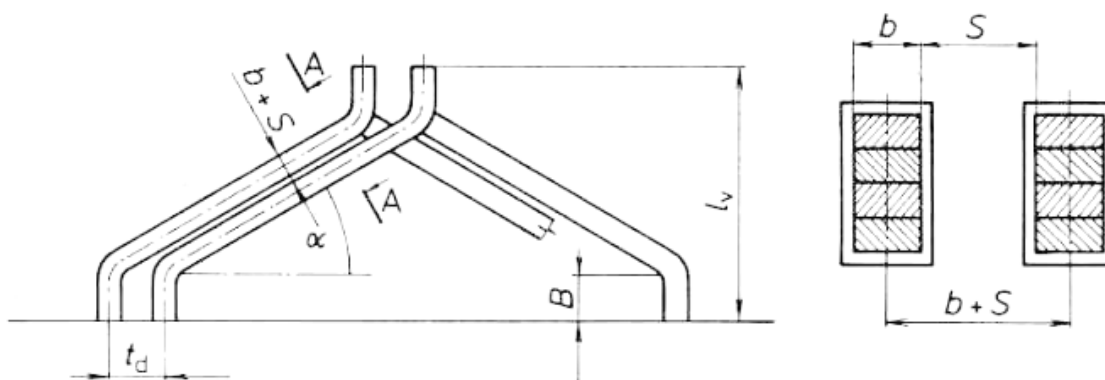
Magnetizační reaktance: (3.7.19)

$$X_\mu = \frac{k_E \cdot U_{nf}}{I_\mu} = \frac{0,97 \cdot 369,5042}{56,98} \cong 6,3 \text{ } \Omega \text{ tj.: } L_\mu = 0,01251 \text{ H}$$

3.8 Odpor, rozptyly a reaktance:

Před určením činného odporu bylo nutné dodefinovat další rozměrové partie cívek. Šířka neizolovaného vodiče je již z předchozích výpočtů stanovena na 7,1mm. Vzdálenost S mezi sousedními cívkami dle [1], tab. 6.20 stanovují na $S = 3,5\text{mm}$ (závisí na jmenovitém napětí stroje) a délku přímé části na výstupu z drážky na $B = 2,5\text{cm}$. Nejprve je dle [1] potřeba stanovit činitel K_v dle [1], který je použit pro další výpočty:

$$K_v = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{0,0071 + 0,0035}{0,01505}\right)^2}} \cdot \left(\frac{0,0071 + 0,0035}{0,01505}\right) = 0,496080527$$



(obr. 5 Tvar cívek stroje, převzato z [1])

Výpočet střední šířky cívky: (3.8.1)

$$b_c = \frac{\pi \cdot (D_1 + h_{d1})}{2p} \cdot \frac{y_{d1}}{Q_p} = \frac{\pi \cdot (0,23 + 0,028)}{4} \cdot \frac{10}{12} = 0,16886 \text{ m}$$

Výška čela (znázorněno v obr. 3): (3.8.2)

$$l_v = K_v \cdot b_c + B - \frac{h_{d1}}{2} = 0,496080527 \cdot 0,16886 + 0,025 - \frac{0,028}{2} = 0,09477 \text{ m}$$

Délka čela od drážky k drážce: (3.8.3)

$$l_{\check{c}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{0,0071 + 0,0035}{0,01505}\right)^2}} \cdot b_c + 2 \cdot B + h_{d1} =$$

$$= \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{0,0071 + 0,0035}{0,01505}\right)^2}} \cdot 0,16886 + 2 \cdot 0,025 + 0,028 = 0,31587 \text{ m}$$

Střední délka jednoho závitu vinutí: (3.8.4)

$$l_{av} = 2 \cdot (l_{\check{c}} + l_1) = 2 \cdot (0,31587 + 0,2621) = 1,15594 \text{ m}$$

Celková délka vodičů jedné fáze vinutí: (3.8.5)

$$l_{v1} = l_{av} \cdot N_{s1} = 1,15594 \cdot 40 = 46,2374 \text{ m}$$

*Činný odpor jedné fáze vinutí statoru
je zde počítán pro rezistivitu mědi při 180°C:* (3.8.6)

$$R_1 = \rho_{\text{cu } 180^\circ\text{C}} \cdot \frac{l_{v1}}{S_{\text{vodič}} \cdot a} = 2,84 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{46,2374}{149 \cdot 10^{-7} \cdot 2} = 0,044065 \text{ m}\Omega$$

Střední průměr rotorových kruhů: (3.8.7)

$$D_{kn} = D_2 - a_k = 0,0228 - 0,022 = 0,0008 \text{ m}$$

Činný odpor jednoho rotorového kruhu při teplotě 180°C: (3.8.8)

$$R_{kn} = \rho_{\text{cu } 180^\circ\text{C}} \cdot \frac{\pi \cdot D_{kn}}{Q_2 \cdot S_{kn}} = 2,84 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{\pi \cdot 0,0008}{36 \cdot 560,32 \cdot 10^{-6}} = 9,11 \cdot 10^{-7} \Omega$$

Činný odpor tyče rotoru: (3.8.9)

$$R_t = \rho_{\text{cu } 180^\circ\text{C}} \cdot \frac{l_t}{S_t} = 2,84 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,2721}{155,6778 \cdot 10^{-6}} = 4,96 \cdot 10^{-5} \Omega$$

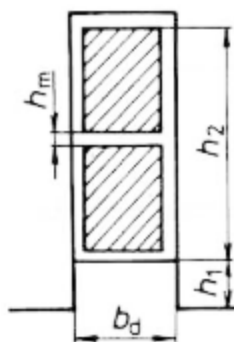
Činný odpor jedné fáze rotoru nakrátko: (3.8.10)

$$R_2 = R_t + 2 \cdot \frac{R_k}{\Delta^2} = 4,96 \cdot 10^{-5} + 2 \cdot \frac{9,11 \cdot 10^{-7}}{0,3473^2} = 6,475 \cdot 10^{-5} \Omega$$

Činný odpor jedné fáze rotoru přepočtený ku statoru: (3.8.11)

$$R'_2 = 4 \cdot R_2 \cdot m \cdot \frac{(k_{v1} \cdot N_{s1})^2}{Q_2} = 4 \cdot R_2 6,475 \cdot 10^{-5} \cdot 3 \cdot \frac{(0,925 \cdot 40)^2}{36} = 0,02955 \Omega$$

Dále následují výpočty rozptylů. K tomu využijí empirické vztahy, průběhy a činitele z [1]. Zde následuje vyobrazení statorové drážky s vysvětlením dále použitých rozměrových hodnot a následně činitelů.



(obr. 6 Statorová drážka, převzato z [1])

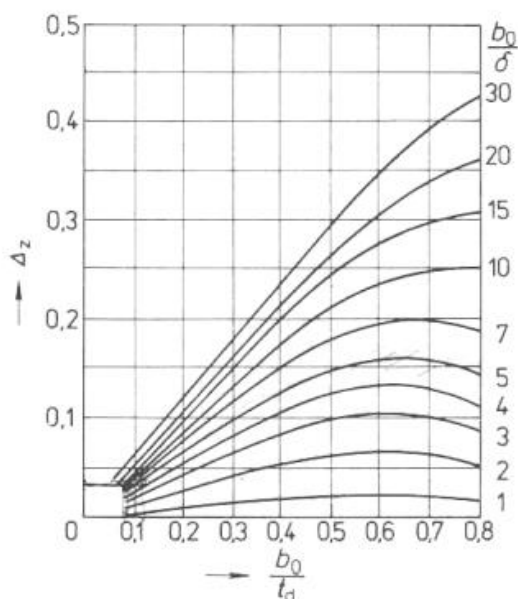
Hodnoty rozměrových veličin (vycházející z dříve uvedených rozměrů kaptonu a bílé tkanice) jsou tedy následující: (3.8.12)

- $h_m = (2 \cdot 0,05 + 4 \cdot 0,1 \cdot 2) = 0,9 \text{ mm}$
- $h_1 = 3 \text{ mm}$
- $h_2 = (2,1 \cdot 10 + 4 \cdot 0,1 \cdot 3 + 0,05 \cdot 2 \cdot 10) = 23,2 \text{ mm}$

Hodnoty činitelů, které bylo nutné odečíst aproximací následující charakteristiky jsou tyto: (jedná se tedy o průběh činitele Δ_z závislého na drážkování potřebného k výpočtu činitelů magnetické vodivosti diferenčního rozptylu statoru a rotoru 34che, to je zase potřeba k dopočtu prvků náhradního 34chemata). (3.8.13)

- $\Delta_{z1} = 0,22$ pro $\frac{b_{d1}}{t_{d1}} = 0,545$ a $\frac{b_{d1}}{\Delta} = 8,2$
- $\Delta_{z2} = 0,5$ pro $\frac{b_0}{t_{d2}} = 0,138$ a $\frac{b_0}{\Delta} = 2,75$

Průběh charakteristiky činitele Δ_z :



(obr. 7 Průběh činitele Δ_z , převzato z [1])

Dále tedy:

Činitel pro výpočet diferenčního rozptylu: (3.8.14)

- statorového vinutí:

$$\begin{aligned} \xi_1 &= \left[\left(2 \cdot \frac{t_{d2}}{t_{d1}} - \frac{t_{d1}}{t_{d2}} \cdot \Delta_{z1} \right) \cdot 0,25 \cdot \left(1 + 3 \cdot \left(0,25 \cdot \left(1 + 3 \cdot \frac{y_{d1}}{Q_p} \right) \right) \right) \right] - \left[k_{v1} \cdot \left(\frac{t_{d2}}{t_{d1}} \right)^2 \right] = \\ &= \\ & \left[\left(2 \cdot \frac{0,019897}{0,01505} - \frac{0,01505}{0,019897} \cdot 0,22 \right) \cdot 0,25 \cdot \left(1 + 3 \cdot \left(0,25 \cdot \left(1 + 3 \cdot \frac{10}{12} \right) \right) \right) \right] - \left[0,925 \cdot \right. \\ & \left. \left(\frac{0,019897}{0,01505} \right)^2 \right] = 0,62862 \end{aligned}$$

- rotorového vinutí:

$$\xi_2 = 1 + \frac{1}{5} \cdot \left(\frac{\pi \cdot p}{Q_2} \right)^2 - \frac{\Delta_{z2}}{1 - \left(\frac{p}{Q_2} \right)^2} = 1 + \frac{1}{5} \cdot \left(\frac{\pi \cdot 2}{36} \right)^2 - \frac{0,5}{1 - \left(\frac{2}{36} \right)^2} = 0,504544$$

Činitel magnetické vodivosti drážek: (3.8.15)

- drážek statoru:

$$\begin{aligned} \lambda_{d1} &= \left[\frac{h_2 - h_m}{3 \cdot b_{d1}} \cdot 0,25 \cdot \left(1 + 3 \cdot \left(0,25 \cdot \left(1 + 3 \cdot \frac{y_{d1}}{Q_p} \right) \right) \right) \right] + \\ &+ \left[\frac{h_1}{b_{d1}} \cdot \left(0,25 \cdot \left(1 + 3 \cdot \frac{y_{d1}}{Q_p} \right) \right) \right] + \frac{h_m}{4 \cdot b_{d1}} = \\ &= \left[\frac{0,0232 - 0,009}{3 \cdot 0,0082} \cdot 0,25 \cdot \left(1 + 3 \cdot \left(0,25 \cdot \left(1 + 3 \cdot \frac{10}{12} \right) \right) \right) \right] + \\ &+ \left[\frac{0,003}{0,0082} \cdot \left(0,25 \cdot \left(1 + 3 \cdot \frac{10}{12} \right) \right) \right] + \frac{0,009}{4 \cdot 0,0082} = 1,117632 \end{aligned}$$

- drážek rotoru:

$$\lambda_{d2} = \frac{\frac{h_{d2}}{3}}{3 \cdot b_{d2}} + \frac{h_1}{b_0} = \frac{\frac{0,0133}{3}}{3 \cdot 78,155 \cdot 10^{-4}} + \frac{0,003}{0,00275} = 1,659565$$

Činitel magnetické vodivosti rozptylu čel: (3.8.16)

- čel statoru:

$$\begin{aligned} \lambda_{\check{c}1} &= 0,34 \cdot \frac{q}{l_1} \cdot \left(l_{\check{c}} - 0,64 \cdot \frac{y_{d1}}{Q_p} \cdot t_{p1} \right) = 0,34 \cdot \frac{4}{0,2621} \cdot \left(0,31587 - 0,64 \cdot \frac{10}{12} \cdot 0,18064 \right) \\ &= 1,13912 \end{aligned}$$

- kruhů rotoru:

$$\begin{aligned} \lambda_{\check{c}2} &= \frac{2,3 \cdot D_{kn}}{Q_2 \cdot l_2 \cdot \Delta^2} \cdot \log \left(\frac{4,7 \cdot D_{kn}}{2 \cdot (a_{kn} + b_{kn})} \right) = \\ &= \frac{2,3 \cdot 0,206}{36 \cdot 0,261 \cdot 0,3473^2} \cdot \log \left(\frac{4,7 \cdot 0,206}{2 \cdot (0,022 + 0,0255)} \right) = 0,42 \end{aligned}$$

Činitel magnetické vodivosti diferenčního rozptylu: (3.8.17)

- statorového vinutí:

$$\lambda_{\text{dif1}} = \frac{t_{d1}}{12 \cdot \delta \cdot k_c} \cdot \xi_1 = \frac{0,01505}{12 \cdot 0,001 \cdot 1,5894} \cdot 0,62862 = 0,496$$

- rotorového vinutí:

$$\lambda_{\text{dif2}} = \frac{t_{d2}}{12 \cdot \delta \cdot k_c} \cdot \xi_2 = \frac{0,019897}{12 \cdot 0,001 \cdot 1,5894} \cdot 0,504544 = 0,526343$$

Rozptylová reaktance: (3.8.18)

- statoru:

$$\begin{aligned} X_{1\sigma} &= 15,8 \cdot \frac{f_1}{100} \cdot \left(\frac{N_{s1}}{100}\right)^2 \cdot \frac{l_2}{p \cdot q} \cdot (\lambda_{\text{dif1}} + \lambda_{\xi_1} + \lambda_{d1}) = \\ &= 15,8 \cdot \frac{80}{100} \cdot \left(\frac{40}{100}\right)^2 \cdot \frac{0,2621}{4 \cdot 2} \cdot (0,496 + 1,13912 + 1,117632) = 0,182394 \end{aligned}$$

- rotoru přepočtená na stator: (3.8.19)

$$\begin{aligned} X'_{2\sigma} &= 31,6 \cdot f_1 \cdot l_1 \cdot m_1 \cdot (\lambda_{\text{dif2}} + \lambda_{\xi_2} + \lambda_{d2}) \cdot 10^{-6} \cdot \frac{(N_{s1} \cdot k_{v1})^2}{Q_2} = \\ &= 31,6 \cdot 80 \cdot 0,2621 \cdot 3 \cdot (0,526343 + 0,42 + 1,659565) \cdot 10^{-6} \cdot \frac{(40 \cdot 0,925)^2}{36} = \\ &= 0,19698 \Omega \end{aligned}$$

3.9 Výpočet hlavních ztrát:

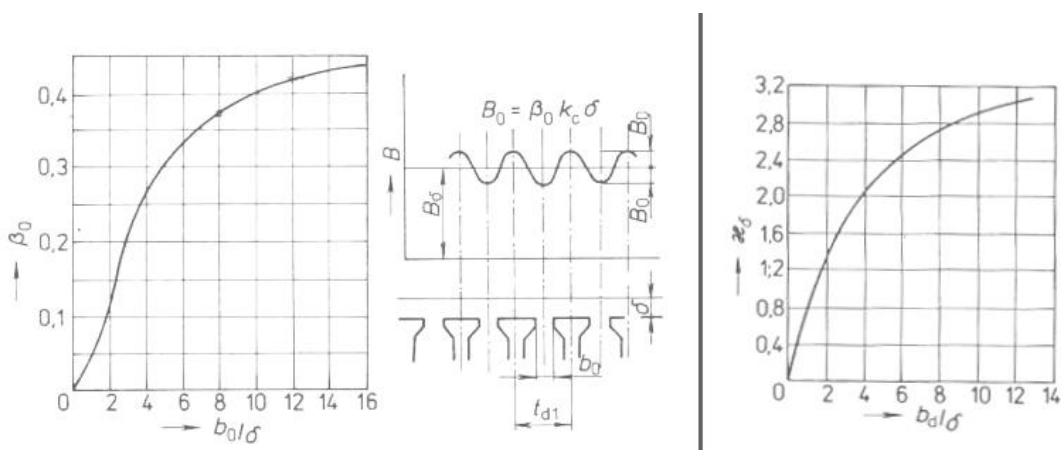
Následuje výpočet hlavních ztrát pro teplotu 180°C, tyto ztráty samotné ještě nejsou ztráty celkové. Neboť přídavné ztráty v drážkách a čelech (dodatečné ztráty při zatížení) a ztráty způsobené chodem ventilátorů bude možné určit v následující části práce – výpočtu oteplení. Proto ověření celkové účinnosti a sestavení náhradního schématu provedu až v části ověření analytického návrhu.

Nejprve je potřeba určit několik činitelů:

- $\rho_{fe} = 7850 \frac{kg}{m^3}$ měrná hmotnost železa
- $\Delta p_{fe} = 1,6 \frac{W}{kg}$ ztráty použitých plechů při indukci 1,5T dle [1]
- $\beta = 1,3$ exponent pro výpočty dle druhu použitých plechů [1]
- $\kappa_{\delta} = 2,75$ činitel náhradního otevření drážky dle [1]
- $\beta_{01} = 2,75$
- $\beta_{02} = 8,2$ činitelé závislé na velikosti otevření drážek v poměru ku šířce vzduchové mezeře, slouží pro určení ztrát z pulzace pole v mezeře
- $k_{01} = k_{02} = 1,75$ činitelé opracování povrchu hlav zubů

Na následujícím obrázku jsou závislosti, dle kterých byly odečteny činitele

κ_{δ} a β_{0x} :



(obr. 8 Závislosti činitelů pro výpočet ztrát, převzato z [1])

Nyní k výpočtu:

Výpočet hmotností částí stroje: (3.9.1)

- statorových zubů:

$$m_{z1} = \left[\frac{(b_{z1min} + b_{z1max}) \cdot h_{d1}}{2} - v_k \right] \cdot l_1 \cdot Q_1 \cdot k_{fe} \cdot \rho_{fe} =$$

$$= \left[\frac{(0,0068535 + 0,01051) \cdot 0,028}{2} - 1 \cdot 10^{-6} \right] \cdot 0,02621 \cdot 48 \cdot 0,97 \cdot$$

$$\cdot 7850 = 23,19 \text{ kg}$$

- rotorových zubů: (3.9.2)

$$m_{z2} = [b_{z2} \cdot h_{d1} + h_p \cdot (t_{d2} - b_0)] \cdot l_2 \cdot Q_2 \cdot k_{fe} \cdot \rho_{fe} =$$

$$= [0,0092306 \cdot 0,02 + 0,003 \cdot (0,019897 - 0,00275)] \cdot 0,02621 \cdot 36 \cdot 0,97 \cdot 7850 =$$

$$= 16,96 \text{ kg}$$

- jha statoru zvětšeného o ventilační kanály vnitřní: (3.9.3)

$$m_{j1} = \left[\pi \cdot \left(\frac{D_e}{2} \right)^2 - \pi \cdot \left(\frac{D_e - h_{j1}}{2} \right)^2 \right] \cdot l_1 \cdot k_{fe} \cdot \rho_{fe} =$$

$$= \left[\pi \cdot \left(\frac{0,377}{2} \right)^2 - \pi \cdot \left(\frac{0,377 - 0,0455}{2} \right)^2 \right] \cdot 0,02621 \cdot 0,97 \cdot 7850 = 50,53 \text{ kg}$$

Výpočet hlavních ztrát v železe statoru: (3.9.4)

- ztráty v zubech statoru:

$$\Delta P_{fez1} = \Delta p_{fe} \cdot \left(\frac{B_{z2}}{1,5} \right)^2 \cdot \left(\frac{f_1}{50} \right)^\beta \cdot m_{z1} = 1,6 \cdot \left(\frac{1,6084}{1,5} \right)^2 \cdot \left(\frac{50}{50} \right)^{1,3} \cdot 23,19 = 78,6 \text{ W}$$

- ztráty ve jhu statoru:

$$\Delta P_{fej1} = \Delta p_{fe} \cdot \left(\frac{B_{j1}}{1,5} \right)^2 \cdot \left(\frac{f_1}{50} \right)^\beta \cdot m_{j1} = 1,6 \cdot \left(\frac{1,1788}{1,5} \right)^2 \cdot \left(\frac{80}{50} \right)^{1,3} \cdot 50,53 \text{ kg} = 91,98 \text{ W}$$

Hlavní ztráty v železe se počítají pouze pro stator, pro rotor nikoliv neboť z důvodu malé frekvence proudů v obvodu rotoru se plechy mění magnetizaci velice pomalu. Tyto ztráty jsou výrazné pouze při rozběhu.

Nejprve před výpočtem amplitud pulzací pole v zubech je nutné udělat mezivýpočet koeficientů zohledňujících otevření drážek: (3.9.5)

- pro stator:

$$\begin{aligned} \gamma_1 &= \frac{\left[\frac{\frac{b_{d1}}{\kappa_\delta} \cdot \left(1 + \frac{0,5 \cdot t_{d1}}{b_{d1} \cdot t_{d1} + \kappa_\delta} \right)}{\delta} \right]^2}{5 + \left(\frac{\frac{b_{d1}}{\kappa_\delta} \cdot \left(1 + \frac{0,5 \cdot t_{d1}}{b_{d1} \cdot t_{d1} + \kappa_\delta} \right)}{\delta} \right)} = \\ &= \frac{\left[\frac{0,0082}{2,75} \cdot \left(1 + \frac{0,5 \cdot 0,01505}{0,0082 \cdot 0,01505 + 2,75} \right) \right]^2}{5 + \left(\frac{0,0082}{2,75} \cdot \left(1 + \frac{0,5 \cdot 0,01505}{0,0082 \cdot 0,01505 + 2,75} \right) \right)} = 1,11889724 \end{aligned}$$

- pro rotor:

$$\gamma_2 = \frac{\left(\frac{b_0}{\delta} \right)^2}{5 + \left(\frac{b_0}{\delta} \right)} = \frac{\left(\frac{0,00275}{0,001} \right)^2}{5 + \left(\frac{0,00275}{0,001} \right)} = 0,9758065$$

Výpočet amplitudy pulzací pole v zubech: (3.9.6)

- statoru:

$$B_{p1} = \frac{\gamma_2 \cdot \delta}{2 \cdot t_{d1}} \cdot B_{z\frac{1}{2}} = \frac{0,9758065 \cdot 0,001}{2 \cdot 0,01505} \cdot 1,6084 = 0,052142 \text{ T}$$

- rotoru:

$$B_{p2} = \frac{\gamma_1 \cdot \delta}{2 \cdot t_{d2}} \cdot B_{z2} = \frac{1,11889724 \cdot 0,001}{2 \cdot 0,019897} \cdot 2 = 0,05623467 \text{ T}$$

Pulzní ztráty v zubech: (3.9.7)

- statoru:

$$\Delta P_{p1} = 0,11 \cdot \left(\frac{Q_2 \cdot n_s}{1000} \cdot B_{p1} \right)^2 \cdot m_{z1} = 0,11 \cdot \left(\frac{36 \cdot 2400}{1000} \cdot 0,052142 \right)^2 \cdot 23,191 = 51,77 \text{ W}$$

- rotoru:

$$\Delta P_{p2} = 0,11 \cdot \left(\frac{Q_1 \cdot n_s}{1000} \cdot B_{p2} \right)^2 \cdot m_{z2} = 0,11 \cdot \left(\frac{48 \cdot 2400}{1000} \cdot 0,05623467 \right)^2 \cdot 16,96 = 78,29 \text{ W}$$

Hustota povrchových ztrát: (3.9.8)

- statoru:

$$p_{\delta p1} = 0,5 \cdot k_{01} \cdot \left(\frac{Q_2 \cdot n_s}{10000} \right)^{1,5} \cdot (B_{01} \cdot t_{d2} \cdot 10^3)^2 = 0,5 \cdot 1,75 \cdot \left(\frac{36 \cdot 2400}{10000} \right)^{1,5} \cdot (0,019897 \cdot 0,2861 \cdot 10^3)^2 = 720,08 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

- rotoru:

$$p_{\delta p2} = 0,5 \cdot k_{02} \cdot \left(\frac{Q_1 \cdot n_s}{10000} \right)^{1,5} \cdot (B_{02} \cdot t_{d1} \cdot 10^3)^2 = 0,5 \cdot 1,75 \cdot \left(\frac{48 \cdot 2400}{10000} \right)^{1,5} \cdot (0,01505 \cdot 0,5436 \cdot 10^3)^2 = 2289,778 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Povrchové ztráty: (3.9.9)

- statoru:

$$\Delta P_{\delta p1} = p_{\delta p1} \cdot (t_{d1} - b_{d1}) \cdot Q_1 \cdot l_1 = 720,08 \cdot (0,01505 - 0,0082) \cdot 48 \cdot 0,2621 = 62,0546 \text{ W}$$

- rotoru:

$$\Delta P_{\delta p2} = p_{\delta p2} \cdot (t_{d2} - b_0) \cdot Q_2 \cdot l_2 = 2289,778 \cdot (0,019897 - 0,00275) \cdot 36 \cdot 0,2621 = 370,464 \text{ W}$$

Celkové ztráty v železe: (3.9.10)

$$\Delta P_{fe} = \Delta P_{fez1} + \Delta P_{fej1} + \Delta P_{\delta p1} + \Delta P_{\delta p2} + \Delta P_{p1} + \Delta P_{p2} = 733,16 \text{ W}$$

Hlavní Jouleovy ztráty: (3.9.11)

- statoru:

$$\Delta P_{j1} = m_1 \cdot I_n^2 \cdot R_1 = 3 \cdot 148,495^2 \cdot 0,044065 = 2915,03 \text{ W}$$

- rotoru:

$$\Delta P_{j2} = m_1 \cdot I_n^2 \cdot R_2' = 3 \cdot 148,495^2 \cdot 0,02955 = 1954,68 \text{ W}$$

- celkové:

$$\Delta P_j = \Delta P_{j1} + \Delta P_{j2} = 4869,7133 \text{ W}$$

Mechanické ztráty pro stroje s radiální ventilací dle empirického vztahu v [1]:

(3.9.12)

$$\Delta P_{\text{mech}} = 1,2 \cdot 2p \cdot t_p^3 \cdot (m_{\text{vk ext}} + 11) \cdot 10^3 = 1,2 \cdot 4 \cdot t_p^3 \cdot (22 + 11) \cdot 10^3 = 933,67 \text{ W}$$

Následuje tabulka s přehledem zde vypočtených ztrát. Přídavné Jouleovy ztráty v drážkách a čelech přičítané též k celkové účinnosti budou určeny při výpočtu oteplení. ΔP_{fep} je součtem povrchových a pulzních ztrát. ΔP_{celk} je součtem všech ztrát v tabulce uvedených.

ΔP_{mech}	ΔP_{j1}	ΔP_{j2}	ΔP_{fe}	ΔP_{fep}	ΔP_{celk}
933,67 W	2915,03 W	1954,68 W	733,16 W	526,59 W	6536,55 W

(tab. 3 Souhrn hlavních ztrát)

3.10 Výpočet oteplení:

Jedná se o přibližný výpočet oteplení za použití středních hodnot součinitelů přestupu tepla, vychází se z již určených ztrát pro 180°C. Koeficient K a jeho střední hodnotu volím $K = 0,2$ dle tabulek [1], jedná se o koeficient, který udává poměr mezi ztrátovým tepelným výkonem, který odchází do vnitřku stroje a tím, který odchází rovnou do okolního prostředí. Součinitel přestupu tepla $\alpha_1 = 130 \frac{\text{W}}{\text{m}^3 \cdot \text{K}}$, $\alpha_v = 70 \frac{\text{W}}{\text{m}^3 \cdot \text{K}}$ pro stator, pro rotor $\alpha_2 = 160 \frac{\text{W}}{\text{m}^3 \cdot \text{K}}$. Jednostranná tlouška izolace je $b_{11} = 0,0006 \text{m}$.

Počet vnitřních ventilačních kanálů je $m_{\text{vk int}} = 28$ a jejich průměr $d_{\text{vk int}} = 0,02 \text{m}$, ochlazovací povrch je tedy $S_{\text{ch1 int}} \cong 0,576 \text{m}^2$. Počet vnějších ventilačních kanálů je $m_{\text{vk ext}} = 22$ a jejich průměr $d_{\text{vk ext}} = 0,03 \text{m}$, ochlazovací povrch je tedy $S_{\text{ch1 ext}} \cong 0,543 \text{m}^2$ (plocha vnějších ventilačních kanálů). Počet rotorových ventilačních kanálů je $m_{\text{vk2}} = 24$ a průměr $d_{\text{vk2}} = 0,02 \text{m}$, tj.: $S_{\text{ch2}} = 0,395 \text{m}^2$.

Elektrické ztráty ve vinutí statoru: (3.10.1)

- v drážkách:

$$\Delta P'_{\text{jd1}} = \Delta P_{\text{j1}} \cdot \frac{2 \cdot l_1}{l_{\text{av1}}} = 2915,03 \cdot \frac{2 \cdot 0,2621}{1,559} = 1321,91 \text{ W}$$

- v čelech:

$$\Delta P'_{\text{jč1}} = \Delta P_{\text{j1}} \cdot \frac{2 \cdot l_{\text{č1}}}{l_{\text{av1}}} = 2915,03 \cdot \frac{2 \cdot 0,31587}{1,559} = 1593,12 \text{ W}$$

Oteplení vnitřního povrchu statorového svazku nad teplotou uvnitř stroje: (3.10.2)

$$\Delta \vartheta_{\text{pov1}} = K \cdot \frac{\Delta P'_{\text{jd1}} + \Delta P_{\text{feh}}}{\pi \cdot D_1 \cdot l_1 \cdot \alpha_1} = 0,2 \cdot \frac{1321,91 + 170,5745}{\pi \cdot 0,230 \cdot 0,2621 \cdot 130} = 12,12 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Teplotní spád v izolaci: (3.10.3)

- v drážkové části vinutí:

$$\Delta\theta_{id1} = \frac{\Delta P'_{jd1} \cdot b_{i1}}{Q_1 \cdot l_1 \cdot (2 \cdot h_d + b_d) \cdot 0,16} = \frac{1321,91 \cdot 0,0006}{48 \cdot 0,2621 \cdot (2 \cdot 0,0082 + 0,028) \cdot 0,16} = 5,44 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- na tloušťce izolace čel:

$$\Delta\theta_{ič1} = \frac{\Delta P'_{jč1} \cdot b_{i1}}{Q_1 \cdot l_{č1} \cdot (2 \cdot h_d + b_d) \cdot 0,32} = \frac{1593,12 \cdot 0,0006}{48 \cdot 0,31587 \cdot (2 \cdot 0,0082 + 0,028) \cdot 0,32} = 2,72 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Oteplení vnějšího povrchu izolace čel vinutí nad teplotou vzduchu uvnitř stroje: (3.10.4)

$$\Delta\theta_{povč1} = \frac{\Delta P'_{jč1} \cdot K}{\alpha_1 \cdot l_{v1} \cdot D_1 \cdot 2 \cdot \pi} = \frac{1593,12 \cdot 0,2}{130 \cdot 0,09477 \cdot 0,230 \cdot 2 \cdot \pi} = 17,89 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Střední oteplení statorového vinutí nad teplotou vzduchu uvnitř stroje: (3.10.5)

$$\Delta\theta'_1 = \frac{(\Delta\theta_{pov1} + \Delta\theta_{id1}) \cdot 2 \cdot l_1 + (\Delta\theta_{ič1} + \Delta\theta_{povč1}) \cdot 2 \cdot l_{č1}}{l_{av1}} = \frac{(12,12 + 5,44) \cdot 2 \cdot 0,2621 + (2,72 + 17,89) \cdot 2 \cdot 0,31587}{1,1559} = 19,23 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Určení ztrát do vzduchu uvnitř stroje s vyloučením příkonu ventilátorů: (3.10.6)

$$\begin{aligned} \Sigma \Delta P'_v &= \Delta P_{celk} - (1 - K) \cdot (\Delta P'_{jd1} + \Delta P_{feh}) - 0,9 \cdot P_{mech} = \\ &= 6536,55' - (1 - 0,2) \cdot (1321,91 + 170,5745) - 0,9 \cdot 933,67 = 4502,25 \text{ W} \end{aligned}$$

Oteplení vzduchu uvnitř stroje nad teplotou okolního vzduchu: (3.10.7)

$$\Delta\theta_v = \frac{\Sigma \Delta P'_v}{S_{ch1 \text{ ext}} \cdot \alpha_v} = \frac{4502,25}{0,54345 \cdot 70} = 118,35 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Střední oteplení statorového vinutí nad teplotou okolního vzduchu: (3.10.8)

$$\Delta\theta_1 = \Delta\theta'_1 + \Delta\theta_v = 19,23 + 118,35 = 137,59 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Elektrické ztráty ve vinutí rotoru: (3.10.9)

- v drážkách:

$$\Delta P'_{jd2} = \Delta P_{j2} \cdot \frac{2 \cdot l_2}{l_t + 2 \cdot \left(\frac{\pi \cdot D_{kn}}{Q_2} \right)} = 1954,683 \cdot \frac{2 \cdot 0,2621}{0,2721 + 2 \cdot \left(\frac{\pi \cdot 0,206}{36} \right)} = 3326,18 \text{ W}$$

- v kruzích:

$$\Delta P'_{j\check{c}2} = \rho_{\theta} \cdot \frac{\pi \cdot D_{kn}}{S_{kn}} \cdot I_{kn}^2 = 2,84 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{\pi \cdot 0,206}{560,321 \cdot 10^{-6}} \cdot 2241,283^2 = 164,775 \text{ W}$$

Oteplení železa rotoru nad teplotou uvnitř stroje: (3.10.10)

$$\Delta \theta_{pov2} = \frac{\Delta P'_{jd2}}{S_{ch2} \cdot \alpha_2} = \frac{3326,18}{0,395 \cdot 160} = 52,59 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Oteplení vnějšího kruhu nakrátko čel nad teplotou vzduchu uvnitř stroje: (3.10.11)

$$\begin{aligned} \Delta \theta_{pov\check{c}2} &= \frac{\Delta P'_{j\check{c}2}}{2 \cdot \pi \cdot D_2 \cdot \left(\frac{l_t - l_2}{2} + b_k \right) \cdot \alpha_2} = \\ &= \frac{164,775}{2 \cdot \pi \cdot 0,228 \cdot \left(\frac{0,2721 - 0,2621}{2} + 0,02547 \right) \cdot 160} = 23,59 \text{ } ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Střední oteplení rotorového vinutí nad teplotou vzduchu ve stroji: (3.10.12)

$$\Delta \theta'_2 = \frac{\Delta \theta_{pov2} \cdot l_2 + \Delta \theta_{pov\check{c}2} \cdot \pi \cdot \frac{D_{kn}}{Q_2}}{l_t + 2 \cdot \left(\frac{\pi \cdot D_{kn}}{Q_2} \right)} = \frac{52,59 \cdot 0,2621 + 23,59 \cdot \pi \cdot \frac{0,206}{36}}{0,2721 + 2 \cdot \left(\frac{\pi \cdot 0,206}{36} \right)} = 46,13 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Střední oteplení rotorového vinutí nad teplotou okolí: (3.10.13)

$$\Delta \theta_2 = \Delta \theta'_2 + \Delta \theta_v = 46,13 + 118,35 = 164,48 \text{ } ^\circ\text{C}$$

3.10.1 Výpočet množství chladiva:

Činitel uvažující změnu chladících podmínek po délce povrchu kostry ofukované vnějším ventilátorem: (3.10.1.1)

$$k_m = 2,5 \cdot \sqrt{\frac{n}{100}} \cdot D_e = 2,5 \cdot \sqrt{\frac{2400}{100}} \cdot 0,377 = 7,52$$

Potřebný průtok vzduchu: (3.10.1.2)

- vnějšího ventilátoru určeného dle ztrát:

$$Q_v = \frac{k_m \cdot \Sigma P'_v}{1100 \cdot \Delta \vartheta_v} = \frac{7,52 \cdot 4502,25}{1100 \cdot 118,3522} = 0,26 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

- vnějšího ventilátoru určeného empiricky dle vnějšího průměru stroje, musí být větší než Q_v což je splněno:

$$Q'_v = 0,6 \cdot D_e^3 \cdot \frac{n}{100} = 0,6 \cdot 0,377^3 \cdot \frac{2400}{100} = 0,772 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

3.11 Ověření a dokončení analytického návrhu:

Celková účinnost, kde jsou započítány i Jouleovy ztráty v drážkách a čelech vzešlé z výpočtu oteplení: (3.11.1)

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_{\text{celk}} + \Delta P'_{jd1} + \Delta P'_{jdč1} + \Delta P'_{jd2} + \Delta P'_{jdč2}} = \frac{120000}{120000 + 12942,54} = 90,26 \%$$

Ztráty ve statoru naprázdno: (3.11.2)

$$\Delta P_{j0} = m_1 \cdot R_1 \cdot I_\mu^2 = 3 \cdot 56,98^2 \cdot 0,044065 = 429,27 \text{ W}$$

Proud R_{fe} : (3.11.3)

$$I_{fe} = \frac{\Delta P_{fe} + \Delta P_m + \Delta P_{j0}}{m_1 \cdot U_{nf}} = \frac{733,16 + 933,677 + 429,27}{3 \cdot \frac{640}{\sqrt{3}}} = 1,89 \text{ A}$$

Proud naprázdno: (3.11.4)

$$I_0 = \sqrt{I_{fe}^2 + I_\mu^2} = \sqrt{56,98^2 + 1,89^2} = 57,016 \text{ A}$$

Účinník naprázdno: (3.11.5)

$$\cos \varphi_0 = \frac{I_{fe}}{I_0} = \frac{1,89}{57,016} = 0,033$$

Odpor v náhradním schématu reprezentující ztráty v železe: (3.11.6)

$$R_{fe} = \frac{U_{nf} - I_0 \cdot (R_1 + X_{\sigma 1})}{I_{fe}} = \frac{\frac{640}{\sqrt{3}} - 57,016 \cdot (0,044065 + 0,1824)}{1,89} = 188,58 \Omega$$

Skluz zvratu: (3.11.7)

$$s_z = \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_{\sigma 1} + X'_{\sigma 2})^2}} = \frac{0,02955}{\sqrt{0,044065 + (0,1824 + 0,19698)^2}} = 0,077366 \text{ tj: cca } 7,7\% \text{ při}$$

$$f_{sz} = 6,189255 \text{ Hz}$$

Moment zvratu: (3.11.8)

$$M_z = \frac{p \cdot m_1 \cdot U_{nf}}{4 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot \left(R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_{\sigma 1} + X'_{\sigma 2})^2} \right)} =$$

$$= \frac{2 \cdot 3 \cdot \frac{640}{\sqrt{3}}}{4 \cdot \pi \cdot 80 \cdot (0,0440652 + \sqrt{0,0440652^2 + (0,1824 + 0,19698)^2})} =$$

$$= 1912,883 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Výpočet skluzu pro stav za tepla při plném výkonu: (3.11.9)

$$s = \frac{\Delta P_{j2}}{(P_2 + \Delta P) - (\Delta P_{j1} + \Delta P_{fe})} = \frac{1954,683}{(120000 + 12942,54) - (2915,03043 + 733,16)} =$$

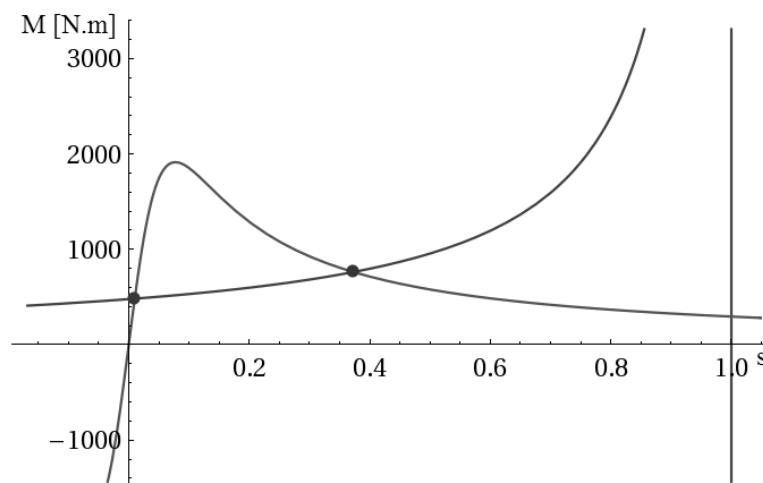
$$= \mathbf{0,01511 \text{ tj.: cca } 1,5\% \text{ při } f_s = 1,22\text{Hz}}$$

Výpočet skluzu pro stav za studena při plném výkonu: (3.11.10)

$$\frac{P_2}{\omega} = \frac{2 \cdot M_z}{\frac{s}{s_z} + \frac{s_z}{s}} \gg \frac{120000}{\frac{\pi}{30} \cdot (1-s) \cdot 2400} = \frac{2 \cdot 1912,88}{\frac{s}{0,0774} + \frac{0,0774}{s}} \gg$$

Z této rovnice vyjádřím s , čímž dostanu kvadratickou rovnici s kořeny:

- $s_1 = 0,00992$
- $s_2 = 0,373$, které mohou zobrazit na momentové charakteristice, přičemž správný je s_1 : v lineární části charakteristiky.



(Obr. 9 Poloha skluzu na momentové charakteristice)

Jmenovité otáčky: (3.11.11)

- za tepla:

$$N_{nt} = (1 - s) \cdot N_s = (1 - 0,01511) \cdot 2400 = 2363,72 \frac{\text{ot}}{\text{min}}$$

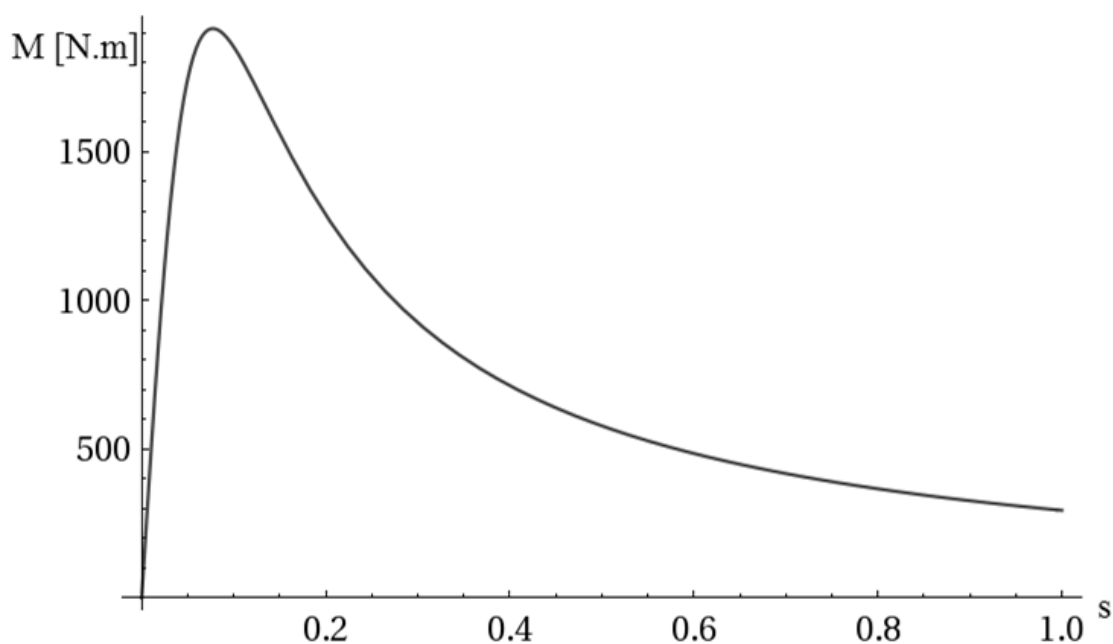
- za studena:

$$N_{ns} = (1 - s) \cdot N_s = (1 - 0,00992) \cdot 2400 = 2376,192 \frac{\text{ot}}{\text{min}}$$

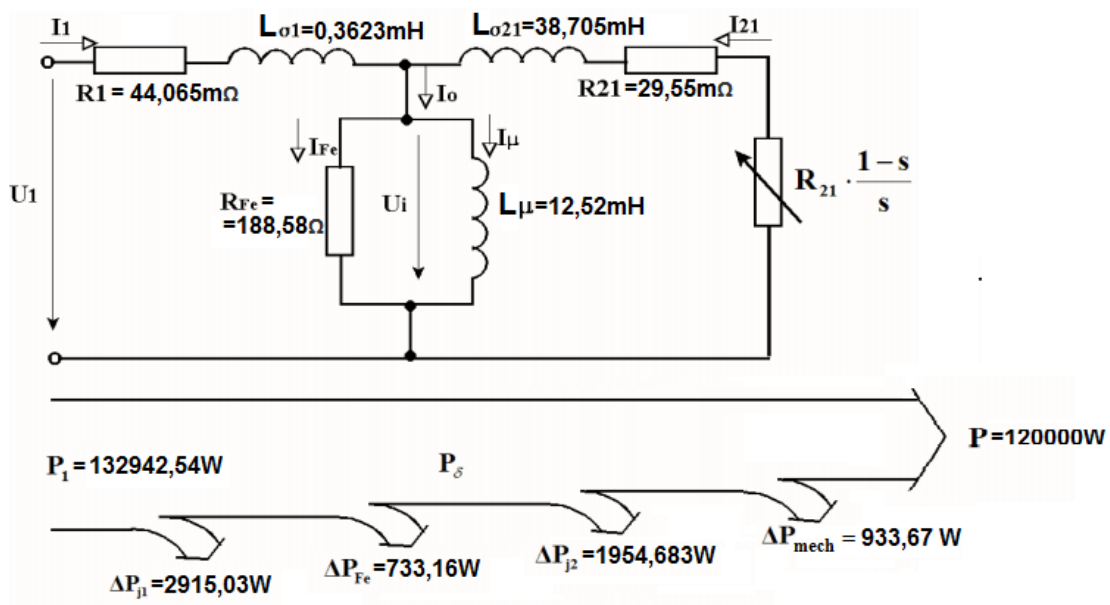
Jmenovitý moment: (3.11.12)

$$M_n = \frac{P_2}{\omega_n} = \frac{120000}{\frac{\pi}{30} \cdot (1 - s) \cdot 2400} = 477,465 \text{ N} \cdot \text{m}$$

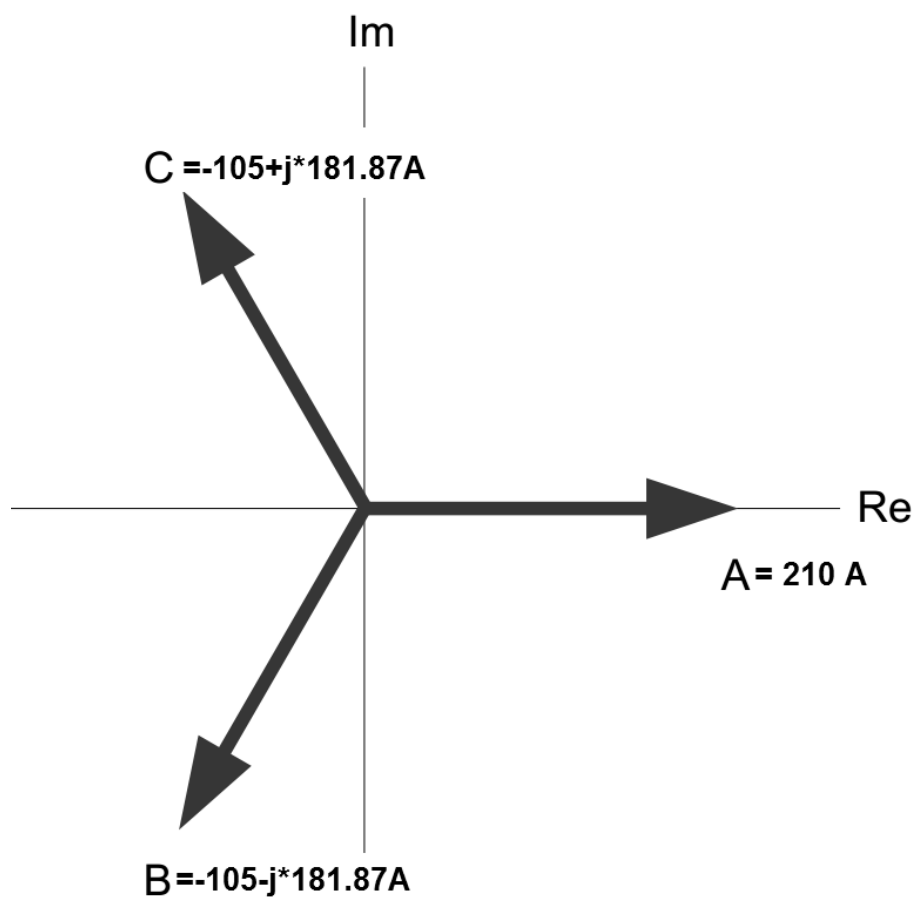
Následuje několik obrázků, nejprve momentová charakteristika z Klossova vztahu, poté náhradní schema a výsledky simulace ve FEMM software. Poté shrnutí dosažených výsledků.



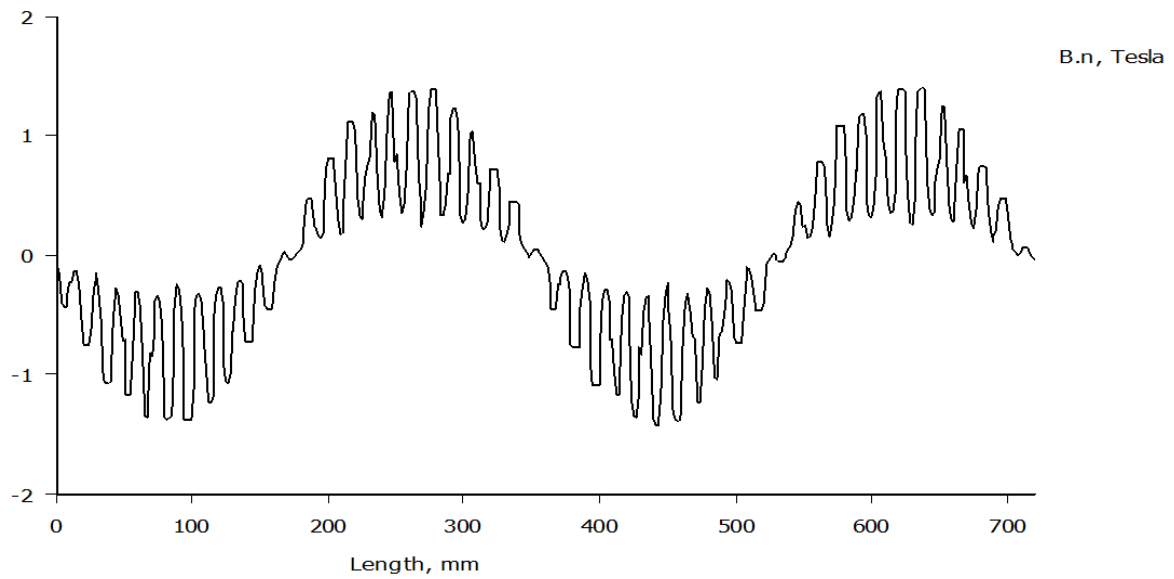
(obr. 10 Momentová charakteristika stroje)



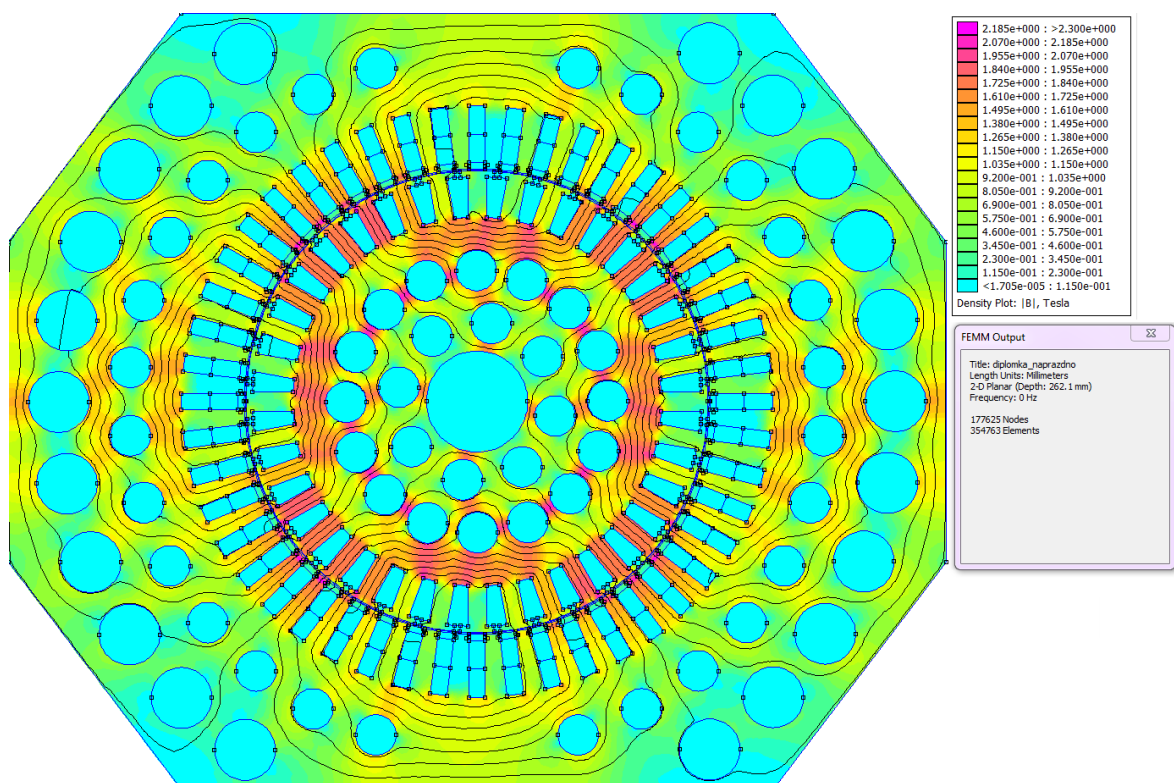
(obr. 11 Náhradní schema stroje sestavené z vypočtených hodnot)



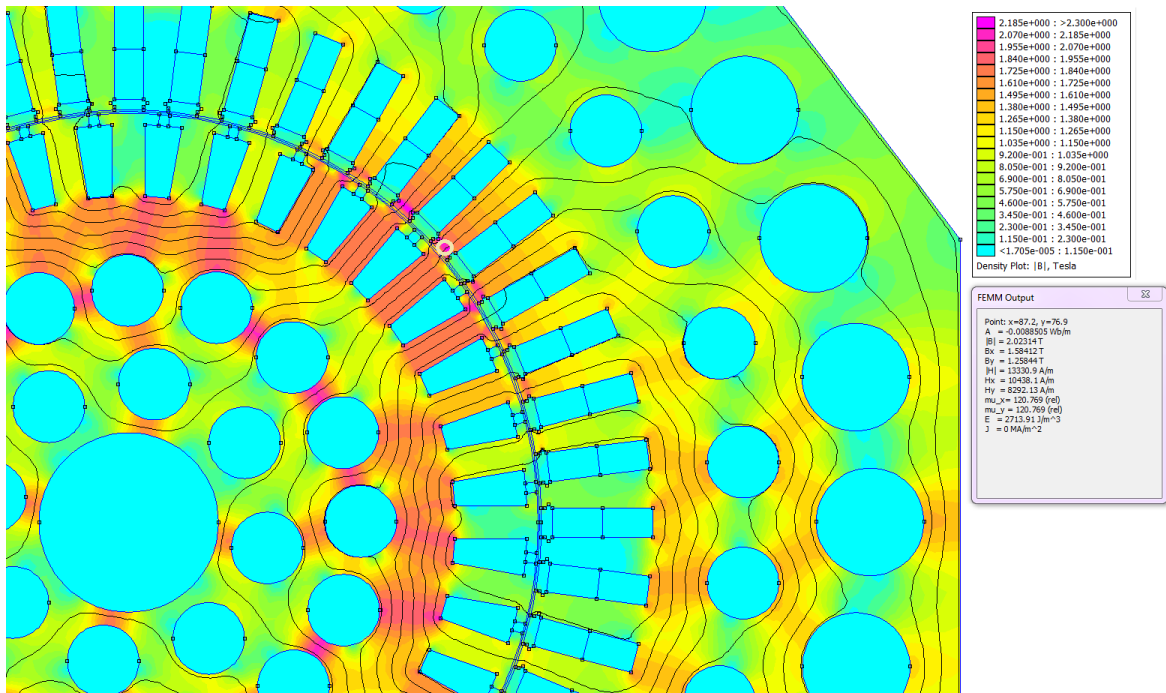
(Obr. 12 Jmenovitý proud stroje v komplexní rovině, jeho maximální hodnota)



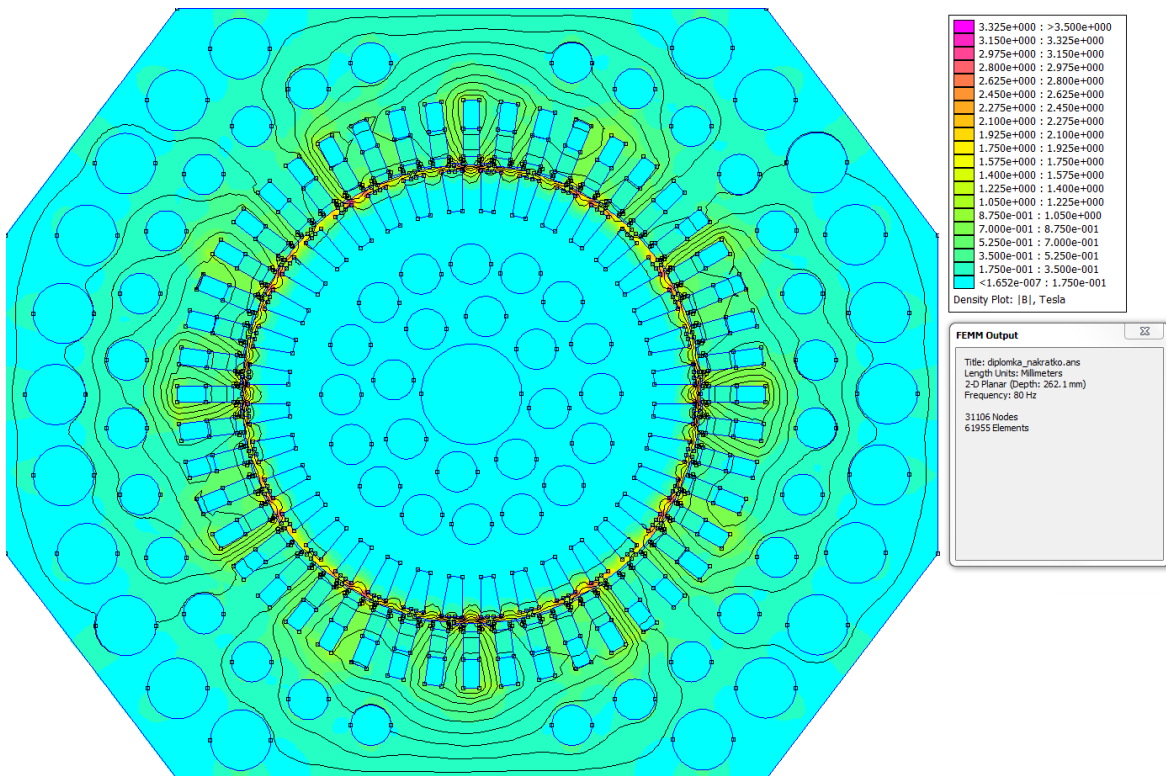
(obr. 13 Průběh magnetické indukce po obvodu vzduchové mezery)



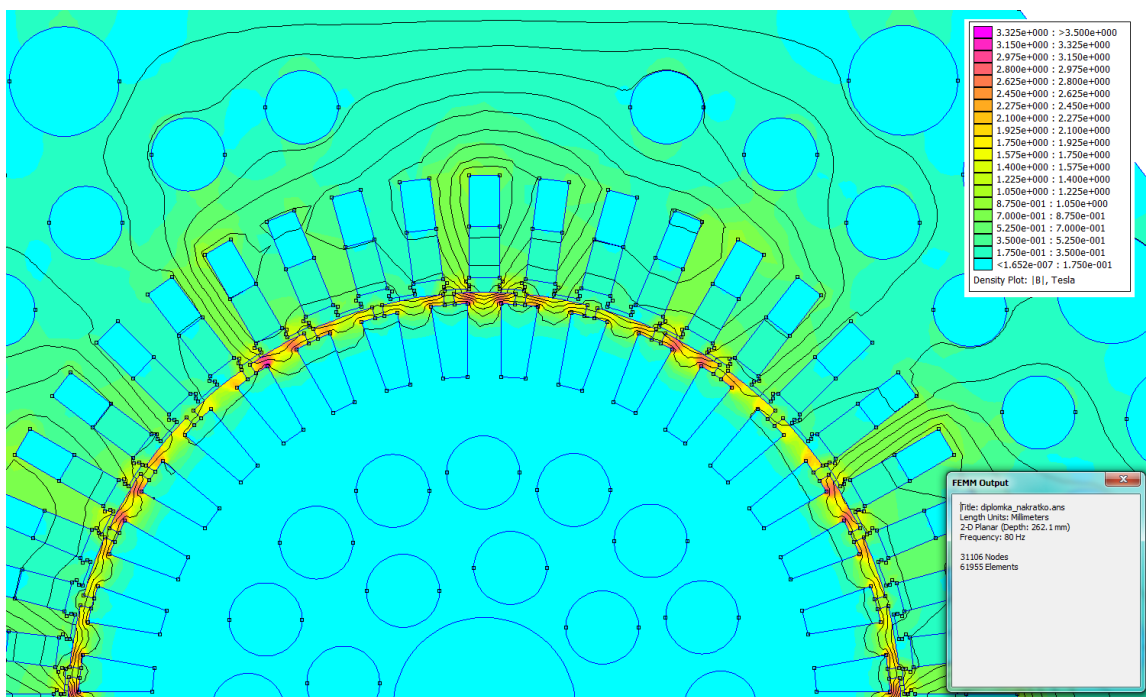
(obr. 14 Výsledek FEM analýzy magnetického pole stroje ve stavu naprázdno)



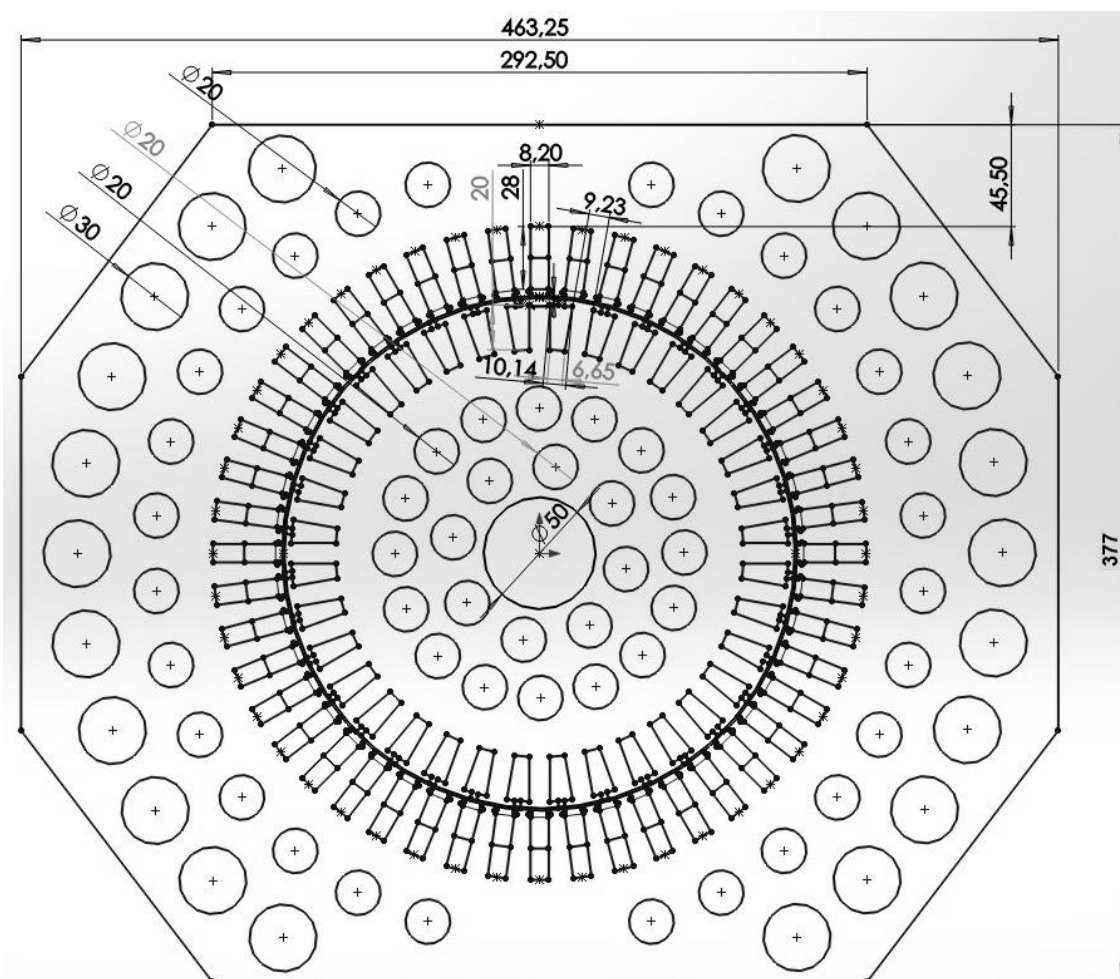
(obr. 15 Odečet indukce v zubech – vyznačeno kroužkem)



(obr. 16 Magnetické pole stroje ve stavu nakrátko)



(obr. 17 Detail deformace magnetického pole ve stavu nakrátko)



(obr. 18 Celkový pohled na magnetický obvod stroje)

4 Možnosti provedení klece nakrátko se zešikmenými drážkami:

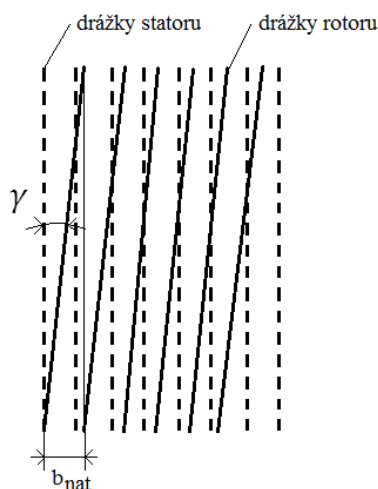
U asynchronních strojů s rovnými drážkami na statoru i rotoru se vyskytuje celá řada nepříznivých faktorů při provozu. Klecový rotor s rovnými drážkami má například vliv na vibrace stroje. Vibrace stroje, které však nemusí být způsobeny pouze tímto jevem, způsobují mechanické namáhání izolace v drážkách. Dalším jevem způsobeným použitím rotoru s rovnými drážkami je například zvýšený hluk stroje. Vše způsobují harmonické složky pole vyšších řádů počítané dle vztahu: (4.1.)

$$v_z = 6 \cdot q \cdot k \pm 1, \text{ kde } k = 1, 2, 3 \dots$$

Jedná se tedy harmonické složky řádů (pro $q = 4$ u tohoto stroje):

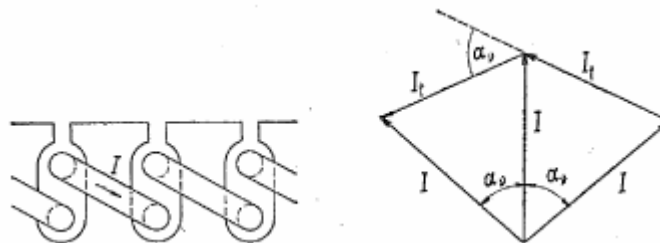
{23, 25, 47, 49, 71, 73 ... } Tento stroj má $Q = 48$ drážek, počet zubů na pólovou dvojici je tedy 24, toho číslo je blízko řádu harmonických pro $k = 1$ (23,25), jedná se tedy o tzv. zubové harmonické.

Je patrné, že řád uvedených harmonických roste s číslem q , tím se ale také zmenšuje jejich amplituda a snižuje se vliv na práci stroje. Číslo q je však obtížné libovolně měnit při návrhu stroje (tedy zvětšovat pro omezení vlivu harmonických) a tak je nyní vhodné přistoupit k natočení drážek klecového rotoru o určitý úhel γ (úhel natočení) znázorněný vztahem a obrázkem zde: $\gamma = v \cdot b_{nat} \cdot \frac{\pi}{t_{d2}}$ (4.2)



(obr. 19 Znázornění úhlu natočení drážek rotoru, převzato z [1])

Klecové vinutí rotoru si můžeme představit jako dvouvrstvé m-fázové vinutí s jednou drážkou na pól a fázi a krokem rovným jedné. Napětí indukované v jedné cívce takového vinutí pak určíme jako součet napětí jednotlivých závitů. S ohledem na prostorový úhel rozložení závitů.



(Obr. 20 Náhradní schéma vinutí klecové kotvy, převzato z [3])

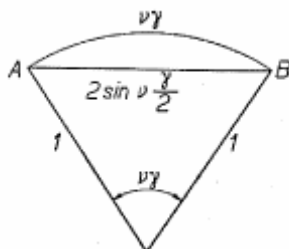
Rovnice indukovaného napětí v takovém vinutí:

(4.3.)

$$-e_v = E_v \cdot \frac{1}{v} \cdot \sin\left(v \cdot \frac{\alpha_v}{2}\right) \cdot \cos(\omega t)$$

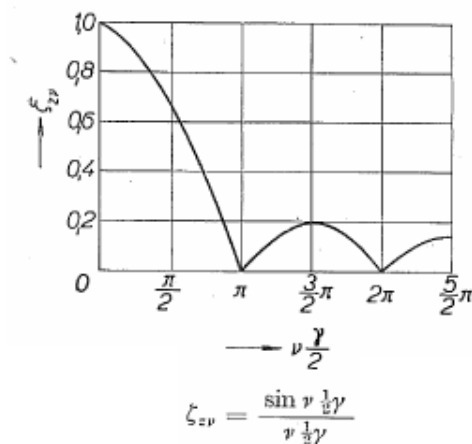
Zešikmením drážek rotoru oproti statoru o určitý úhel γ (jednu drážkovou rozteč dle obr. 19 a [1]) dojde ke snížení indukovaného napětí v závitech náhradního m-fázového vinutí rotoru, jelikož indukované napětí bude po délce závitu měnit fázový posuv. Sníží se tedy vzájemná indukčnost mezi státorem a rotorem při uvažování statorového vinutí, které má zkrácený krok $\beta=0,8$. Dojde tedy dále ke snížení diferenční rozptylu rotoru a statoru a tedy snížení ztrát vlivem pulzace pole.

Fázový posuv napětí na začátku a konci závitu bude reprezentován úhlem $\nu\gamma$. Výsledné napětí tedy bude vektorovým součtem elementárních napětí po délce závitu. Což je v následujícím obrázku tětíva AB.



(Obr. 21 Indukované napětí v zešikmeném závitu, převzato z [3])

Indukované napětí v zešíkmeném závitu se tedy sníží oproti nezešíkmenému závitu v poměru vektorového součtu ku aritmetickému. Z tohoto poměru poté dostaneme tzv. Činitel natočení drážek, což je grafický průběh velikosti indukovaného napětí k úhlu natočení drážek a řádu harmonické.



(Obr. 22 Průběh činitele natočení drážek, převzato z [3])

Vztah pro výpočet činitele zešíkmení drážek:

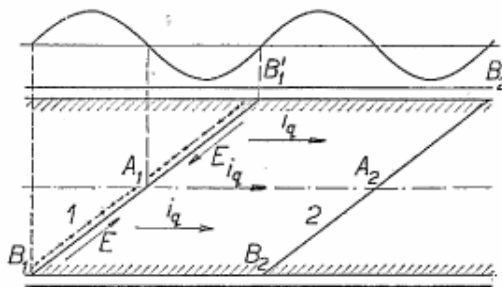
(4.4.)

$$\xi_{zv} = \frac{\sin\left(k \cdot \frac{\gamma}{2}\right)}{k \cdot \frac{\gamma}{2}}$$

Pro natočení drážek o jednu drážkovou rozteč (obvykle dle [1]) je tedy činitel ξ_{zv} blízký jedné pro základní harmonickou, pro vyšší řády harmonických se však bude se stoupajícím řádem blížit více k nule a tím se jejich vliv eliminuje. Tento činitel je poté tedy nutné násobit společně s činitelem kroku a rozlohy pro získání celkového činitele vinutí. Natočení drážek zvětšuje délku tyčí a tak i je nutné tento vliv započítat i do velikosti odporů vinutí rotoru.

Pokud již máme zešíkmené neizolované tyče, pak vlivem měnicího se prostorového rozložení tyčí rotoru vůči poli statoru však dochází k vytváření napěťových rozdílů mezi jednotlivými elementy tyčí a to způsobuje příčné proudy přes jednotlivé plechy rotoru, které způsobují zahřívání těchto plechů. To je nevýhoda tohoto provedení.

Velikost těchto ztrát nelze určit výpočtem, neboť není znám přechodový odpor mezi tyčí rotoru a materiálem plechů rotoru avšak lze je dokázat měřením. Ztráty vlivem těchto proudů rostou s délkou stroje. Nejsou však až tak dalece významné (vzhledem k malému úhlu natočení drážek) aby bylo nutné tyče u rotoru se zešikmenými drážkami izolovat. Pozitivní vliv natočení drážek rotoru na chod stroje omezením vyšších řádů harmonických pole (omezení hluku, pulzační a parazitních momentů) tedy dalece převyšuje nevýznamné příčné proudy v rotoru mezi tyčemi tekoucí přes plechy.



(Obr. 23 Průběh střídavých příčných proudů mezi neizolovanými zešikmenými tyčemi rotoru, převzato z [3])

Pozn.: pokud máme rotor s rovnými neizolovanými tyčemi, tak další přídavné ztráty vlivem (neurčitelných) příčných proudů přes železo rotoru nevznikají, neboť z rovnoběžnosti tyčí plyne, že nedochází k vytvoření rozdílu napětí v žádném elementárním místě mezi tyčemi.

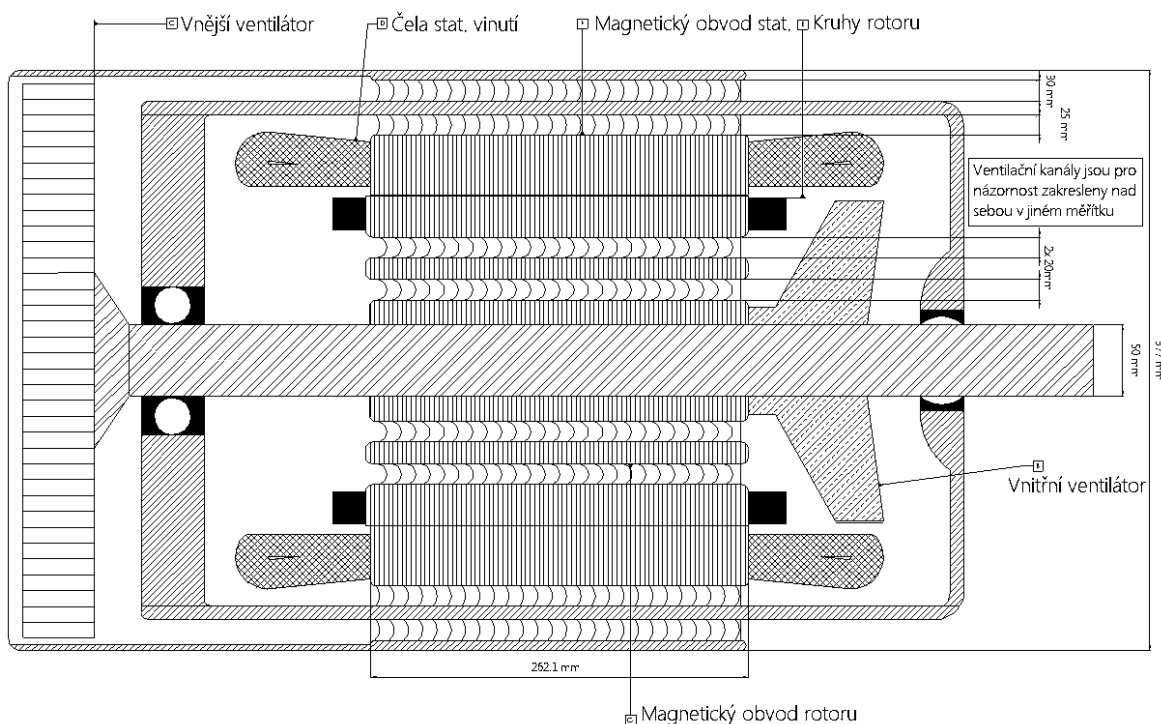
4.1 Výroba klecových rotorů se zešikmenými drážkami:

Výroba klecových rotorů se zešikmenými i rovnými drážkami začíná shodným způsobem. Neberu zde v úvahu kotvy s odstříknutou klecí. Nejprve je na přípravku na sebe naskládáno určité množství rotorových plechů. Pak jsou provlečeny tyče rotorového vinutí. Plechy jsou pod určitým tlakem stlačeny a tyče jsou ve speciálním zařízení roztemovány pomocí ostrých kotoučů, vždy dvě naproti sobě. Tím je zajištěno, že tyč je v drážce mechanicky upevněna, neboť se roztáhne do stran. Následuje vložení hřídele, která je zchlazena na velmi nízkou teplotu, aby se smrštila. Zchlazená tyč v rotoru je po vložení ohřáta zpět na teplotu okolí čímž se roztáhne a vlivem tření nebo pomocí klínu se spojí s plechy rotoru. Poté následuje pájení zkratovacích kruhů a rotor s rovnými tyčemi a

drážkami je hotový.

Pokud výrobce uzná, že pro životnost a vlastnosti stroje je lepší, aby stroj obsahoval rotor se zešíkmenými drážkami, lze postupovat obdobně. Nejprve je na sebe dle délky magnetického obvodu stroje na sebe naskládáno určité množství rotorových plechů. Plechy zatím leží volně na sobě v přípravku nahrazujícím hřídel. Následně jsou drážkami vznikajícího rotoru provlečeny tyče vinutí. Nyní je rotorový svazek plechy plus tyče připraven a je potřeba ještě bez hřídele stroje docílit natočení drážek. Tyče rotoru jsou samozřejmě měděné, měď je poměrně měkký a dobře tvarovatelný kov proto lze nyní drážky bezpečně natočit. Rotorovým svazkem je provlečen střed nahrazující hřídel. Tímto středem je otáčeno, čímž se docílí deformace tyčí a natočení drážek. Nyní je svazek zpevněn deformovanými tyčemi a je možné nasadit hřídel shodným způsobem uvedeným výše. Hřídel po roztažení definitivně zpevní celý svazek a nyní je možné připájet kruhy.

5 Podélný řez strojem:



(Obr. 24 Podélný řez strojem)

6 Shrnutí a závěr:

Ze získaných výsledků je patrné, že indukce v zubech dosahuje výpočetní hodnoty tj. 2T po ověření ve FEMM software. Vzhledem k tomu, že se jedná o uzavřený stroj, musely být ventilační kanály voleny většího průměru. V rotoru jsou ventilační kanály voleny s ohledem na co nejnižší oteplení rotorového svazku a vnitřní ventilační kanály ve statoru s ohledem na co nejnižší oteplení statorového svazku při chlazení vnitřním ventilačním obvodem. Vnější ventilační obvod tvořený vnějším ventilátorem a vnějšími ventilačními kanály odvádí tepelnou energii z vnitřního ventilačního obvodu prostřednictvím tepelné vodivosti plechů jha statoru. Toto je vyjádřeno činitelem k_m při výpočtu potřebného průtočného množství ventilátorů.

Dosažené ztráty $\Delta P = 132942,54 W$ a účinnost $\eta = 90,26\%$ jsou odpovídající zadání, vypočtený skluz $s = 1,5\%$ je skluzem za teplého stavu a plném výkonu, kdy je činný odpor rotorového obvodu větší. Toto způsobí zploštění momentové charakteristiky a snížení momentu zvratu, stroj poté odebírá větší proud. Obdobný mechanismus lze sledovat při regulaci kroužkového asynchronního stroje změnou odporu kotvy. Skluz nelze za pomoci FEMM software ověřit neboť tento program neuvažuje rotaci. Tento stroj má poměrně tvrdou momentovou charakteristiku což je patrné z velikosti skluzu zvratu, která je vysoká a z lineární části charakteristiky, která velice strmě stoupá.

Byla dále provedena FEM analýza pole stroje ve stavu nakrátko, z níž je patrné, že čím víc je stroj zatížený, tím více se jha odsycují a nasycení se přesouvá do zubů a vzduchové mezery.

V poslední části práce, kde bylo úkolem analyzovat vliv použití klece nakrátko se zešikmenými drážkami na chod stroje. Výsledkem této kapitoly je fakt, že použití klece rotoru se zešikmenými neizolovanými tyčemi kladně prospívá chodu stroje i přes příčné proudy železem rotoru, které jej mohou více prohřát.

7 Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] Kopylov, I.P.: Stavba elektrických strojů. SNTL, Praha, 1988
- [2] Pyrhönen, J., Jokien, T., Hrabovcová, V.: Desing of station electrical machines. John Wiley & Sons, Ltd, 2008.
- [3] Heller, B., Hamata, V.: Příkladná pole síly a ztráty v asynchronním stroji, Nakladatelství Čsl. akademie věd, 1961