

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Návrh vzduchem chlazeného turboalternátoru

**vedoucí práce: doc. Ing. Josef Červený, CSc.
autor: Bc. František Brom**

2013

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

Jméno a příjmení: **František BROM**
Osobní číslo: **E11N0066P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Průmyslová elektronika a elektromechanika**
Název tématu: **Návrh vzduchem chlazeného turboalternátoru**
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Proveďte elektromagnetický návrh vzduchem chlazeného turboalternátoru s parametry:
 $S = 145 \text{ MVA}$, $U = 11,5 \text{ kV}$, $2p = 2$, $m = 3$, $f = 50 \text{ Hz}$, $\cos \varphi = 0,8$.
2. Ověřte vypočtenou charakteristiku naprázdno a přídavné ztráty ve vinutí statoru výpočtem MKP.
3. Proveďte orientační výpočet oteplení aktivních částí generátoru.
4. Nakreslete schématicky příčný a podélný řez stroje a výkresovou dokumentaci v rozsahu potřebném pro přípravu modelů MKP.

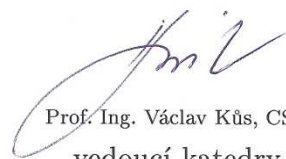
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

1. **L. Cigánek: Stavba elektrických strojů.**
2. **I. P. Kopylov: Stavba elektrických strojů.**
3. **J. Červený: Postup při návrhu synchronního stroje**

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Josef Červený, CSc.**
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky
Konzultant diplomové práce: **Ing. Richard Katona**
BRUSH, s.r.o.
Datum zadání diplomové práce: **15. října 2012**
Termín odevzdání diplomové práce: **9. května 2013**


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




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

Anotace

Tato diplomová práce se zabývá návrhem vzduchem chlazeného turboalternátoru dle zadaných parametrů. Návrh se skládá z elektromagnetického výpočtu, z jednoduché kontroly oteplení vinutí, dále z ověření charakteristiky naprázdno a výpočtu přídatných ztrát ve satorovém vinutí pomocí metody MKP a na závěr nakreslen příčný řez aktivními částmi stroje.

Klíčová slova

turboalternátor, elektromagnetický výpočet, oteplení, metoda MKP, charakteristika naprázdno, přídatné ztráty

Abstract

This thesis is concerned with the design of air-cooled turbogenerator according to the specified parameters. The design includes an electromagnetic calculation, a simple verification heating of winding, verification of the no-load characteristic and calculating the additional losses in the stator windings using the FEM and at the conclusion cross-section of active parts of machine is drawn.

Key words

turbogenerator, electromagnetic calculation, heating, method FEM, no-load characteristic, additional losses

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 8.5.2013

Jméno příjmení

.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval všem, kteří se podíleli na mém odborném vzdělávání během studia na Západočeské univerzitě v Plzni. Zvláště bych chtěl poděkovat vedoucímu této diplomové práce doc. Ing. Josefu Červenému, CSc. za cenné profesionální rady, připomínky. Samozřejmě bych chtěl poděkovat své rodině za podporu v průběhu mého studia.

Za metodické vedení práce a technickou podporu při řešení problémů spojených s vypracováním diplomové práce děkuji Ing. Richardu Katonovi a jeho kolegům.

Obsah

OBSAH	8
1. SEZNAM SYMBOLŮ	9
2. ÚVOD	11
2.1 KONSTRUKCE SYNCHRONNÍCH STROJŮ	11
2.2 PRINCIP ČINNOSTI SYNCHRONNÍHO GENERÁTORU.....	12
3. ELEKTROMAGNETICKÝ VÝPOČET	13
3.1 ZADANÉ HODNOTY:	13
3.2 URČENÍ HLAVNÍCH PARAMETRŮ STROJE:	13
3.3 VÝPOČET STATOROVÉHO SVAZKU	14
3.3.1 Výpočet vinutí statoru:	15
3.3.2 Výpočet elektromagnetického využití a délky stroje:	16
3.3.3 Návrh drážky statoru:	17
3.3.4 Odpor a rozptylová reaktance statorového vinutí.....	20
3.4 NÁVRH MAGNETICKÉHO OBVODU:.....	22
3.4.1 Dimenzování magnetického obvodu:	22
3.4.2 Magnetizační charakteristika:	23
3.5 NÁVRH BUDÍCÍHO VINUTÍ:	29
3.6 ZTRÁTY A ÚČINNOST:	33
4. JEDNODUCHÁ KONTROLA OTEPLENÍ AKTIVNÍCH ČÁSTÍ	35
4.1 OTEPLENÍ STATOROVÉHO VINUTÍ.....	35
4.2 OTEPLENÍ BUDÍCÍHO VINUTÍ.....	37
5. OVĚŘENÍ VYPOČTENÉ CHARAKTERISTIKY NAPRÁZDNO VÝPOČTEM MKP	39
5.1 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ	39
5.2 MODEL SYNCHRONNÍHO STROJE V PROGRAMU FEMM.....	39
5.3 VYHODNOCENÍ CHARAKTERISTIKY NAPRÁZDNO	40
6. VÝPOČET PŘÍDAVNÝCH ZTRÁT VINUTÍ STATORU NA MODELU MKP	43
6.1 ČINITEL ZVĚTŠENÍ ELEKTRICKÉHO ODPORU.....	43
6.2 ČINITEL ZVĚTŠENÍ ELEKTRICKÉHO ODPORU VÝPOČTEM NA MODELU MKP	44
7. ZÁVĚR	47
POUŽITÁ LITERATURA	48
SEZNAM PŘÍLOH	48

1. Seznam symbolů

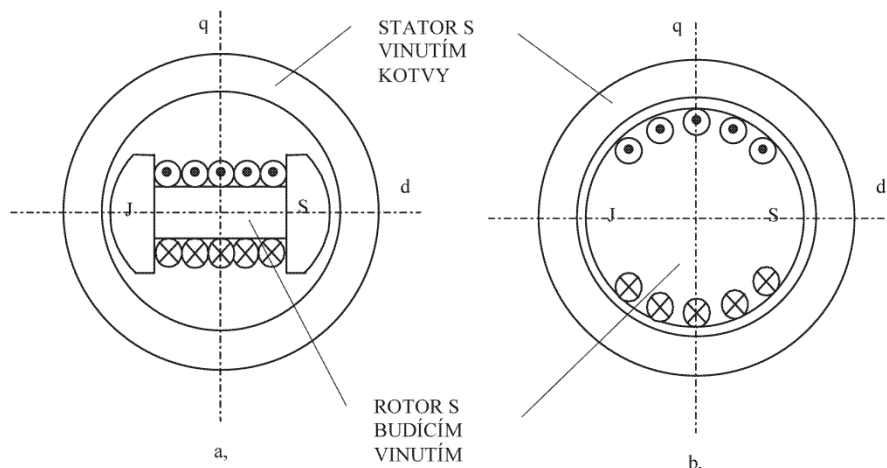
Symbol	Název	Jednotka
A	obvodová proudová hustota	$A.m^{-1}$
a	počet paralelních větví	-
A_v	činitel ventilačních ztrát	-
B	magnetická indukce	T
b	šířka	m
C	Essonův činitel elektromagnetického využití stroje	$kVA.mni.m^{-3}$
C	koeficient	-
$\cos \varphi$	účinník	-
D	průměr	m
f	frekvence	Hz
F	magnetické napětí	A
H	intenzita magnetického pole	$A.m^{-1}$
h	výška, hloubka	m
I	elektrický proud	A
i	počet	-
k	činitel	-
k_c	Carterův činitel	-
L	délka	m
l	délka	m
m	počet fází	-
m	hmotnost	kg
m'	matematický počet fází	-
N	počet závitů	-
n	otáčky	min^{-1}
P	činný výkon	W
p	počet pólpárů	-
Q	počet drážek	-
q	počet drážek na pól a fázi	-
R	elektrický odpor	Ω
S	zdánlivý výkon	VA
S	průřez, plocha	m^2
š	šířka	m
T	teplota	$^{\circ}C$
t	rozteč	m
U	elektrické napětí	V

Symbol	Název	Jednotka
u	poměrná hodnota napětí	%
v	obvodová rychlost	m.s ⁻¹
x	poměrná reaktance	%
X	reaktance	Ω
y	cívkový krok	-
z	šířka zubu	m
β	poměrné zkrácení kroku	-
γ _σ	poměrná hodnota rozptylového toku	-
γ _{Cu}	měrná vodivost mědi při 20 °C	S.m ⁻¹
δ	velikost vzduchové mezery	m
ΔP	ztrátový výkon	W
Δp _{Fe}	ztrátové číslo plechů	W.kg ⁻¹
ΔT	oteplení	K
ε	odchylka	%
η	účinnost	%
Λ	magnetická vodivost	H
λ	jednotková magnetická vodivost	-
v	řád harmonické	-
ξ	náhradní výška vodiče	m
ρ	měrná hmotnost	kg.m ⁻³
ρ _{Cu}	měrný elektrický odpor mědi při 20 °C	Ω.m ⁻¹
σ	proudová hustota	A.m ⁻²
Φ	magnetický tok	Wb

2. Úvod

2.1 Konstrukce synchronních strojů

Stator synchronního stroje obsahuje střídavé trojfázové vinutí, které je uloženo v drážkách. V rotoru je umístěno stejnosměrné budící vinutí, které je napájeno z budiče přes sběrací kroužky a kartáče stejnosměrným proudem, případně bezkontaktně z bezkartáčového budiče s PMG (pilotní budič s permanentními magnety). Dle provedení rotoru se rozlišují dva základní typy synchronních strojů, a to stroje s vyniklými póly viz. obrázek 2.1a) a stroje s hladkým rotorem viz. obrázek 2.1b). Cívky budícího vinutí strojů s vyniklými póly jsou nasazeny na póly, na jejichž koncích jsou připevněny pólové nástavce. Póly a nástavce jsou zhotoveny buď z masivní ocelolitině a nebo z dynamových plechů. Rotor synchronních strojů s hladkým rotorem je vykován z vhodné ušlechtilé oceli. Synchronní stroje jsou obvykle chlazeny vzduchem, vodou a vodíkem, případně jejich kombinací.

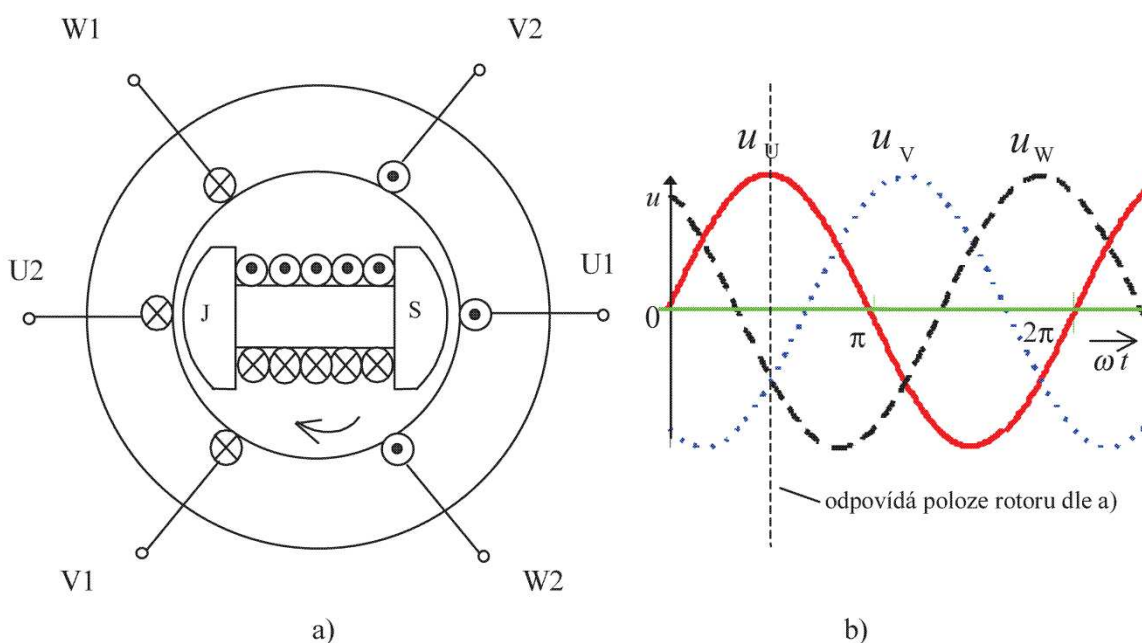


Obrázek 2.1: Konstrukční typy synchronních strojů; a) stroj s vyniklými póly, b) stroj s hladkým rotorem

Synchronní generátory s hladkým rotorem, dále jen turboalternátory, patří do zvláštní skupiny synchronních strojů točivých, které jsou přizpůsobeny vysokým obvodovým rychlostem a vysokému využití, což vyžaduje účinnou ventilaci pro odvod ztrát. Jsou poháněny zpravidla přímo parní nebo plynovou turbínou. Turboalternátory mají rotorové budící vinutí uloženo v drážkách na povrchu masivního ocelového válce. Vinutí je tvořeno soustřednými cívkami upravenými a zapojenými tak, že vybudí dvupólové magnetické pole. Aktivní drážky vyplňují přibližně 2/3 obvodu. Prostor v ose pólu je bez vinutí, bývají v něm jen ventilační drážky, vyvažovací otvory nebo Lafoonovy zářezy, jimiž se vyrovná rozdílná tuhost rotoru (drážková část a pól ~ příčná a podélná osa), čímž se eliminují vibrace a mění se moment setrvačnosti k jednotlivým osám a tím i rozdíl v kritických otáčkách. [4]

2.2 Princip činnosti synchronního generátoru

Vinutí statoru dvojpólového alternátoru tvoří trojice cívek (fáze U,V,W), které jsou vzájemně prostorově natočeny o 120° , viz. obrázek 2.2a). Rotorovým vinutím prochází stejnosměrný proud, který vybudí stejnosměrné pole, a to se uzavírá přes stator. Pokud se nabuzený rotor otáčí, indukují se v jednotlivých cívkách statoru střídavá napětí (sinusového průběhu) časově posunutá o 120° . Pokud se rotor nachází v poloze dle obrázek 2.2a), tak v cívkce fáze U se bude indukovat maximální napětí, v cívkách fází V a W se indukují napětí o poloviční hodnotě s opačným znaménkem. Časové průběhy indukovaných napětí v jednotlivých fázích statorového vinutí jsou zobrazeny na obrázku 2.2b). Jedné periodě střídavého indukovaného napětí odpovídá u dvojpólového alternátoru otáčka rotoru o 360° .



Obrázek 2.2: a) princip činnosti alternátoru, b) průběh indukovaných napětí v cívkách statoru

Poté obecně pro p - pólový alternátor platí:

$$f = \frac{p \cdot n_s}{60} [\text{Hz}; \text{min}^{-1}] \quad (2.1)$$

kde n_s jsou otáčky synchronního stroje a f je frekvence indukovaného napětí ve statorovém vinutí.

Připojí-li se ke statorovým svorkám trojfázová zátěž, bude vinutím statoru procházet střídavý elektrický proud, ten vybudí točivé magnetické pole otáčející se otáčkami n_s , které má stejnou rychlost otáčení jako rotorové magnetické pole, z čehož vyplývá nulový skluz, a proto se stroj nazývá synchronní.

3. Elektromagnetický výpočet

Elektromagnetický výpočet je složen z určení hlavních rozměrů a parametrů stroje, z rozložení vinutí a izolačního systému v drážce, z dimenzování magnetického obvodu a s tím spojeným sestrojením charakteristiky naprázdno, dále z návrhu budícího vinutí a závěrem výpočtem ztrát a účinnosti stroje.

V současnosti jsou pro tento účel používány speciální výpočetní programy, které níže uvedený výpočet zpřesňují, z čehož vyplývá, že tento elektromagnetický výpočet je pouze základní s určitými zjednodušujícími předpoklady a nelze ho použít jako podklad pro elektromagnetický návrh obecného stroje.

3.1 Zadané hodnoty:

Proveďte elektromagnetický návrh vzduchem chlazeného synchronního generátoru s vysokým využitím:

Parametry:

zdánlivý výkon:	$S = 145 \text{ [MVA]}$
sdružené napětí:	$U_n = 11,5 \text{ [kV]}$
počet fází:	$m = 3 \text{ [-]}$
jmenovité otáčky:	$n = 3000 \text{ [ot}\cdot\text{min}^{-1}]$
frekvence:	$f = 50 \text{ [Hz]}$
účinník:	$\cos\varphi = 0,8 \text{ [-]}$
Essonova konstanta:	$C > 10 \text{ [kVA}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{min]}$
obvodová proudová hustota:	$A \approx 130 \text{ [kA}\cdot\text{m}^{-1}]$
indukce ve vzduchové mezeře:	$B_\delta \approx 1 \text{ [T]}$
teplota vzduchu na vstupu do generátoru:	$T_{\text{vst}} = 40 \text{ [}^\circ\text{C]}$

3.2 Určení hlavních parametrů stroje:

činný výkon:

$$P = S \cdot \cos\varphi = 145 \cdot 10^6 \cdot 0,8 = 116000 \text{ kW} \quad (3.1)$$

fázové napětí:

$$U_f = \frac{U_n}{\sqrt{3}} = \frac{11500}{\sqrt{3}} = 6639,63 \text{ V} \quad (3.2)$$

počet pólpárů:

$$p = \frac{60 \cdot f}{n} = \frac{60 \cdot 50}{3000} = 1 \quad (3.3)$$

počet pólů:

$$2p = 2 \quad (3.4)$$

fázový proud:

$$I_f = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{145 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 11500} = 7279,63 \text{ A} \quad (3.5)$$

3.3 Výpočet statorového svazku

vnitřní průměr statoru (vrtání statoru):

$$D_1 = 0,08 \cdot (2p)^{0,625} \cdot S^{0,185} = 0,08 \cdot (2)^{0,625} \cdot 145000^{0,185} \quad (3.6)$$

$$D_1 = 1,112 \text{ m}$$

dle doporučení pracovníků fy. Brush SEM zvoleno vrtání statoru:

$$D_1 = 1,174 \text{ m}$$

mezipólová rozteč:

$$t_p = \frac{\pi \cdot D_1}{2p} = \frac{\pi \cdot 1,174}{2} = 1,844 \text{ m} \quad (3.7)$$

odhadovaná mezidrážková rozteč:

$$t_{d_1} = 56 \text{ mm}$$

počet drážek statoru:

$$Q_1 = \frac{\pi \cdot D_1}{t_{d_1}} = \frac{\pi \cdot 1,174}{0,056} = 65,86 \doteq 66 \quad (3.8)$$

počet drážek statoru na pól a fázi:

$$q_1 = \frac{Q_1}{2p \cdot m} = \frac{66}{2 \cdot 3} = 11 \quad (3.9)$$

počet závitů v sérii jedné fáze:

$$N_s = \frac{\pi \cdot D_1 \cdot A}{2 \cdot m \cdot I_1} = \frac{\pi \cdot 1,174 \cdot 130000}{2 \cdot 3 \cdot 7279,63} = 10,977 \doteq 11 \quad (3.10)$$

zvolený počet paralelních větví každé fáze střídavého vinutí:

$$a_{\approx} = 2$$

počet vodičů v jedné drážce:

$$n_d = \frac{a_{\approx} \cdot N_s}{p \cdot q} = \frac{2 \cdot 11}{1 \cdot 11} = 2 \quad (3.11)$$

opravená obvodová proudová hustota:

$$A = \frac{2 \cdot m \cdot I_1 \cdot N_s}{\pi \cdot D_1} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 7279,63 \cdot 11}{\pi \cdot 1,174} \quad (3.12)$$

$$A = 130267,327 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$$

3.3.1 Výpočet vinutí statoru:Parametry vinutí:

počet drážek:	$Q_1 = 66$
počet pólů:	$2p = 2$
počet fází:	$m = 3$
matematický počet fází:	$m' = 6$
počet drážek na pól a fázi:	$q = 11$
počet cívkových stran v drážce:	$u = 1$
typ vinutí:	smyčkové nekřížené
počet drážek na pól:	

$$Q_p = \frac{Q_1}{2p} = \frac{66}{2} = 33 \quad (3.13)$$

zvolený cívkový krok:

$$y_{1d} = 27$$

poměrné zkrácení kroku:

$$\beta = \frac{y_{1d}}{Q_p} = \frac{27}{33} = 0,8182 \quad (3.14)$$

krok na komutátoru:

$$y_k = \pm \frac{a_{ss}}{p} = + \frac{1}{1} = 1 \quad (3.15)$$

přední cívkový krok v počtu drážek:

$$y_1 = 2 \cdot u \cdot y_{1d} + 1 = 2 \cdot 1 \cdot 27 + 1 = 55 \quad (3.16)$$

zadní cívkový krok v počtu drážek:

$$y_2 = 2 \cdot y_k - y_{1d} = 2 \cdot 1 - 27 = -25 \quad (3.17)$$

Vinutí střídavé:

počet skupin vinutí:

$$a_{ss} \cdot m' = 1 \cdot 6 = 6 \quad (3.18)$$

počet skupin v jedné fázi:

$$\frac{a_{ss} \cdot m'}{m} = \frac{1 \cdot 6}{3} = 2 \quad (3.19)$$

počet cívek ve skupině:

$$\frac{Q_1}{a_{ss} \cdot m'} = \frac{66}{6} = 11 \quad (3.20)$$

Výpočet činitelů vinutí:

činitel vinutí pro v - tou harmonickou:

$$k_{v_v} = \sin\left(v \cdot \beta \cdot \frac{\pi}{2}\right) \cdot \frac{\sin v \frac{\pi}{m'}}{n \cdot \sin v \frac{\pi}{m' \cdot n}} \quad (3.21)$$

činitel vinutí pro 1. harmonickou:

$$k_{v_1} = \sin\left(v \cdot \beta \cdot \frac{\pi}{2}\right) \cdot \frac{\sin v \frac{\pi}{m'}}{n \cdot \sin v \frac{\pi}{m' \cdot n}} =$$

$$k_{v_1} = \sin\left(1 \cdot 0,8182 \cdot \frac{\pi}{2}\right) \cdot \frac{\sin 1 \frac{\pi}{6}}{11 \cdot \sin 1 \frac{\pi}{6 \cdot 11}} = 0,9166$$

činitel vinutí pro 5. harmonickou:

$$k_{v_5} = 0,0274$$

činitel vinutí pro 7. harmonickou:

$$k_{v_7} = -0,0577$$

činitel vinutí pro 11. harmonickou:

$$k_{v_{11}} = -0,0909$$

činitel vinutí pro 13. harmonickou:

$$k_{v_{13}} = -0,0659$$

3.3.2 Výpočet elektromagnetického využití a délky stroje:

činitel rozlohy vinutí pro první harmonickou:

$$k_{r_1} = \sin\left(1 \cdot \beta \frac{\pi}{2}\right) = \sin\left(1 \cdot 0,8182 \frac{\pi}{2}\right) = 0,9595 \quad (3.22)$$

počet vodičů v sérii:

$$v = \frac{Q_1 \cdot n_d}{a_{\approx}} = \frac{66 \cdot 2}{2} = 66 \quad (3.23)$$

odhad indukce ve vzduchové mezeře:

$$B_{\delta} = 0,93 \text{ T}$$

Essonův činitel:

$$C = \frac{\pi^2}{60\sqrt{2}} \cdot A \cdot B_{\delta} \cdot k_{v_1} = \frac{\pi^2}{60\sqrt{2}} \cdot 130267,327 \cdot 0,93 \cdot 0,9166 \quad (3.24)$$

$$C = 12,923 \text{ kVA} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{min}^{-1}$$

odhad efektivní délky stroje:

$$l_e = \frac{S}{C \cdot D_1^2 \cdot n} = \frac{145 \cdot 10^6}{12923 \cdot 1,174^2 \cdot 3000} = 2,7136 \doteq 2,714 \text{ m} \quad (3.25)$$

opravený Essonův činitel:

$$C = \frac{S}{l_e \cdot D_1^2 \cdot n} = \frac{145 \cdot 10^6}{2,714 \cdot 1,174^2 \cdot 3000} \quad (3.26)$$

$$C = 12,921 \text{ kVA} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{min}^{-1}$$

magnetická indukce ve vzduchové mezeře:

$$B_\delta = \frac{49,02 \cdot 10^6 \cdot U_n}{D_1 \cdot l_e \cdot v \cdot n \cdot k_{r_1}} = \frac{49,02 \cdot 10^6 \cdot 11500}{1,174 \cdot 2,714 \cdot 66 \cdot 3000 \cdot 0,9595} \quad (3.27)$$

$$B_\delta = 0,9313 \text{ T}$$

odhad šířky paketu:

$$\check{s}_p \cong 34 \text{ až } 40 \text{ mm}$$

zvolená šířka paketu:

$$\check{s}_p = 40 \text{ mm}$$

odhad šířky kanálu:

$$\check{s}_k = 8,45 \text{ mm}$$

počet paketů:

$$i = \frac{l_e}{\check{s}_p} = \frac{2,714}{0,04} = 67,75 \doteq 68 \quad (3.28)$$

počet kanálů:

$$i_k = i - 1 = 68 - 1 = 67 \quad (3.29)$$

celková délka statoru (včetně radiálních kanálů):

$$L = l_e + \check{s}_k \cdot i_k = 2,714 + 0,00845 \cdot 67 \doteq 3,28 \text{ m} \quad (3.30)$$

3.3.3 Návrh drážky statoru:

činitel plnění železa:

$$k_{Fe} = 0,96$$

odhadovaná magnetická indukce v hlavě zubu:

$$B'_{z_1} = 1,95 \text{ T}$$

mezidrážková rozteč:

$$t_{d_1} = \frac{\pi \cdot D_1}{Q_1} = \frac{\pi \cdot 1174}{66} = 55,882 \text{ mm} \quad (3.31)$$

šířka zubu:

$$z_1 = \frac{B_\delta \cdot t_{d1}}{B'_{z_1} \cdot k_{Fe}} = \frac{0,9313 \cdot 55,882}{1,95 \cdot 0,96} = 27,801 \text{ mm} \quad (3.32)$$

šířka drážky:

$$b_d = t_{d1} - z_1 = 55,882 - 27,801 = 28,082 \doteq 28 \text{ mm} \quad (3.33)$$

opravená šířka zubu:

$$z_1 = t_{d1} - b_d = 55,882 - 28 = 27,882 \text{ mm} \quad (3.34)$$

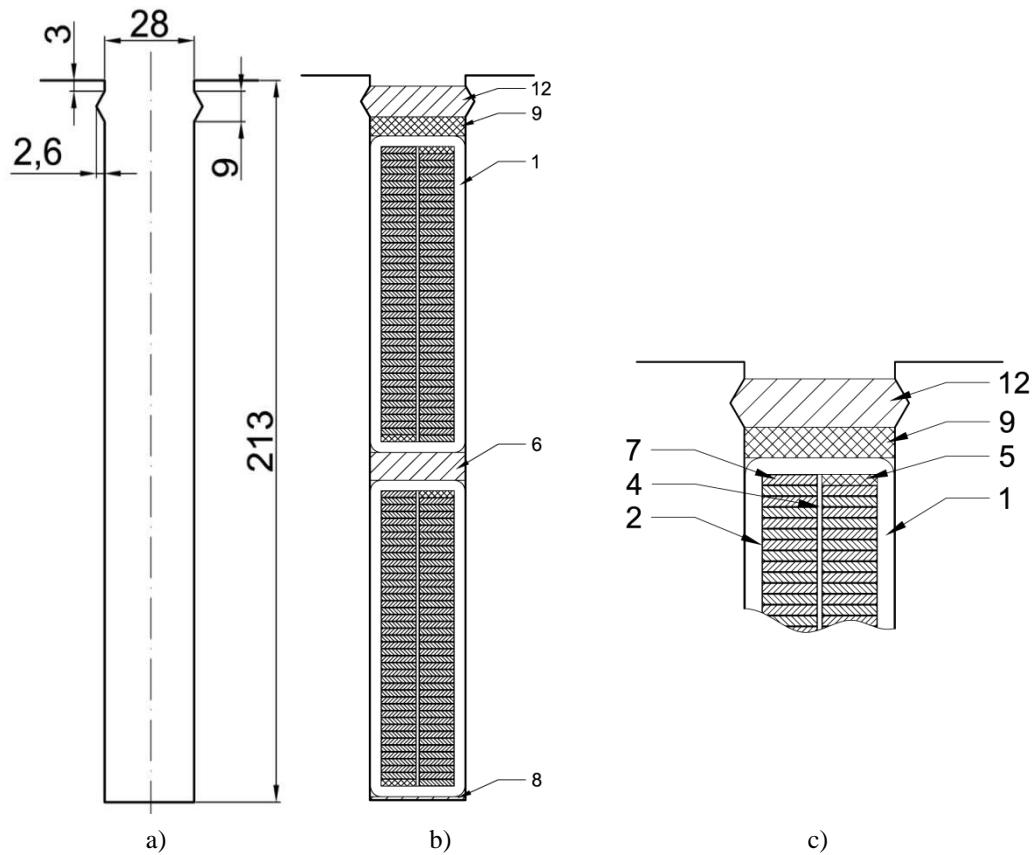
opravená magnetická indukce v hlavě zubu:

$$B'_{z_1} = \frac{B_\delta \cdot t_{d1}}{z_1 \cdot k_{Fe}} = \frac{0,9313 \cdot 55,882}{27,882 \cdot 0,96} = 1,944 \text{ T} \quad (3.35)$$

Bylo zvoleno tyčové vinutí ($n_d = 2$) s permutovanou (Roebelovo) tyčí, tomu odpovídá pro napětí 11,5 kV následující uspořádání vodičů a izolace v drážce:

Tabulka 3.1: Uspořádání vodičů a izolace v statorové drážce

Poz.	Položka	Šířka	Hloubka
1	Izolace proti železu	2.3,1 = 6,2	4.3,1 = 12,4
2	Izolace lamely (oboustranná)	2.0,22 = 0,44	42.2.0,22 = 18,48
3	Izolace krajní lamely	-	4.0,22 = 0,44
4	Izolace mezi sloupci lamel	0,8	-
5	Výplň chybějící lamely	-	2.1,8 = 3,6
6	Mezivrstva	-	8,2
	Σ izolace	7,44	43,12
7	Holý vodič	2.10,1 = 20,2	151,2
8	Vložka na dno	-	1
9	Vložka pod klín	-	5,3
10	Vložka vůle na šířku	0,36	-
11	Vložka vůle na výšku	-	0,38
	Hloubka drážky bez klínu	-	h2 = 201
12	Klín + krček	-	9+3 = 12
	Konečný rozměr drážky	b_d 28	h_d 213



Obrázek 3.1: a) Rozměry statorové drážky, b) Uspořádání vodičů a izolace v statorové drážce, c) Uspořádání vodičů a izolace v statorové drážce - detail

Průřez tyče:

$$S'_{cu_1} = \frac{I_1}{a_{\approx} \cdot \sigma_{cu_1}} = \frac{7279,63}{2 \cdot 2,716} = 1340,177 \text{ mm}^2 \quad (3.36)$$

kde proudová hustota v tyči je určena z empirického vztahu:

$$\sigma_{cu_1} = \sqrt{\frac{K}{b_v}} = \sqrt{\frac{149}{20,2}} = 2,716 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2} \quad (3.37)$$

kde b_v je šířka holého vodiče v drážce a K je konstanta závislá na napětí:

Tabulka 3.2: Závislost konstanty K na napětí

U [kV]	0,4	3,0	6,3	10,5
K	250	210	190	155

Výška tyče při její šířce 20,2 mm vychází:

$$h_v = \frac{S'_{cu_1}}{b_v} = \frac{1340,177}{20,2} = 66,345 \text{ mm} \quad (3.38)$$

Při takto vysokém vodiči by byly neúnosně velké přídavné ztráty vlivem skinefektu, proto je tyč rozdělena na větší počet paralelních vodičů menších rozměrů, tzv. permutovaná (Roeblova) tyč. Vodiče volíme podle možnosti provedení permutace a omezení přídavných ztrát. Odpovídající průřez respektuje zaoblení hran i nerovnost povrchu (udává výrobce vodiče).

Byl zvolen holý vodič 10,1 x 1,8 mm o průřezu 17,86 mm² ($S_1 = 17,86 \text{ mm}^2$). Vodiče jsou uspořádány do dvou sloupců ($j = 2$) a 42 vodiči pod sebou ($i = 42$).

výsledný průřez jedné tyče:

$$S_{Cu_1} = j \cdot i \cdot S_1 = 2 \cdot 42 \cdot 17,86 = 1500,16 \text{ mm}^2 \quad (3.39)$$

opravená proudová hustota v tyči:

$$\sigma_{Cu_1} = \frac{I_1}{a_{\approx} \cdot S_{Cu_1}} = \frac{7279,63}{2 \cdot 1500,16} = 2,426 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2} \quad (3.40)$$

3.3.4 Odpor a rozptylová reaktance statorového vinutí

délka čela dle empirického vztahu:

$$\begin{aligned} l_{\xi} &= \frac{2\pi \cdot y_{1d} \cdot D_1}{Q_1} + b_d + 1,5 \cdot h_2 \\ &= \frac{2\pi \cdot 27 \cdot 1,174}{66} + 28 + 1,5 \cdot 201 = 3,347 \text{ m} \end{aligned} \quad (3.41)$$

střední délka vodiče:

$$l_v = 2 \cdot (L + l_{\xi}) = 2 \cdot (3,28 + 3,347) = 13,254 \text{ m} \quad (3.42)$$

Odpor jedné fáze:

elektrický odpor tyče při 20 °C:

$$R_{1/20} = \rho_{Cu} \cdot \frac{l_v \cdot N_s}{a_{\approx} \cdot S_{Cu_1}} = \frac{1}{56} \cdot \frac{13,254 \cdot 11}{2 \cdot 1500,16} = 0,868 \cdot 10^{-3} \Omega \quad (3.43)$$

nová referenční teplota:

$$\theta_2 = 95 \text{ °C}$$

odpor vodiče při nové referenční teplotě:

$$R_{\frac{1}{95}} = R_{\frac{1}{20}} \cdot \frac{\theta_2 + 235}{20 + 235} = 0,868 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{95 + 235}{20 + 235} \quad (3.44)$$

$$R_{1/95} = 1,123 \cdot 10^{-3} \Omega$$

procentní úbytek napětí na ohmickém odporu:

$$u_R = \frac{R_{1/95} \cdot I_1}{U_f} \cdot 100 = \frac{1,123 \cdot 10^{-3} \cdot 7279,63}{6639,63} \cdot 100 = 0,123 \% \quad (3.45)$$

Rozptylová reaktance statorového vinutí:

rozptylová vodivost drážky:

$$\Lambda_d = \mu_0 \cdot l_e \cdot \left(\frac{h'_2}{3 \cdot b_d} + \frac{h'_1}{b_d} \right) = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 2,714 \cdot \left(\frac{187,68}{3 \cdot 28} + \frac{17,41}{28} \right) \quad (3.46)$$

$$\Lambda_d = 9,741 \cdot 10^{-6} \text{ H}$$

kde h'_1 je vzdálenost horního krajního vodiče od kraje drážky

$$h'_1 = h_1 + h_0 + \text{vložka pod klín} + \frac{t_{i_l}}{2} = 3 + 9 + 5,3 + \frac{0,22}{2} \quad (3.47)$$

$$h'_1 = 17,41 \text{ mm}$$

a h'_2 je vzdálenost krajních vláken vodičů v drážce

$$h'_2 = m_v + 2 \cdot [b_v \cdot (i + 1) + t_{i_l} \cdot i] + 2 \cdot t_{i_{Fe}} \quad (3.48)$$

$$h'_2 = 8,2 + 2 \cdot [1,8 \cdot (42 + 1) + 0,22 \cdot 42] + 2 \cdot 3,1$$

$$h'_2 = 187,68 \text{ mm}$$

vodivost rozptylu mezi zuby:

$$\Lambda_z = 0,4 \cdot 10^{-6} \cdot l_e \cdot \ln \left(1 + \frac{\pi}{2} \cdot \frac{z_1}{b_d} \right) \quad (3.49)$$

$$\Lambda_z = 0,4 \cdot 10^{-6} \cdot 2,714 \cdot \ln \left(1 + \frac{\pi}{2} \cdot \frac{27,882}{28} \right) = 1,022 \cdot 10^{-6} \text{ H}$$

rozptylová vodivost čel:

$$\Lambda_{\xi} = \mu_0 \cdot q \cdot \lambda_{\xi} \cdot l_{\xi} = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 11 \cdot 0,215 \cdot 3,347 \quad (3.50)$$

$$\Lambda_{\xi} = 9,948 \cdot 10^{-6} \text{ H}$$

kde λ_{ξ} je jednotková vodivost čel dle [2 str. 400]

$$\lambda_{\xi} = 0,215$$

rozptylová reaktance:

$$X_{\sigma} = \frac{4\pi \cdot f \cdot N_s^2}{p \cdot q} \cdot (\Lambda_d + \Lambda_z + \Lambda_{\xi}) \quad (3.51)$$

$$X_{\sigma} = \frac{4\pi \cdot 50 \cdot 11^2}{1 \cdot 11} \cdot (9,741 + 1,022 + 9,948) \cdot 10^{-6}$$

$$X_{\sigma} = 0,143 \Omega$$

procentní úbytek napětí na rozptylové reaktanci:

$$u_{\sigma} = \frac{X_{\sigma} \cdot I_1}{U_f} \cdot 100 = \frac{0,143 \cdot 7279,63}{6639,63} \cdot 100 = 15,694 \% \quad (3.52)$$

procentní rozptylová reaktance:

$$x_{\sigma} = u_{\sigma} = 15,694 \%$$

3.4 Návrh magnetického obvodu:

Magnetický obvod je tvořen „železem“ (plechy statorového jádra a výkovek rotoru) a vzduchovou mezerou, jsou to části stroje, kterou se uzavírá magnetický tok. Vzduchová mezera by měla být co nejmenší, aby se nezvyšovaly nároky na buzení, také s ohledem na mechanickou tuhost a uložení rotoru a na velikost drážkových harmonických. Proti jde požadavek na velikost poměrného proudu nakrátko, který se chce co největší, zde se musí volit kompromis.

Hlavní tok rotoru se převážně uzavírá pólem a a jhem rotoru. Jelikož je většinou osa pólu bez drážek, lze střední indukční čáru brát ve středu poloviny střední části pólu, jak je znázorněno na Obrázek 3.3.

3.4.1 Dimenzování magnetického obvodu:

Dimenzování magnetického obvodu vychází z velikosti magnetického toku a magnetických vlastností použitých materiálů. V tomto návrhu je zanedbána skutečnost, že část magnetického toku se uzavírá i přes úzké zuby rotoru. Důvodem je složitost výpočtu.

Velikost magnetického toku vypočtena dle rozměrů stroje a velikosti indukce ve vzduchové mezeře.

$$\begin{aligned}\Phi &= 0,63 \cdot t_p \cdot l_e \cdot B_\delta = 0,63 \cdot 1,884 \cdot 2,714 \cdot 0,9313 \\ \Phi &= 2,936 \text{ Wb}\end{aligned}\tag{3.53}$$

odhadovaná poměrná hodnota rozptylového toku:

$$\gamma_\sigma = 0,1$$

celkový magnetický tok:

$$\Phi' = (1 + \gamma_\sigma) \cdot \Phi = (1 + 0,1) \cdot 2,936 = 3,23 \text{ Wb}\tag{3.54}$$

odhadovaná hodnota poměrného proudu nakrátko:

$$i_k = 0,46$$

odhadovaná velikost vzduchové mezery:

$$\begin{aligned}\delta &= 5,6 \cdot i_k \cdot \frac{A}{B_\delta} \cdot t_p \cdot 10^{-4} \\ \delta &= 5,6 \cdot 0,46 \cdot \frac{130267,327}{0,9313} \cdot 1,884 \cdot 10^{-4} = 66,4 \text{ mm}\end{aligned}\tag{3.55}$$

zvolená velikost vzduchové mezery:

$$\delta = 67 \text{ mm}$$

odhadovaná indukce ve jhu statoru:

$$B_{j_s} = 1,3 \text{ T}$$

výška jha statoru:

$$h_{j_s} = \frac{\Phi}{2 \cdot k_{Fe} \cdot B_{j_s} \cdot l_e} = \frac{2,936}{2 \cdot 0,96 \cdot 1,3 \cdot 2,714} = 433 \text{ mm} \quad (3.56)$$

S ohledem na mechanickou tuhost statorového svazku zvolena výška jha statoru:

$$h_{j_s} = 440 \text{ mm}$$

vnější průměr statorového svazku:

$$D_e = D_1 + 2 \cdot (h_{j_s} + h_d) = 1,174 + 2 \cdot (0,44 + 0,213) \quad (3.57)$$

$$D_e = 2,48 \text{ m}$$

opravená indukce ve jhu statoru:

$$B_{j_s} = \frac{\Phi}{2 \cdot k_{Fe} \cdot h_{j_s} \cdot l_e} = \frac{2,936}{2 \cdot 0,96 \cdot 0,44 \cdot 2,714} = 1,281 \text{ T} \quad (3.58)$$

vnější průměr rotoru:

$$D_r = D_1 - 2 \cdot \delta = 1,174 - 2 \cdot 0,067 = 1,04 \text{ m} \quad (3.59)$$

Předběžný odhad rozměrů rotorové drážky:

hloubka rotorové drážky:

$$h_r = 126 \text{ mm}$$

šířka drážky:

$$b_r = 39 \text{ mm}$$

výška klínu:

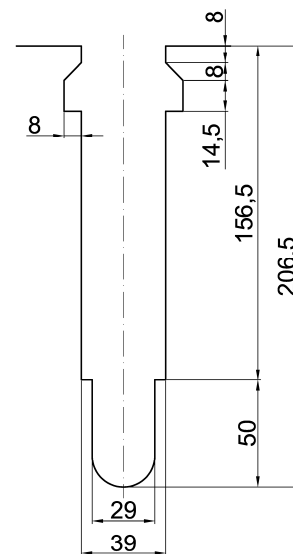
$$h_{k_r} = 22,5 \text{ mm}$$

šířka klínu:

$$b_{k_r} = 55 \text{ mm}$$

výška krčku:

$$h_{kr_r} = 8 \text{ mm}$$



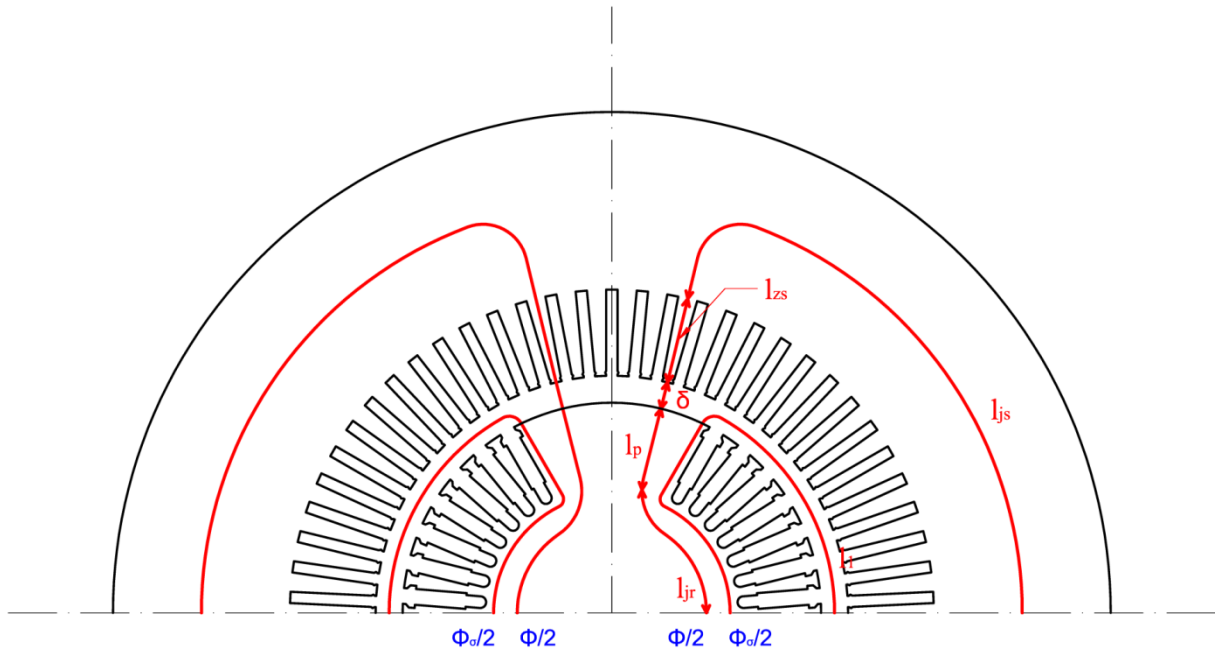
Obrázek 3.2: Odhadované rozměry rotorové drážky

Rotorové drážky jsou s dělením 39. Ze zvoleného 1/3 pokrytí obvodu širokým zubem vyplývá, že bude navinuto 28 drážek.

3.4.2 Magnetizační charakteristika:

Magnetizační charakteristika vyjadřuje závislost magnetického indukčního toku na magnetickém napětí v celém magnetickém obvodu. Pro sestavení magnetizační

charakteristiky je zapotřebí určit magnetická napětí v jednotlivých částech magnetického obvodu (viz. Obrázek 3.3) vypočítané pro různé hodnoty svorkového elektrického napětí, které odpovídají magnetickému indukčnímu toku. V této práci je zvolen rozsah elektrického napětí 40 až 140 % U_n . Následuje výpočet magnetických napětí v daných částech magnetického obvodu při napětí $U = 100\% U_n$, pro celý napěťový rozsah jsou jednotlivé vypočtené hodnoty zapsány v Tabulka 3.4.



Obrázek 3.3: Střední siločáry hlavního a rozptylového magnetického toku

Jhu rotoru:

výška jha rotoru:

$$h_{j_r} = \frac{1}{2} \cdot (D_r - 2 \cdot h_r) = \frac{1}{2} \cdot (1040 - 2 \cdot 126) = 363,5 \text{ mm} \quad (3.60)$$

délka rotoru:

$$L_r = L + 0,04 = 3,28 + 0,04 = 3,32 \text{ m} \quad (3.61)$$

indukce ve jhu rotoru:

$$B_{j_r} = \frac{\Phi'}{2 \cdot h_{j_r} \cdot L_p} = \frac{3,23}{2 \cdot 0,3635 \cdot 3,32} = 1,338 \text{ T} \quad (3.62)$$

Intenzita magnetického pole jha rotoru byla odečtena z magnetizační charakteristiky rotorové oceli (Příloha B):

$$H_{j_r} = 1437,7 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$$

střední délka siločáry jha rotoru:

$$l_{j_r} = \frac{D_r}{2} - h_r = \frac{1040}{2} - 126 = 394 \text{ mm} \quad (3.63)$$

magnetické napětí ve jhu rotoru pro $U = 100 \% U_n$:

$$F_{j_r} = H_{j_r} \cdot l_{j_r} = 1437,7 \cdot 0,394 = 566,5 \text{ A} \quad (3.64)$$

Široký zub rotoru:

výška širokého zuby:

$$h_p = h_r = 126 \text{ mm} \quad (3.65)$$

šířka širokého zuby rotoru na kořeni:

$$b_p = \pi \cdot \frac{D_r - 2 \cdot h_p}{6} = \pi \cdot \frac{1040 - 2 \cdot 156,5}{6} = 380,66 \text{ mm} \quad (3.66)$$

indukce širokého zuby rotoru:

$$B_p = \frac{\Phi'}{2 \cdot b_p \cdot L_p} = \frac{3,23}{2 \cdot 0,38066 \cdot 3,32} = 1,278 \text{ T} \quad (3.67)$$

Intenzita magnetického pole širokého zuby rotoru byla odečtena z magnetizační charakteristiky rotorové oceli (Příloha B):

$$H_p = 1328,9 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1} \quad (3.68)$$

magnetické napětí v širokém zuby rotoru pro $U = 100 \% U_n$:

$$F_p = H_p \cdot h_p = 1328,9 \cdot 0,1565 = 415,93 \text{ A} \quad (3.69)$$

Vzduchová mezera:

Carterův činitel respektující vliv radiálních kanálů:

$$k = \frac{1}{1 + \frac{\delta}{2 + \delta} \cdot \frac{i \cdot \check{s}_k}{l_e}} = \frac{1}{1 + \frac{67}{2 + 67} \cdot \frac{68 \cdot 8,488}{2714}} = 0,8295 \quad (3.70)$$

koeficient opravující Carterův činitel respektující drážkování statoru:

$$C_1 = \frac{\delta'}{\delta} = \frac{1 + \frac{b_d}{z_1}}{1 + \frac{b_d}{z_1} \cdot (1 - \sigma)} = \frac{1 + \frac{28}{27,882}}{1 + \frac{28}{27,882} \cdot (1 - 0,066)} = 1,0342 \quad (3.71)$$

kde

$$\sigma = \frac{2}{\pi} \cdot \left[\arctg \frac{b_d}{2 \cdot \delta} - \frac{\delta}{b_d} \cdot \ln \left(1 + \frac{b_d^2}{4 \cdot \delta^2} \right) \right] \quad (3.72)$$

$$\sigma = \frac{2}{\pi} \cdot \left[\arctg \frac{28}{2 \cdot 67} - \frac{67}{28} \cdot \ln \left(1 + \frac{28^2}{4 \cdot 67^2} \right) \right] = 0,066$$

koeficient opravující Carterův činitel:

$$C_2 = \frac{D_1}{D_1 - \delta} = \frac{1174}{1174 - 67} = 1,0605 \quad (3.73)$$

opravný Carterův činitel:

$$k' = C_1 \cdot C_2 \cdot k = 0,8295 \cdot 1,0342 \cdot 1,0605 = 0,9098 \quad (3.74)$$

magnetické napětí ve vzduchové mezeře pro $U=100\% U_n$:

$$F_\delta = 0,8 \cdot \delta \cdot B_\delta \cdot k' \cdot 10^6 = 0,8 \cdot 0,067 \cdot 0,9313 \cdot 0,9098 \cdot 10^6 \\ = 45415,91 \text{ A} \quad (3.75)$$

Zub statoru:

Při výpočtu magnetického napětí statorového zubu je respektována skutečnost, že průřez zubu v závislosti na výšce zubu se rovnoměrně mění. Dále je brána v úvahu skutečnost, že přibližně při vyšších indukcích než 1,8 T část magnetického toku prochází drážkou, tím je skutečná indukce v zubu nižší nežli zdánlivá [3]. Výpočet magnetického napětí zubu statoru je proveden následujícím postupem:

Zub statoru je rozdělen na tři části, kterými jsou hlava zubu, střed zubu a pata zubu. Abychom určili jednotlivé činitele odlehčení, musíme znát šířku zubu a drážky v daných místech, kde z_1 je šířka zubu (hlava zubu) na průměru vrtání plechů statoru D_1 , dále z_2 je šířka zubu na průměru:

$$D_2 = D_1 + h_d \quad (3.76)$$

procházejícím středem hloubky drážek (střed zubu) a z_3 je šířka zubu na průměru patní kružnice (pata zubu):

$$D_3 = D_1 + 2 \cdot h_d \quad (3.77)$$

obecně lze napsat pro $i = 1, 2, 3$:

$$z_i = t_{d_i} - b_d \quad (3.78)$$

kde

$$t_{d_i} = \frac{\pi \cdot D_i}{Q_1} \quad (3.79)$$

je drážková rozteč na daném průměru.

Pro každou část je spočtena zdánlivá indukce a činitel odlehčení na daném průměru.

zdánlivá indukce ve zvoleném místě:

$$B'_{z_i} = \frac{t_{d_i} \cdot B_\delta}{z_i \cdot k_{Fe}} \quad (3.80)$$

koeficient odlehčení:

$$k_{z_i} = \frac{S_d}{S_{z_i}} \quad (3.81)$$

Pomocí činitele odlehčení a magnetizační charakteristiky je určena skutečná indukce v zubu statoru dle rovnice (3.82).

$$B'_{z_i} = B_{z_i} + \mu_0 \cdot H_{z_i} \cdot k_{z_i} \quad (3.82)$$

Dále pro skutečnou indukci odečteme z magnetizační charakteristiky (Příloha A) intenzitu magnetického pole v daném úseku a dle Simpsonova pravidla, viz. rovnice (3.83), určíme střední hodnotu intenzity magnetického pole, ze součinu této hodnoty a výšky zubu je získána hodnota magnetického napětí v zubu. [2]

střední hodnota magnetické intenzity:

$$H_{stř} = \frac{H_{z_1} + 4 \cdot H_{z_2} + H_{z_3}}{6} \quad (3.83)$$

velikost magnetického napětí v zubu statoru:

$$F_z = H_{stř} \cdot l_z \quad (3.84)$$

V následující Tabulka 3.3 jsou uvedeny vypočtené hodnoty jednotlivých veličin získané výše uvedeným postupem. [3]

Tabulka 3.3: Magnetizační charakteristika zubové vrstvy statoru

Pozice:	D_i [mm]	t_{di} [mm]	z_i [mm]	B'_{zi} [T]	H_{zi} [A/m]	$H_{zstř}$ [A/m]	F_z [A]
Hlava	1174	55,88	27,88	1,944	23048,98	4282,17	912,10
Zub	1387	66,02	38,02	1,426	628,45		
Pata	1600	76,16	48,16	1,126	130,26		

Jho statoru:

indukce jha statoru:

$$B_{js} = \frac{\Phi}{2 \cdot h_{js} \cdot l_e \cdot k_{Fe}} = \frac{2,936}{2 \cdot 0,44 \cdot 2,714 \cdot 0,96} = 1,281 \text{ T} \quad (3.85)$$

Intenzita magnetického pole jha statoru byla odečtena z magnetizační charakteristiky statorových plechů (Příloha A):

$$H_{js} = 245,347 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$$

střední délka siločáry jha statoru:

$$l_{js} \doteq t_p = 1,844 \text{ m}$$

magnetické napětí ve jhu statoru pro $U = 100 \% U_n$:

$$F_{js} = H_{js} \cdot l_{js} = 245,347 \cdot 1,844 = 452,447 \text{ A} \quad (3.86)$$

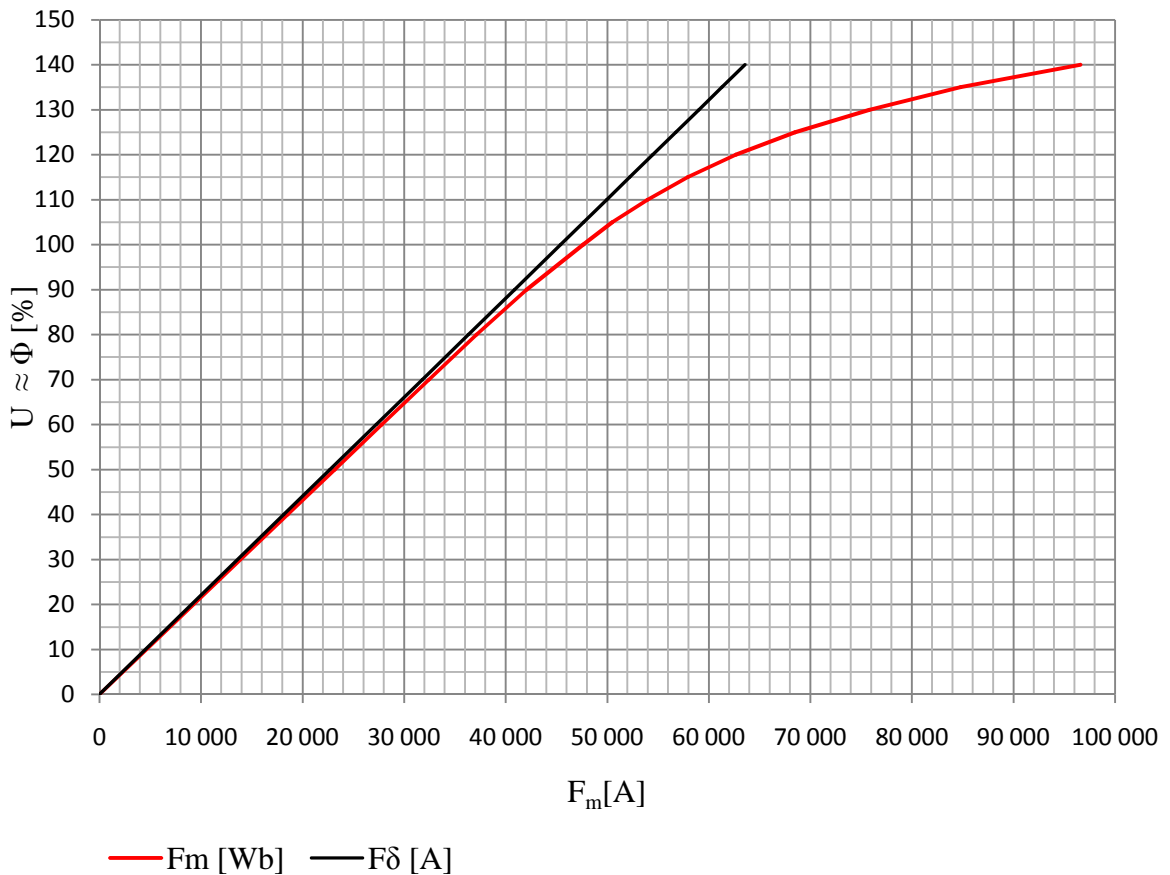
Výše uvedeným postupem byla určena magnetických napětí v jednotlivých úsecích magnetického obvodu a jejich součtem získána velikost celkového magnetického napětí celého magnetického obvodu dle následující rovnice.

$$F_m = F_{jr} + F_p + F_\delta + F_z + F_{js} \quad (3.87)$$

V Tabulka 3.4 jsou uvedeny vypočtené hodnoty potřebné pro sestavení charakteristiky naprázdno. Na Obrázek 3.4 je graficky znázorněna magnetizační charakteristika celého magnetického obvodu.

Tabulka 3.4: Magnetizační charakteristika celého magnetického obvodu:

$U/U_n [-]$	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,05	1,1	1,15	1,2	1,25	1,3	1,35	1,4
$B_8 [T]$	0,373	0,466	0,559	0,652	0,745	0,838	0,931	0,978	1,024	1,071	1,118	1,164	1,211	1,257	1,304
$\varphi [Wb]$	1,175	1,468	1,762	2,056	2,349	2,643	2,936	3,083	3,230	3,377	3,524	3,671	3,817	3,964	4,111
$F_8 [A]$	18166,36	22707,95	27249,54	31791,13	36332,73	40874,32	45415,91	47686,70	49957,50	52228,29	54499,09	56769,88	59040,68	61311,47	63582,27
$B_{z1} [T]$	0,778	0,972	1,167	1,361	1,555	1,750	1,944	2,042	2,139	2,236	2,333	2,430	2,528	2,625	2,722
$H_{z1} [A/m]$	70,22	93,54	149,28	403,01	1855,15	8393,58	23048,98	39525,43	59375,83	85104,09	114503,48	147361,57	183051,91	219843,85	256635,79
$B_{z2} [T]$	0,570	0,713	0,855	0,998	1,141	1,283	1,426	1,497	1,568	1,640	1,711	1,782	1,854	1,925	1,996
$H_{z2} [A/m]$	65,77	65,77	71,66	97,69	136,26	248,55	628,45	1040,94	2130,14	3951,13	6605,31	10272,01	14976,25	21359,76	32415,32
$B_{z3} [T]$	0,450	0,563	0,675	0,788	0,901	1,013	1,126	1,182	1,238	1,294	1,351	1,407	1,463	1,520	1,576
$H_{z3} [A/m]$	47,73	63,52	71,04	71,04	83,07	100,36	130,26	157,88	197,05	262,96	372,35	549,67	818,09	1326,97	2289,35
$H_{stf} [A/m]$	63,51	70,03	88,49	144,14	413,88	1581,35	4282,17	7307,84	11348,91	16861,93	23549,51	31499,88	40629,17	51101,64	64764,41
$F_z [A]$	13,53	14,92	18,85	30,70	88,16	336,83	912,10	1556,57	2417,32	3591,59	5016,05	6709,47	8654,01	10884,65	13794,82
$B_p [T]$	0,512	0,640	0,768	0,897	1,025	1,153	1,281	1,345	1,409	1,473	1,537	1,601	1,665	1,729	1,793
$H_p [A/m]$	53,74	61,42	69,48	82,58	102,43	141,49	245,35	359,55	557,02	880,81	1561,67	2826,81	4803,57	7433,93	10896,06
$F_p [A]$	49,55	56,63	64,06	76,15	94,44	130,46	452,45	331,53	513,60	812,16	1439,95	2606,48	4429,17	6854,51	10046,79
$B_r [T]$	0,511	0,639	0,767	0,895	1,022	1,150	1,278	1,342	1,406	1,470	1,534	1,597	1,661	1,725	1,789
$H_r [A/m]$	511,18	638,98	766,77	894,57	1022,37	1153,19	1328,85	1444,52	1599,56	1856,11	2295,09	2980,37	4167,63	6335,39	9748,37
$F_r [A]$	80,00	100,00	120,00	140,00	160,00	180,47	207,96	226,07	250,33	290,48	359,18	466,43	652,23	991,49	1525,62
$B_{jr} [T]$	0,535	0,669	0,803	0,937	1,071	1,204	1,338	1,405	1,472	1,539	1,606	1,673	1,740	1,807	1,874
$H_{jr} [A/m]$	535,31	669,14	802,96	936,79	1070,62	1219,22	1437,72	1597,64	1869,34	2339,92	3109,59	4489,56	6959,47	10933,50	17560,05
$F_{jr} [A]$	233,23	291,54	349,85	408,16	466,46	531,21	626,41	696,08	814,46	1019,49	1354,83	1956,08	3032,21	4763,68	7650,84
$F_m [A]$	18542,67	23171,04	27802,30	32446,14	37141,79	42053,29	47614,83	50496,95	53953,21	57942,02	62669,10	68508,35	75808,31	84805,80	96600,33



Obrázek 3.4: Magnetizační charakteristika celého magnetického obvodu

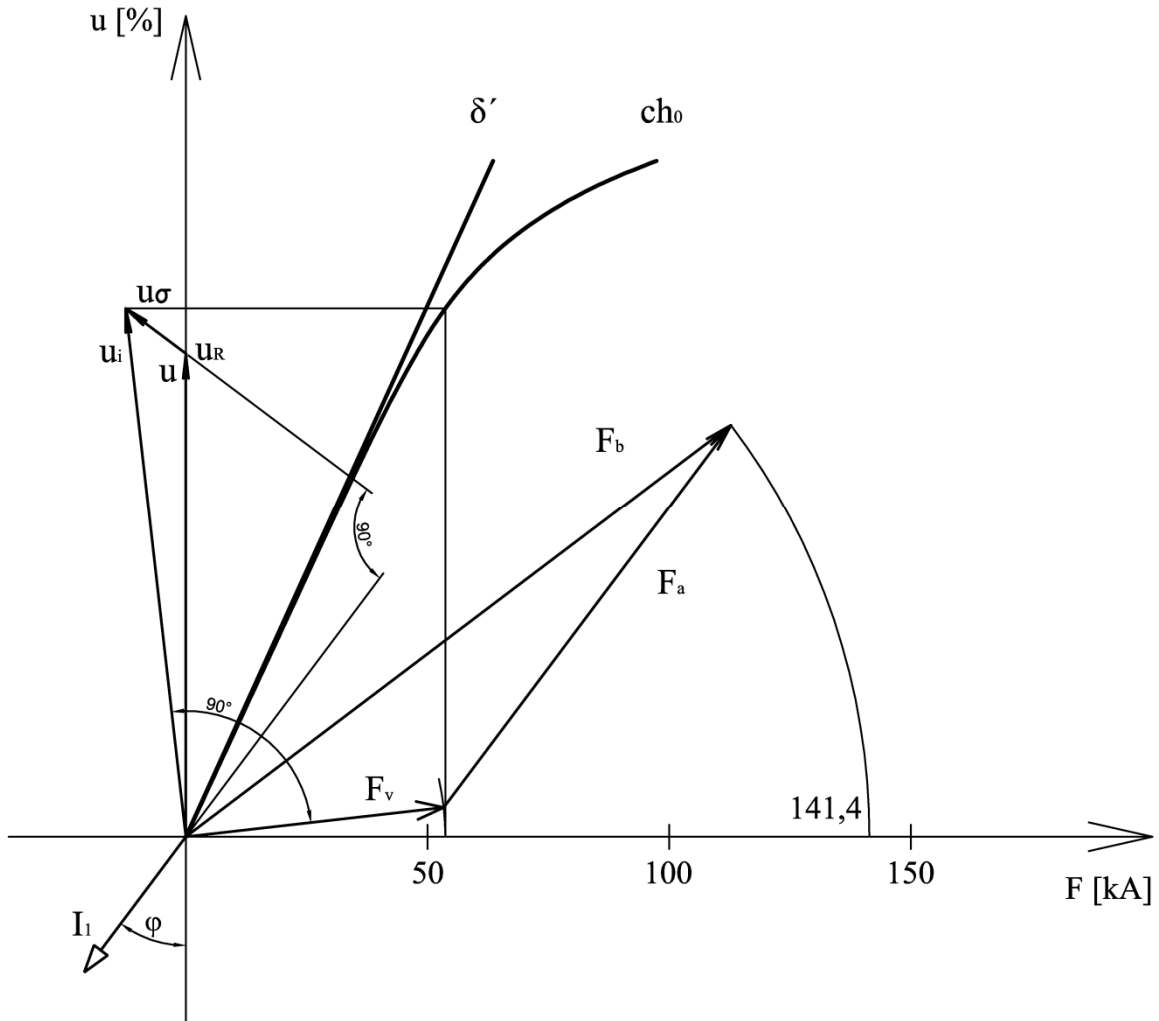
3.5 Návrh budícího vinutí:

Pro určení magnetického budícího napětí při jmenovitém výkonu a účínku je použita grafická metoda, která spojuje fázorový diagram stroje a magnetizační charakteristiku celého magnetického obvodu. Na vodorovné ose je vyneseno magnetické napětí a na svislé ose poměrné fázové napětí. Do grafu zakreslíme výše vypočtenou magnetizační charakteristiku, velikost indukovaného napětí u_i , která je rovna součtu fázového napětí a úbytků na statorovém odporu a reaktanci. Pro indukované napětí u_i odečteme z magnetizační charakteristiky magnetické napětí F_v potřebného pro vyvolání magnetického toku indukujícího právě velikost napětí u_i . Fázor F_v je kolmý k napětí u_i , k fázoru F_v přičteme fázor magnetického napětí reakce kotvy. Jejich součin odpovídá hledanému magnetickému budícímu napětí, jeho velikost odečteme na vodorovné ose. Grafické určení magnetického budícího napětí je znázorněno na Obrázek 3.5. [2]

magnetické napětí reakce kotvy[1]:

$$F_r = \frac{2,7}{p} \cdot N_s \cdot I_1 \cdot k_{v_1} = \frac{2,7}{1} \cdot 11 \cdot 7279,63 \cdot 0,9166 \quad (3.88)$$

$$F_r = 99086,2 \text{ A}$$



Obrázek 3.5: Grafické určení magnetického budícího napětí pro jmenovitý výkon a účinnost

Pomocí grafického postupu byla zjištěna hodnota budícího magnetického napětí pro jmenovitý výkon a účinnost [2]:

$$F_b = 141400 \text{ A}$$

zvolené budící napětí:

$$U_b = 340 \text{ V} \quad (3.89)$$

střední délka čela budícího vinutí:

$$l_{\check{c}_r} = 0,76 \cdot \frac{\pi \cdot D_1}{2} = 0,76 \cdot \frac{\pi \cdot 1,174}{2} = 1,402 \text{ m} \quad (3.90)$$

střední délka budící cívky:

$$l_{b_s} = 2 \cdot (L_r + l_{\check{c}_r}) = 2 \cdot (3,32 + 1,402) = 9,444 \text{ m} \quad (3.91)$$

odhadovaný průřez holého vodiče budícího vinutí:

$$S'_{Cu_b} = \rho_{Cu} \cdot \frac{2p \cdot l_{bs} \cdot F_b}{U_b} = \frac{1}{56} \cdot \frac{2 \cdot 1,402 \cdot 141400}{340} \quad (3.92)$$

$$S'_{Cu_b} = 137,61 \text{ mm}^2$$

S ohledem na rezervu budícího napětí byl zvolen vodič 37 x 5,6 mm o průřezu 205,96 mm², který respektuje zaoblení hran a je dán výrobcem.

$$S_{Cu_b} = 205,96 \text{ mm}^2 \quad (3.93)$$

zvolená proudová hustota budícího vinutí:

$$\sigma_{Cu_b} = 5,1 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2} \quad (3.94)$$

odhadovaný budící proud:

$$I_b = \sigma_{Cu_b} \cdot S_{Cu_b} = 5,1 \cdot 205,96 = 1050,38 \text{ A} \quad (3.95)$$

odhad počtu závitů budící cívky:

$$N_b = \frac{F_b}{I_b} = \frac{141400}{1050,38} \doteq 135 \quad (3.96)$$

počet vodičů v drážce:

$$n_{br} = 2 \cdot \frac{N_b}{\frac{Q_r}{2p}} = 2 \cdot \frac{135}{\frac{28}{2}} \doteq 19 \quad (3.97)$$

opravený počet závitů budící cívky:

$$N_b = \frac{Q_r}{2p} \cdot \frac{n_{br}}{2} = \frac{28}{2} \cdot \frac{19}{2} = 133 \quad (3.98)$$

opravený budící proud:

$$I_b = \frac{F_b}{N_b} = \frac{141400}{133} = 1063,2 \text{ A} \quad (3.99)$$

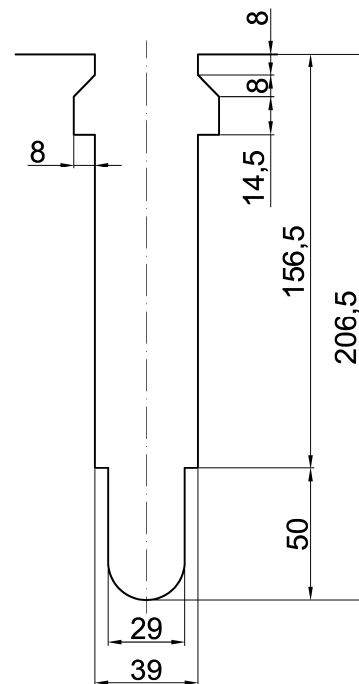
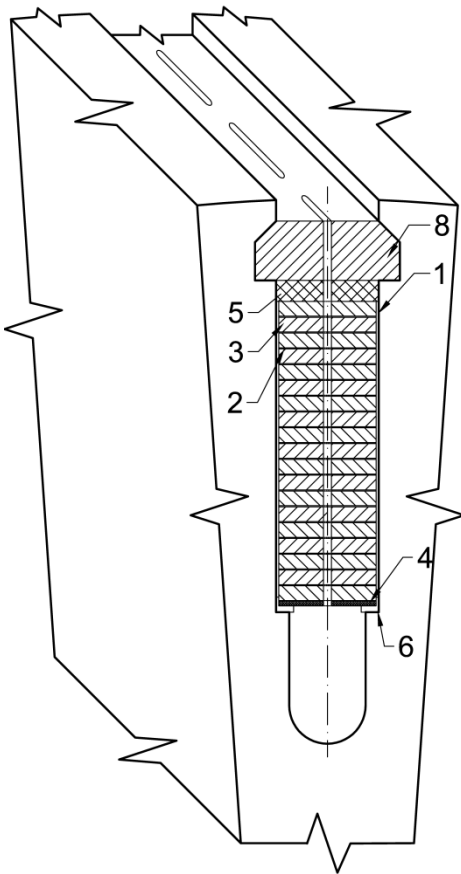
opravená proudová hustota budícího vinutí:

$$\sigma_{Cu_b} = \frac{I_b}{S_{Cu_b}} = \frac{1063,2}{205,96} = 5,064 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2} \quad (3.100)$$

Dle Tabulka 3.5 je stanovena bilance rotorové drážky, na Obrázek 3.7 je znázorněn řez rotorovou drážkou a uspořádání vodičů a izolace v rotorové drážce. Obrázek 3.6 zobrazuje konečné rozměry rotorové drážky. Z Obrázek 3.7 vyplývá, že každý vodič a izolace mají v podélné ose vyraženy ventilační otvory z důvodu lepšího odvedení ztrát z budícího vinutí. Rozměry těchto otvorů jsou 3x50 mm, 45 těchto otvorů rovnoměrně rozloženy po celé drážce rotorové drážky s roztečí 68 mm, přičemž otvor ve středu rotoru je fixační, aby bylo vinutí zajištěno kvůli posunům a také s ohledem na souměrné teplotní dilatace.

Tabulka 3.5: Uspořádání vodičů a izolace v drážkách rotoru

Pozice	Položka	Šířka	Hloubka
1	Izolace proti železu	1,2 = 2	
2	Izolace mezi závity		(19-1)·0,4 = 7,2
	Σ izolace	2	7,2
3	Holý vodič	37	19,5,6 = 106,4
4	Vložka na dno		2
5	Vložka pod klín		8
6	Korýtko		2
7	Vůle	0	0,4
	Hloubka drážky bez klínu		126
8	Klín + krček		30,5
Celková šířka a hloubka drážky bez chladičho kanálu		$b_r = 39 \text{ mm}$	$h_r = 156,5 \text{ mm}$



Obrázek 3.7: Uspořádání vodičů a izolace v rotorové drážce

Obrázek 3.6: Rozměry rotorové drážky

elektrický odpor budícího vinutí při 20 °C:

$$R_{b/20} = \rho_{Cu} \cdot \frac{l_{bs} \cdot N_b \cdot 2p}{S_{Cu_b}} = \frac{1}{56} \cdot \frac{9,444 \cdot 133 \cdot 2}{205,96} = 0,216 \Omega \quad (3.101)$$

elektrický odpor budícího vinutí při 95 °C:

$$R_{b/95} = R_{b/20} \cdot \frac{\theta_2 + 235}{20 + 235} = 0,216 \cdot \frac{95 + 235}{20 + 235} = 0,28 \Omega \quad (3.102)$$

3.6 Ztráty a účinnost:

Jouelovy ztráty:

ve vinutí statoru:

$$\begin{aligned} \Delta P_{Cu_1} &= m \cdot R_{1/95} \cdot I_1^2 = 3 \cdot 1,123 \cdot 10^{-3} \cdot 7279,63^2 \\ \Delta P_{Cu_1} &= 178,53 \text{ kW} \end{aligned} \quad (3.103)$$

v budícím vinutí:

$$\Delta P_{Cu_b} = R_{b/95} \cdot I_b^2 = 0,28 \cdot 1063,2^2 = 323,39 \text{ kW} \quad (3.104)$$

Ztráty v železe:

v jádře statoru:

ztrátové číslo plechů při indukci 1,5 T a frekvenci 50 Hz:

$$\Delta p_{Fe} = 2,5 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$$

hmotnost jha statoru:

$$\begin{aligned} m_{Fe_j} &= \frac{\pi}{4} \cdot (D_e^2 - D_3^2) \cdot l_e \cdot k_{Fe} \cdot \rho_{Fe} \\ m_{Fe_j} &= \frac{\pi}{4} \cdot (2,48^2 - 1,6^2) \cdot 2,714 \cdot 0,96 \cdot 7650 = 56205,04 \text{ kg} \end{aligned} \quad (3.105)$$

kde ρ_{Fe} je měrná hmotnost oceli:

$$\rho_{Fe} = 7650 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

ztráty ve jhu statoru:

$$\begin{aligned} \Delta P_{Fe_j} &= 1,4 \cdot \Delta p_{Fe} \cdot \left(\frac{B_{j_s}}{1,5}\right)^2 \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} \cdot m_{Fe_j} \\ \Delta P_{Fe_j} &= 1,4 \cdot 2,5 \cdot \left(\frac{1,281}{1,5}\right)^2 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1,3} \cdot 56205,04 = 143,41 \text{ kW} \end{aligned} \quad (3.106)$$

v zubech statoru:

hmotnost zubů statoru:

$$\begin{aligned} m_{Fe_z} &= Q_1 \cdot z_2 \cdot h_d \cdot l_e \cdot k_{Fe} \cdot \rho_{Fe} \\ m_{Fe_z} &= 66 \cdot 0,03802 \cdot 0,213 \cdot 2,714 \cdot 0,96 \cdot 7650 \\ m_{Fe_z} &= 10862,34 \text{ kg} \end{aligned} \quad (3.107)$$

ztráty v zubech statoru:

$$\Delta P_{Fe_z} = 2 \cdot \Delta p_{Fe} \cdot \left(\frac{B_{z_2}}{1,5}\right)^2 \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} \cdot m_{Fe_z} \quad (3.108)$$

$$\Delta P_{Fez} = 2 \cdot 2,5 \cdot \left(\frac{1,426}{1,5}\right)^2 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1,3} \cdot 10862,34 = 49,07 \text{ kW}$$

celkové ztráty v železe statoru:

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_{Fej} + \Delta P_{Fez} = 143,41 + 49,07 = 192,48 \text{ kW} \quad (3.109)$$

ztráty v budícím systému:

$$\Delta P_b \cong 0,1 \cdot \Delta P_{Cu_b} = 0,1 \cdot 323,39 = 32,34 \text{ kW} \quad (3.110)$$

Mechanické ztráty:

činitel ventilačních ztrát:

$$A_v = 0,7$$

obvodová rychlost rotoru:

$$v = \frac{\pi \cdot D_r \cdot n}{60} = \frac{\pi \cdot 1,04 \cdot 3000}{60} = 163,36 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (3.111)$$

ventilační ztráty:

$$\begin{aligned} \Delta P_v &= A_v \cdot v^{2,5} \cdot D_r \cdot \sqrt{L_r} = 0,7 \cdot 163,36^{2,5} \cdot 1,04 \cdot \sqrt{3,32} \\ \Delta P_v &= 452,46 \text{ kW} \end{aligned} \quad (3.112)$$

ložiskové ztráty dané výrobcem ložisek:

$$\Delta P_{lož} = 140 \text{ kW}$$

celkové mechanické ztráty:

$$\Delta P_m = \Delta P_v + \Delta P_{lož} = 452,46 + 140 = 592,46 \text{ kW} \quad (3.113)$$

Odhadovaná hodnota přídavných ztrát:

$$\begin{aligned} \Delta P_p &= \left(81,5 - \frac{26,2 \cdot \delta \cdot Q_1}{\pi \cdot D_1}\right) \cdot D_1^2 \cdot \sqrt{L} \cdot \frac{f}{50} \cdot \left(\frac{A}{75000}\right)^2 \\ \Delta P_p &= \left(81,5 - \frac{26,2 \cdot 0,067 \cdot 66}{\pi \cdot 1,174}\right) \cdot 1,174^2 \cdot \sqrt{3,32} \cdot \frac{50}{50} \\ &\quad \cdot \left(\frac{130267,327}{75000}\right)^2 = 377,18 \text{ kW} \end{aligned} \quad (3.114)$$

Celkové ztráty:

$$\begin{aligned} \sum \Delta P &= \Delta P_{Cu_1} + \Delta P_{Cu_b} + \Delta P_{Fe} + \Delta P_b + \Delta P_m + \Delta P_p = \\ &= 178,53 + 323,39 + 192,48 + 32,34 + 592,46 + 377,18 = \\ &= 1696,38 \text{ kW} \end{aligned} \quad (3.115)$$

Účinnost při referenční teplotě 95 °C pro jmenovitý výkon a účinník:

$$\begin{aligned} \eta &= 100 \cdot \left(1 - \frac{\sum \Delta P}{\sum \Delta P + P}\right) = 100 \cdot \left(1 - \frac{1698,77}{1698,77 + 116000}\right) \\ \eta &= 98,56 \% \end{aligned} \quad (3.116)$$

4. Jednoduchá kontrola oteplení aktivních částí

Tato jednoduchá kontrola oteplení má za úkol zjistit, zda tepelné využití izolace statorového a budícího vinutí bude vyhovovat požadavkům normy. Současný standard je, že izolace je tř. 155 (F) a využívá se jen do limitu tř. 130 (B), aby byla zajištěna dlouhá životnost.

Výsledné hodnoty oteplení vychází z naměřených charakteristik oteplení naměřených již na vyrobeném turboalternátoru, které odpovídají vypočtenému statorovému a budícímu proudu v elektromagnetickém výpočtu stroje.

4.1 Oteplení statorového vinutí

Kontrola oteplení statorového vinutí při jmenovitém statorovém proudu je založena na následujícím postupu. Naměřenou závislost oteplení, proložíme lineární funkcí. Poté nalezneme průsečík této funkce s přímkou zastupující kvadrát proudu, pro který je požadována hodnota kontrola oteplení, v tomto případě se jedná o vypočtený jmenovitý statorový proud. V Tabulka 4.1 jsou znázorněny naměřené hodnoty oteplení statorového vinutí. Na Obrázek 4.1 je zobrazena závislost oteplení statorového vinutí a nalezení průsečíku potřebného pro určení daného oteplení.

Tabulka 4.1: Naměřené hodnoty oteplení statorového vinutí

S [%]	I ₁ [A]	I ₁ ² [A ²]	ΔT ₁ [K]
0	0,0	0,0E+00	19,81
70	5095,7	2,6E+07	43,01
80	5823,7	3,4E+07	50,10
90	6551,7	4,3E+07	58,13
100	7279,6	5,3E+07	67,10
110	8007,6	6,4E+07	77,00
120	8735,6	7,6E+07	87,84
130	9463,5	9,0E+07	99,60

Naměřená závislost oteplení statorového vinutí byla nahrazena pomocí lineární regrese funkcí $\Delta T_1 = a \cdot I_1^2 + b$, kde hodnoty koeficientů jsou:

$$a = 8,909 \cdot 10^{-7}$$

$$b = 19,863$$

a tomu odpovídající určení oteplení:

$$\Delta T_1 = a \cdot I_1^2 + b = 8,909 \cdot 10^{-7} \cdot 7279,63^2 + 19,863$$

$$\Delta T_1 = 67,07 \text{ K}$$

(4.1)

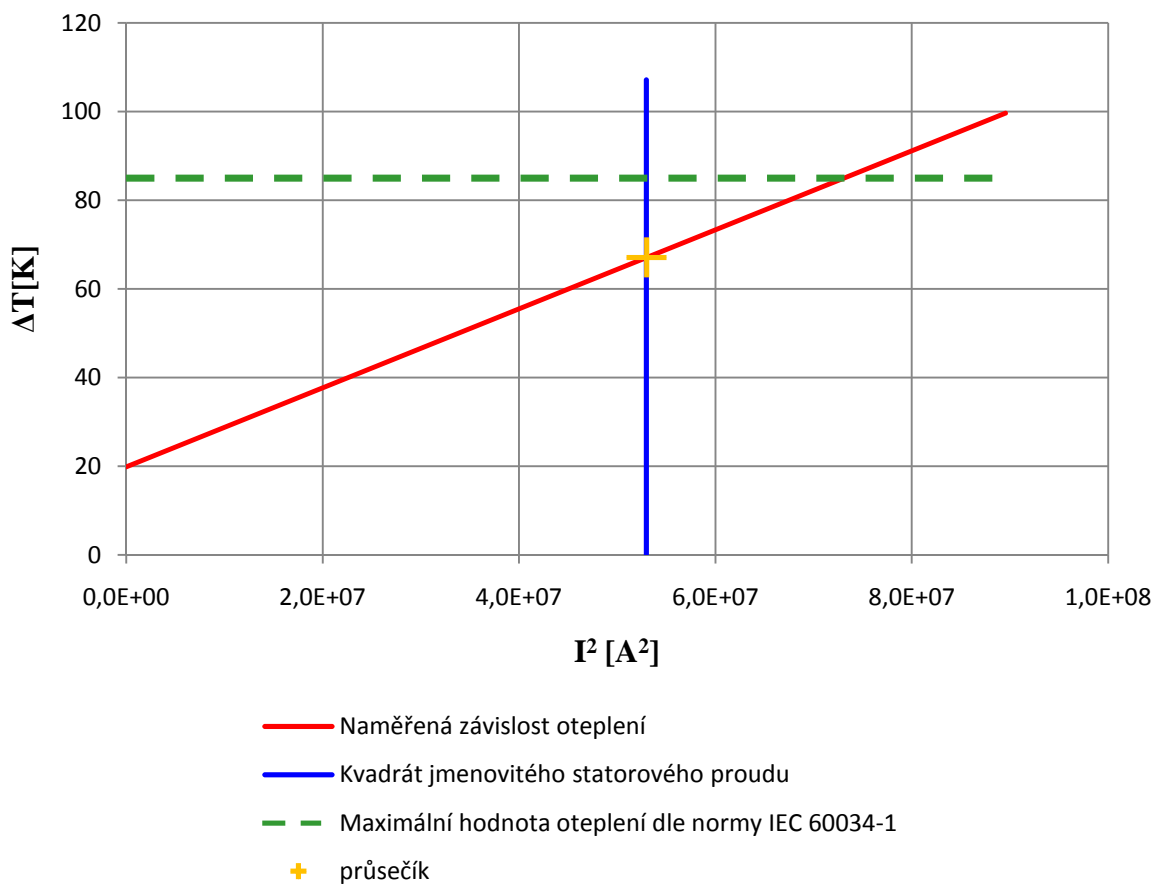
teplota statorového vinutí:

$$T_1 = \Delta T_1 + T_{vst} = 67,07 + 40 = 107,07 \text{ K} \quad (4.2)$$

Výše vypočtená teplota vyhovuje teplotní třídě izolace 130 (B) dle normy IEC 60034-1. Dle uvedené normy je limit oteplení pro statorové vinutí 85 K (teplota 125°C minus chladící vzduch na vstupu do stroje 40°C), tomu odpovídá níže uvedená hodnota statorového proudu.

$$I'_1 = \sqrt{\frac{\Delta T - b}{a}} = \sqrt{\frac{85 - 19,863}{8,909 \cdot 10^{-7}}} = 8550,82 \text{ A} \quad (4.3)$$

Z čehož vyplývá, že z hlediska oteplení má statorové vinutí dostačující rezervu.



Obrázek 4.1: Závislost oteplení statorového vinutí na statoru na kvadrátu statorového proudu

4.2 Oteplení budícího vinutí

Kontrola oteplení budícího vinutí spočívá v nalezení průsečíků dvou funkcí, a to náhradní funkce naměřené závislosti oteplení rotorového vinutí na ztrátách v budícím vinutí a náhradní funkce zastupující závislost oteplení na vypočtených ztrátách v budícím vinutí. K určení výsledného oteplení byl použit obdobný postup jako u výše uvedeného oteplení statorového vinutí.

Tabulka 4.2: Naměřená hodnoty oteplení budícího vinutí.

$\Delta P'_{\text{Cub}} = R'_b I_b'^2$ [kW]	0,00	377,41
$\Delta T'_2$ [K]	13,62	78,20

Naměřená závislost oteplení budícího vinutí byla nahrazena pomocí lineární regrese funkcí $\Delta T'_2 = a \cdot R'_b I_b'^2 + b$, kde hodnoty koeficientů jsou:

$$a = 0,1711$$

$$b = 13,624$$

$$\Delta T'_2 = a \cdot R'_b I_b'^2 + b = 0,1711 \cdot R'_b I_b'^2 + 13,624 \quad (4.4)$$

A vypočtená závislost oteplení na vypočtených ztrátách v budícím vinutí byla nahrazena funkcí, viz. rovnice (4.5), získanou proložením hodnot uvedených v Tabulka 4.3.

$$\Delta T_2 = 1,0205 \cdot R_b I_b^2 - 275 \quad (4.5)$$

Tabulka 4.3: Vypočtená závislost oteplení na ztrátách v budícím vinutí

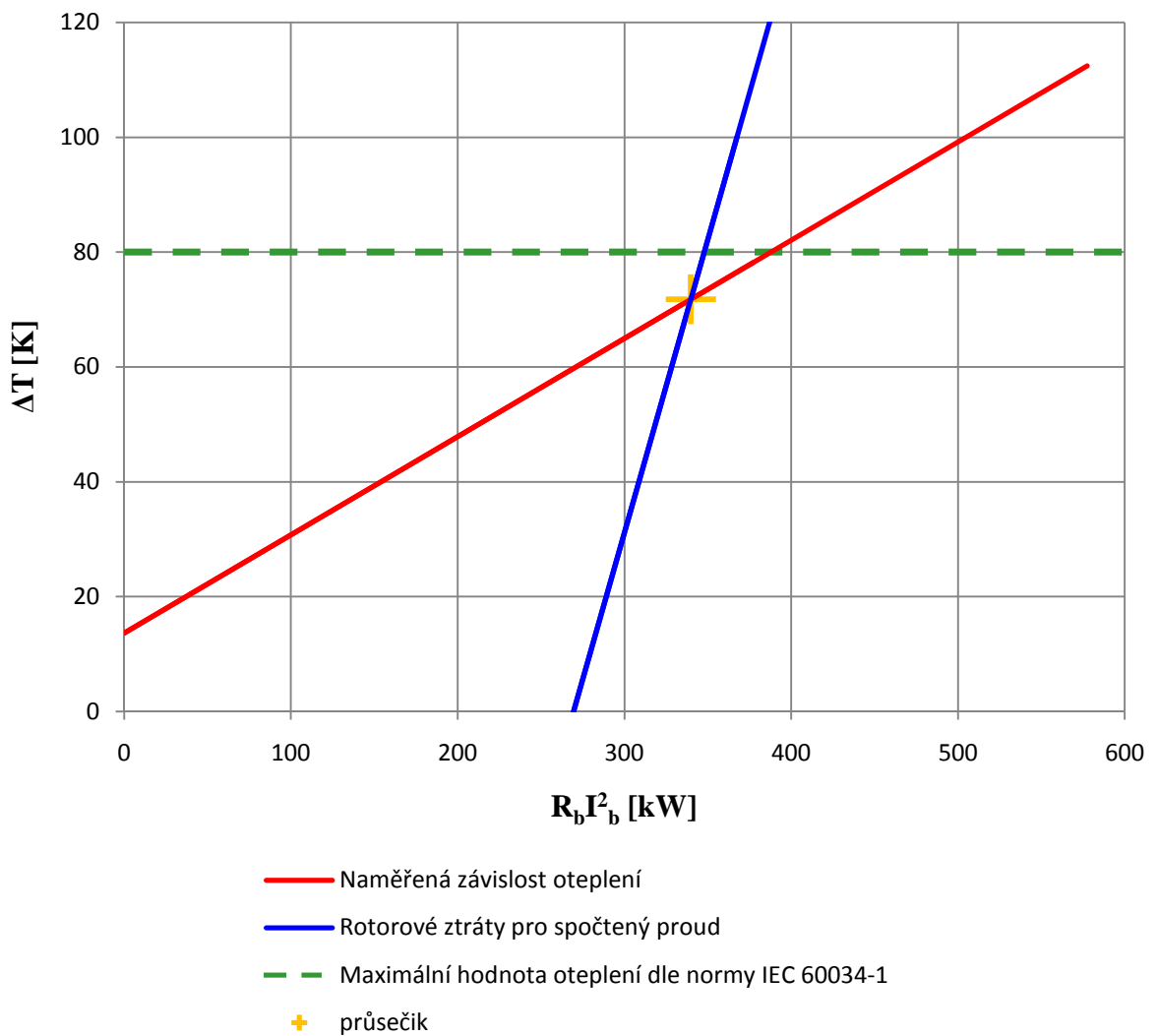
$\Delta P_{\text{Cub}} = R_b I_b^2$ [kW]	269,49	367,48
ΔT_2 [K]	0,00	100,00

Vyřešením průsečíku rovnic (4.4) a (4.5) jako rovnic o dvou neznámých získáme hodnotu výsledného oteplení budícího vinutí uvedenou v následující Tabulka 4.4.

Tabulka 4.4: Vypočtené hodnoty oteplení

$\Delta P_b = R_b I_b^2$ [kW]	ΔT [K]	Teplota [°C]	I_b [A]
339,82	71,77	111,77	1063,15
387,93	80,00	120,00	1139,40

Výsledná hodnota oteplení budícího vinutí je 71,77 K a tomu odpovídající teplota budícího vinutí 111,77 °C, což vyhovuje teplotní třídě 130 (B) podle normy IEC 60034-1. Tato norma předepisuje maximální teplotu budícího vinutí 120 °C (mínus chladící vzduch na vstupu do stroje 40°C dává oteplení 80K), tomu odpovídá možnost budit stroj proudem až 1139,4 A. Závislost oteplení budícího vinutí na ztrátách v budícím vinutí a nalezení hledané hodnoty oteplení je zobrazeno na Obrázek 4.2.



Obrázek 4.2: Závislost oteplení budícího vinutí na ztrátách v budícím vinutí

5. Ověření vypočtené charakteristiky naprázdno výpočtem MKP

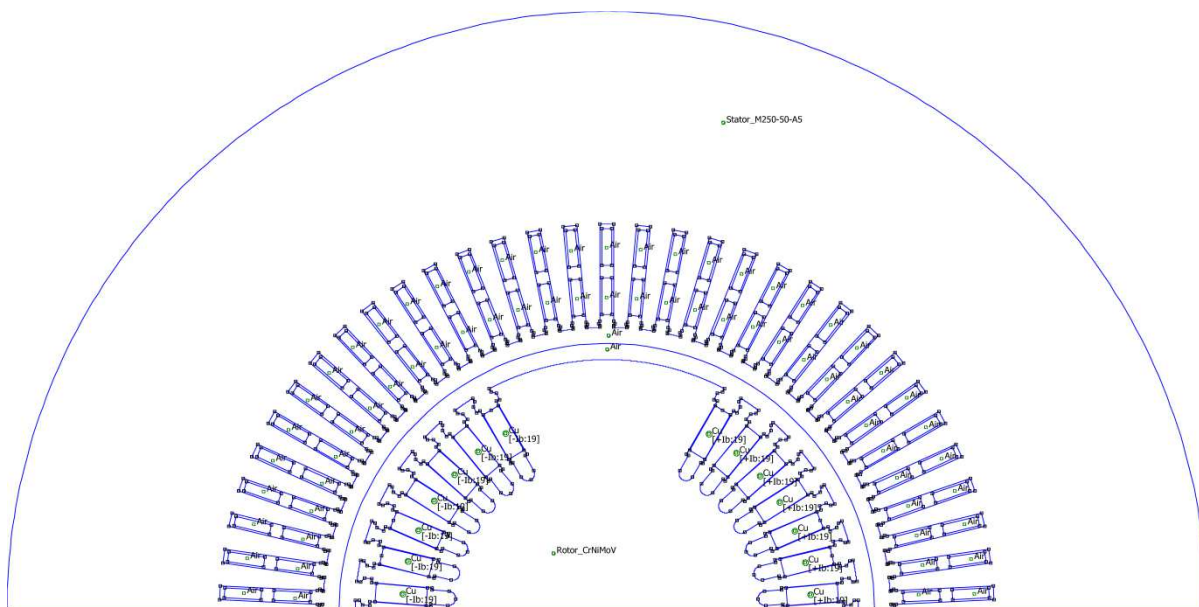
5.1 Metoda konečných prvků

Metoda konečných prvků je založena na diskretizaci spojitého problému do určitého konečného počtu elementárních prvků, tím je vytvořen určitý fyzikální model dané oblasti, pro který je vzniklý problém řešen. Parametry tohoto modelu jsou určovány z vlastností jednotlivých uzlů. Uzel je místo, ve kterém se stýkají jednotlivé elementární prvky. Elementární prvky by měli mít co nejjednodušší geometrický tvar. Pro každý uzel v řešené oblasti je řešená rovnice aproximována na rovnici algebraickou. Získaná soustava algebraických rovnic je poté řešena numerickou metodou.

Pro výpočty pomocí metody konečných prvků byl v této diplomové práci použit volně dostupný program FEMM.

5.2 Model synchronního stroje v programu FEMM

Prvním krokem k vytvoření modelu stroje v programu je import geometrie vytvořené v programu AutoCAD a přiřazení materiálových vlastností a okrajových podmínek jednotlivým oblastem, jak je znázorněno na Obrázek 5.1.



Obrázek 5.1: Model turboalternátoru v programu FEMM

Stator je skládán z plechů typu M250-50-A5 tloušťky 0,5 mm. Statorovým plechům byla přiřazena nelineární magnetizační charakteristika, která je zobrazena v příloze A. Rotorový výkovek je z ušlechtilé oceli CrNiMoV a v modelu mu byla přiřazena magnetizační charakteristika podle přílohy B.

Materiál oblasti budící vinutí je z elektrotechnické mědi, přičemž této oblasti byla přiřazena elektrická vodivost při teplotě 111,77 °C.

$$\gamma_{Cu/REF} = \gamma_{Cu/20} \cdot \frac{20 + 235}{T_{REF} + 235} = 56 \cdot \frac{20 + 235}{111,77 + 235} \quad (5.1)$$

$$\gamma_{Cu/111,77} = 41,18 \text{ MS/m}$$

kde $\gamma_{Cu/20}$ je měrná vodivost mědi při 20 °C.

$$\gamma_{Cu/20} = 56 \text{ MS/m}$$

Oblast budícího vinutí v jedné drážce je složena z 19 závitů, každým závitem prochází budící proud o zadané hodnotě.

Obvodu stroje byla přiřazena níže zmíněná Dirichletova podmínka a horizontální ose taktéž výše zmíněná Neumannova podmínka.

Dirichetova podmínka

Tento typ okrajové podmínky explicitně definuje hodnotu magnetického potenciálu A dané hranici. Nejběžněji je definováno $A = 0$. Je používána pro omezení magnetického toku podél označené hranice.

Neumannova podmínka

Touto podmínkou je definovaná hodnota normálové derivace podél hranice. Je definována podmínkou:

$$\frac{\partial A}{\partial n} = 0$$

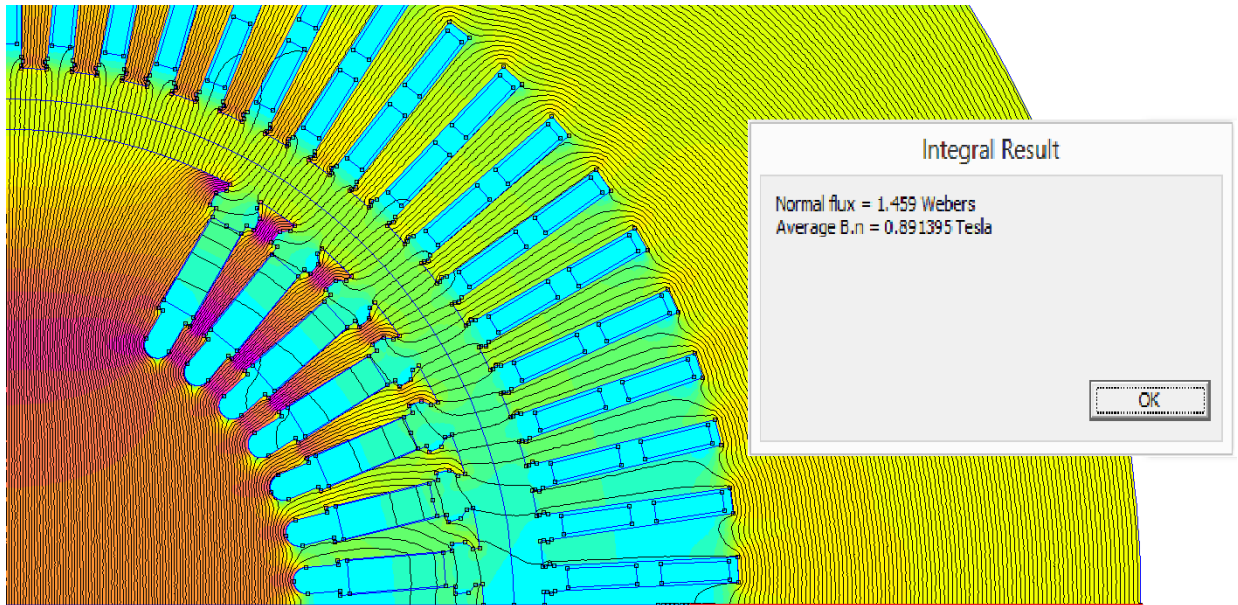
5.3 Vyhodnocení charakteristiky naprázdno

Při výpočtu charakteristiky naprázdno je uvažováno pouze napájení budících cívek. Oblasti statorového vinutí jsou nahrazeny materiálovými vlastnostmi vzduchu, čímž je zajištěno, že se ve statorovém vinutí nebude indukovat žádné napětí.

Budící cívky jsou zatíženy budícím proudem naprázdno, který je získán z magnetizační charakteristiky naprázdno (viz. Obrázek 3.4) dle rovnice (5.2).

$$I_b = \frac{F_m}{N_b} \quad (5.2)$$

Vypočtené hodnoty tohoto proudu jsou uvedeny v Tabulka 5.1. Pro jednotlivé hodnoty budícího proudu naprázdno opakujeme výpočet. Samotný výpočet je složen z odečtení magnetického indukčního toku, který je spřažen se statorovým jhem, jak je zobrazeno na Obrázek 5.2. Obrázek 5.4 znázorňuje rozložení magnetické indukce v příčném řezu stroje při stavu naprázdno.



Obrázek 5.2: Odečtení spřaženého magnetického indukčního toku

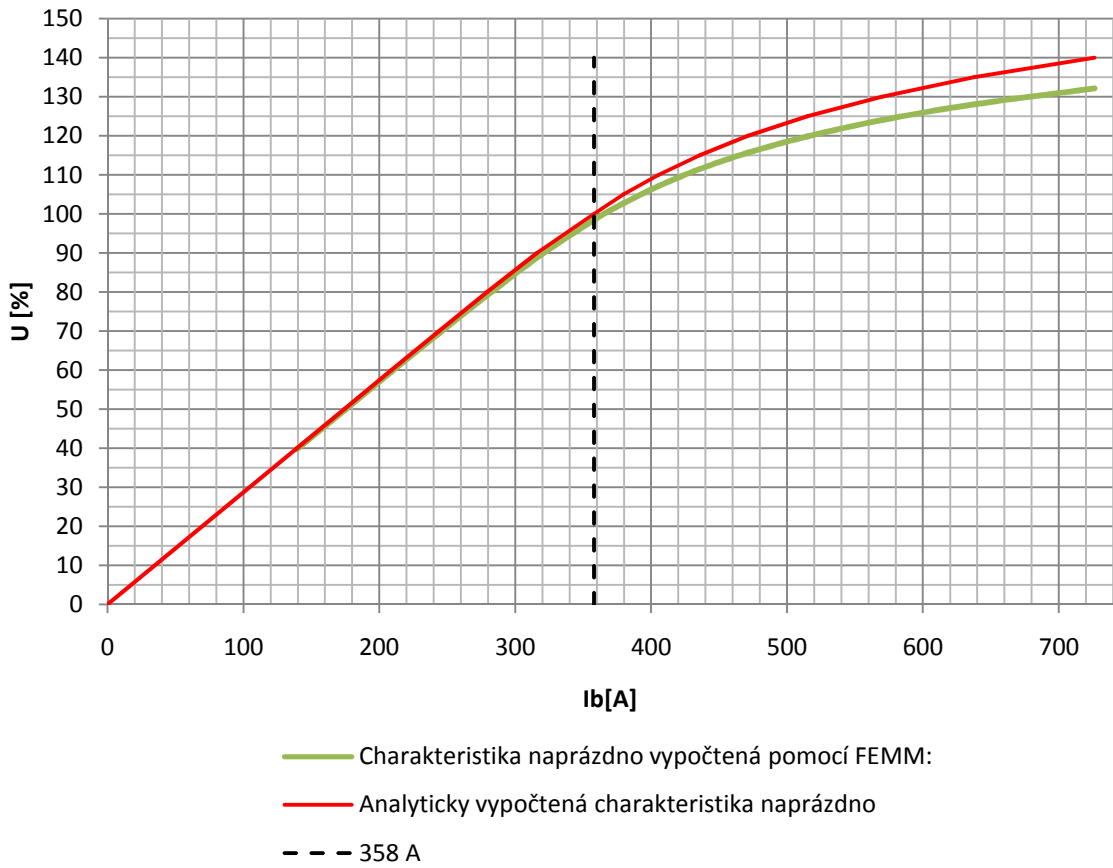
Tento magnetický tok indukuje ve statorovém vinutí sdružené napětí o velikosti dle rovnice (5.3).

$$U_{isFEMM} = \sqrt{3} \cdot \sqrt{2} \cdot 2 \cdot \pi^2 \cdot \Phi_{FEMM} \cdot N_s \cdot f \cdot k_{v_1} \quad (5.3)$$

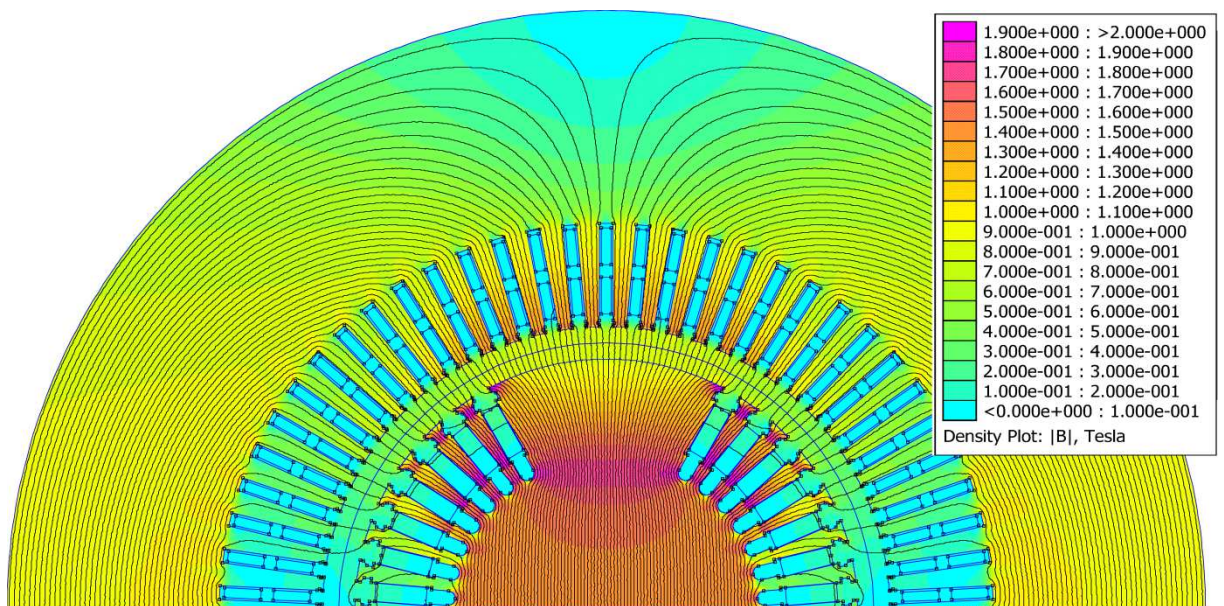
Porovnání hodnot analyticky a numericky vypočtené charakteristiky je znázorněno v Tabulka 5.1, samotné průběhy charakteristik jsou zobrazeny na Obrázek 5.3.

Tabulka 5.1: Vypočtené hodnoty charakteristik naprázdno pomocí programu FEMM

I_{b0} [A]	Φ_{FEMM} [Wb]	U_{isFEMM} [V]	u_{iFEMM} [%]	u_i [%]	Δu_i [%]	ϵ_{ui} [%]
0,000	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
139,407	1,179	4572,77	39,76	40,00	0,24	0,59
174,217	1,473	5716,03	49,70	50,00	0,30	0,59
209,038	1,767	6856,19	59,62	60,00	0,38	0,63
243,956	2,059	7987,07	69,45	70,00	0,55	0,78
279,262	2,346	9102,45	79,15	80,00	0,85	1,06
316,190	2,632	10209,59	88,78	90,00	1,22	1,36
358,006	2,918	11320,12	98,44	100,00	1,56	1,56
379,676	3,045	11811,79	102,71	105,00	2,29	2,18
405,663	3,177	12323,97	107,16	110,00	2,84	2,58
435,654	3,304	12818,21	111,46	115,00	3,54	3,08
471,196	3,428	13298,40	115,64	120,00	4,36	3,63
515,100	3,552	13779,16	119,82	125,00	5,18	4,14
569,987	3,676	14262,28	124,02	130,00	5,98	4,60
637,638	3,795	14722,41	128,02	135,00	6,98	5,17
726,318	3,916	15191,71	132,10	140,00	7,90	5,64



Obrázek 5.3: Porovnání charakteristik naprázdno

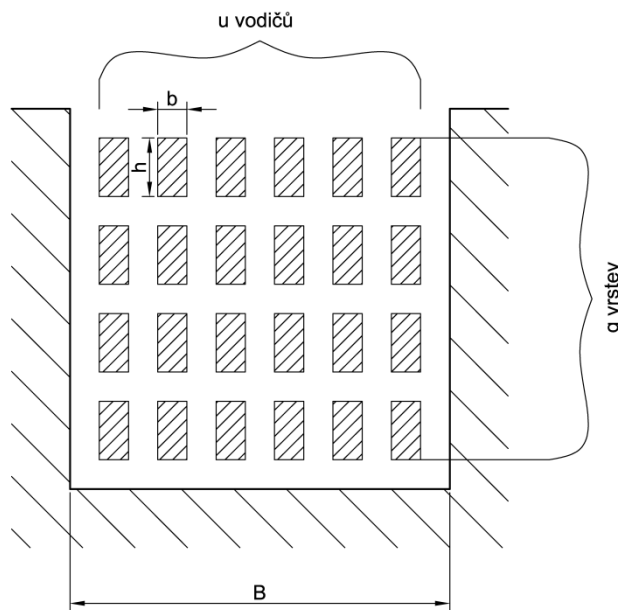


Obrázek 5.4: Rozložení magnetické indukce ve stavu naprázdno

6. Výpočet přídatných ztrát vinutí statoru na modelu MKP

6.1 Činitel zvětšení elektrického odporu

Vlivem nestejného rozdělení proudu po průřezu vodiče vzniká při průchodu střídavého proudu k vytlačování proudových vláken střídavým magnetickým polem od vlastního proudu vodiče i od proudů v sousedních vodičích. Pokud je vodič uložen v homogenním magnetickém prostředí, vlivem vlastního magnetického pole je proud ve vodiči na povrchu hustší a uvnitř řidší. Tento jev se nazývá povrchovým jevem, neboli skin efektem a výrazně se projevuje u vyšších frekvencí. [2]



Obrázek 6.1: Obecné uspořádání vodičů v drážce

Je-li v drážce uloženo dle Obrázek 6.1 u vodičů vedle sebe a g vodičů nad sebou, je střední hodnota zvětšení elektrického odporu pro celé vinutí:

$$k_p = \varphi(\xi) + \frac{0,81 \cdot g^2 - 1}{3} \cdot \psi(\xi) \quad (6.1)$$

kde funkce

$$\varphi(\xi) = \xi \cdot \frac{\sinh 2\xi + \sin 2\xi}{\cosh 2\xi - \cos 2\xi} \quad (6.2)$$

$$\psi(\xi) = 2\xi \cdot \frac{\sinh \xi - \sin \xi}{\cosh \xi + \cos \xi} \quad (6.3)$$

a ξ je náhradní výška vodiče:

$$\xi = h \cdot \sqrt{\frac{b}{B} \cdot \frac{\pi \cdot f \cdot \mu}{\rho}} \quad (6.4)$$

kde ρ je měrný odpor vodiče a μ je permeabilita vodiče, v tomto případě je rovna permeabilitě vzduchu $\mu = \mu_r \cdot \mu_0 = 1,4\pi \cdot 10^{-7} = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m. [2]

Po dosazení hodnot (vypočtených v kapitole 3) do rovnic (6.1), (6.2), (6.3) a (6.4) vychází činitel zvýšení elektrického odporu:

$$k_p = 1,0000354 + \frac{0,81 \cdot 84^2 - 1}{3} \cdot 0,133 \cdot 10^{-3} = 1,253$$

kde

$$\varphi(\xi) = 0,1413 \cdot \frac{\sinh 2 \cdot 0,1413 + \sin 2 \cdot 0,1413}{\cosh 2 \cdot 0,1413 - \cos 2 \cdot 0,1413} = 1,0000354$$

$$\psi(\xi) = 2 \cdot 0,1413 \cdot \frac{\sinh 0,1413 - \sin 0,1413}{\cosh 0,1413 + \cos 0,1413} = 0,133 \cdot 10^{-3}$$

$$\xi = 1,8 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 10,1}{28} \cdot \frac{\pi \cdot 50 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}}{43,273}} = 0,1413 \text{ m}$$

Z čehož vyplývá, že elektrický odpor v drážkové části vinutí vzroste 1,253 krát.

6.2 Činitel zvětšení elektrického odporu výpočtem na modelu MKP

Numerický výpočet činitele zvětšení elektrického odporu je založen na porovnání ztrát způsobených procházejícím stejnosměrným a ztrát způsobených střídavým proudem. Z důvodu zjednodušení výpočtu je porovnáváno vinutí pouze jedné drážkové výseče. Na níže uvedeném Obrázek 6.2 je znázorněno rozložení magnetického pole, případ a) při průchodu stejnosměrného proudu vodiči a případ b) při průchodu střídavého proudu vodiči. Obrázek 6.3 a Obrázek 6.4 zobrazují skutečnost, že proudová vlákna jsou vytlačována ke krajům vodiče při průchodu střídavého proudu.

K vypočtení hodnoty činitele zvýšení elektrického odporu bylo pomocí programu FEMM získány ztráty v horní a dolní tyči.

Při průchodu stejnosměrného proudu:

$$\Delta P_{DC_{dolní}} = 544,096 \text{ W}$$

$$\Delta P_{DC_{horní}} = 544,096 \text{ W}$$

Při průchodu střídavého proudu:

$$\Delta P_{AC_{dolní}} = 571,942 \text{ W}$$

$$\Delta P_{AC_{horní}} = 737,108 \text{ W}$$

Poté činitel zvýšení elektrického odporu dolní tyče je dán vztahem:

$$k_{p_{dolní}} = \frac{\Delta P_{AC_{dolní}}}{\Delta P_{DC_{dolní}}} = \frac{571,942}{544,096} = 1,051 \quad (6.5)$$

a horní tyče:

$$k_{p_{horní}} = \frac{\Delta P_{AC_{horní}}}{\Delta P_{DC_{horní}}} = \frac{737,108}{544,096} = 1,355 \quad (6.6)$$

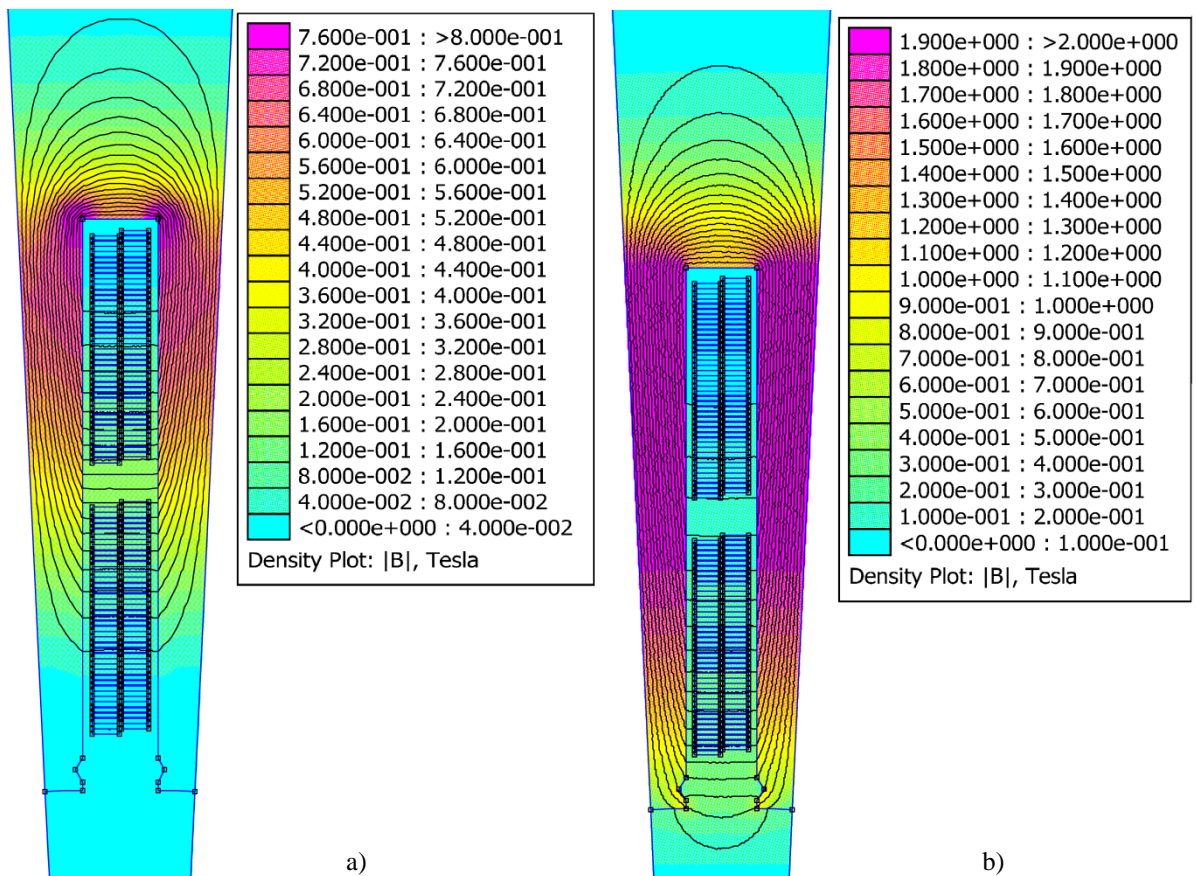
Střední činitel zvýšení elektrického odporu:

Výsledný střední činitel zvýšení elektrického odporu je vyjádřen jako průměrná hodnota výše uvedených činitelů.

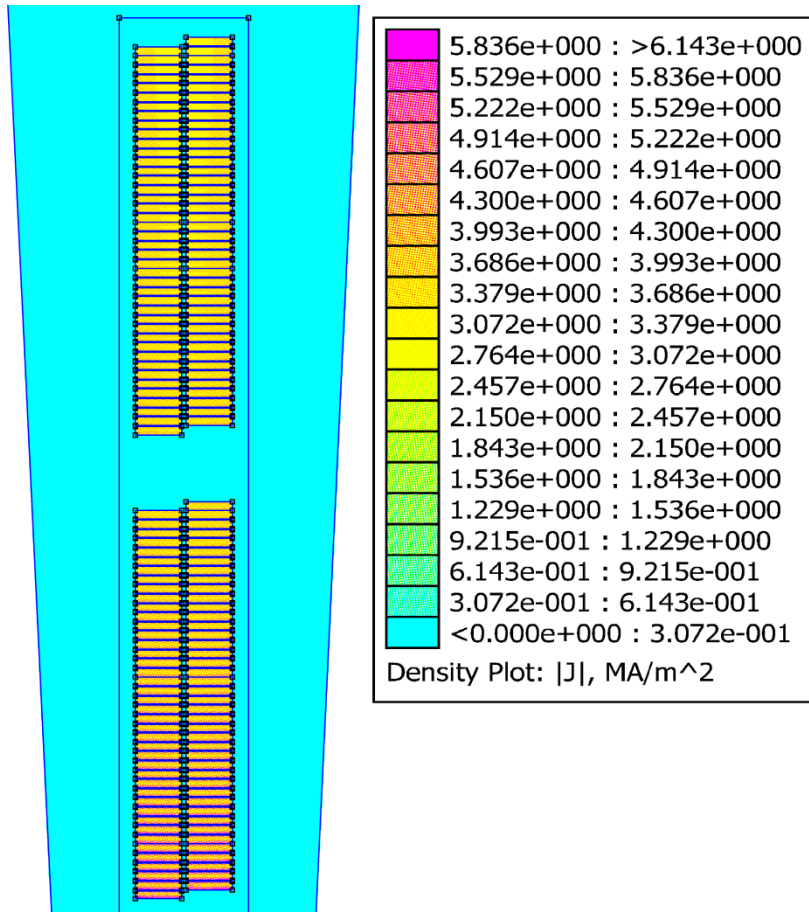
$$k_{p_{FEMM}} = \frac{k_{p_{horní}} + k_{p_{dolní}}}{2} = \frac{1,355 + 1,051}{2} = 1,203 \quad (6.7)$$

Procentuální odchylka analyticky a numericky vypočteného činitele zvýšení elektrického odporu:

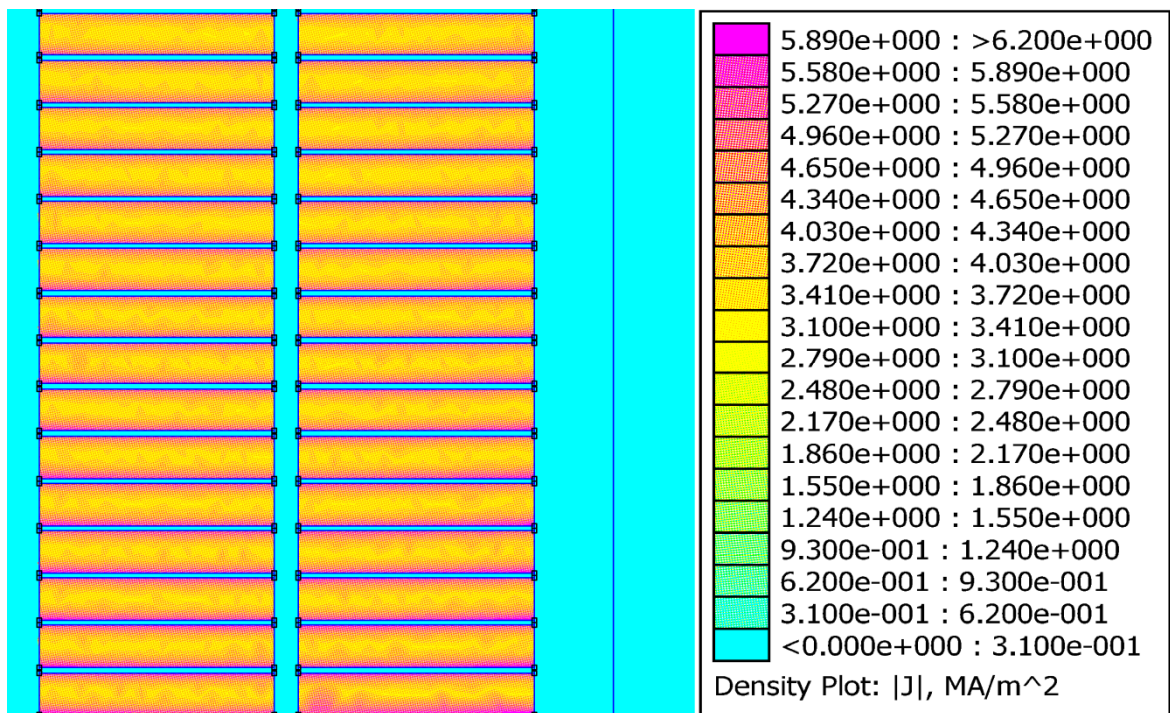
$$\varepsilon_{k_p} = \frac{k_p - k_{p_{FEMM}}}{k_p} \cdot 100 = \frac{1,253 - 1,203}{1,253} \cdot 100 = 4,004 \% \quad (6.8)$$



Obrázek 6.2: Rozložení magnetického pole permutované tyče v drážce - a) stejnosměrný proud, b) střídavý proud



Obrázek 6.3: Rozložení proudové hustoty při procházejícím střídavém proudu



Obrázek 6.4: Rozložení proudové hustoty při procházejícím střídavém proudu - detail

7. Závěr

Cílem této diplomové práce bylo navrhnout vzduchem chlazený turboalternátor dle zadaných parametrů. Úkolem elektromagnetického výpočtu bylo určení hlavních rozměrů stroje, jak je znázorněno v příloze C, výpočet statorového a budícího vinutí, dimenzování magnetického obvodu, výpočet ztrát v jednotlivých částech stroje a celková účinnost při jmenovitém zatížení a účinníku, jejíž hodnota vyšla 98,56 %. Tato hodnota splňuje předpoklad vysoké účinnosti turboalternátoru.

V kapitole 4 byla určena výsledná teplota statorového vinutí, a to 107,07 °C, což splňuje požadavek tepelné třídy 130 (B) s rezervou 17,93 K. Z tohoto faktu můžeme usoudit, že statorové vinutí má určitou rezervu z hlediska oteplení, tedy v případě potřeby by bylo možné stroj více zatížit, je nutno brát ohled také na oteplení budícího vinutí, protože výsledná teplota budícího vinutí 111,77 °C splňuje kritéria tepelné třídy 130 (B) jen s rezervou 8,23 K.

Dalším úkolem bylo porovnání analyticky a numericky vypočtené charakteristiky naprázdno, viz. kapitola 5. Z grafu na obrázku 5.3 je patrné, že hodnoty poměrného indukovaného napětí vypočítané numerickou metodou jsou v oblasti nasycení feromagnetických částí stroje nižší než hodnoty získané analytickým výpočtem. S vyšším sycením odchylka těchto dvou charakteristik roste, jak je znázorněno v tabulce 5.1. Skutečnost, že porovnávané charakteristiky nejsou totožné, je dán zjednodušením analytického výpočtu magnetického obvodu. Odchylka okolo 5 % je považována za dobrou shodu, protože i naměřená charakteristika na vyrobeném stroji oproti výpočtu je obvykle do 5 %.

Dále byl v této práci porovnáván analyticky a numericky vypočítaný střední činitel zvětšení elektrického odporu statorového vinutí. Přičemž hodnota analyticky vypočteného činitele vyšla 1,253 a hodnota činitele získaného pomocí metody konečných prvků vyšla 1,203. Jejich procentuální odchylka je 4,004 %, což lze považovat za velmi dobrý výsledek.

Jako přínos této práce považuji výrazné prohloubení a ucelení znalostí potřebných pro návrh turboalternátoru, které jsem získal od svého konzultanta a vedoucího diplomové práce a při vypracovávání této práce.

Použitá literatura

- [1] CIGÁNEK, Ladislav. *Stavba elektrických strojů*. Praha : SNTL, 1958.
- [2] ČERVENÝ, Josef. *Stavba elektrických strojů I a II. Přednáškové texty pro ZČU v Plzni*. 2011/2012.
- [3] KOPYLOV, Igor Petrovič. *Stavba elektrických strojů*. Praha : SNTL, 1988.
- [4] LIST, Vlastimil, HAK, Josef a kol., a. *Elektrotechnika II - elektrické stroje, část I*. Praha : SNTL, 1969.

Seznam příloh

Příloha A: Magnetizační charakteristika statorového plechu (M250-50-A5)

Příloha B: Magnetizační charakteristika rotorové oceli (CrNiMoV)

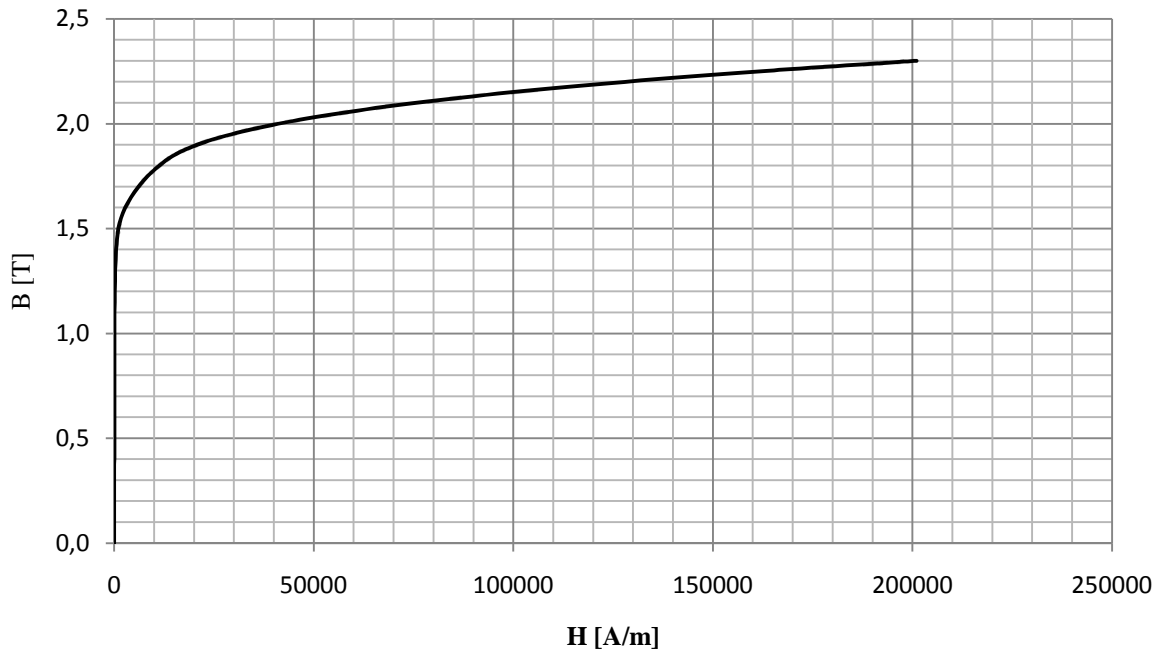
Příloha C: Příčný řez strojem

Přílohy

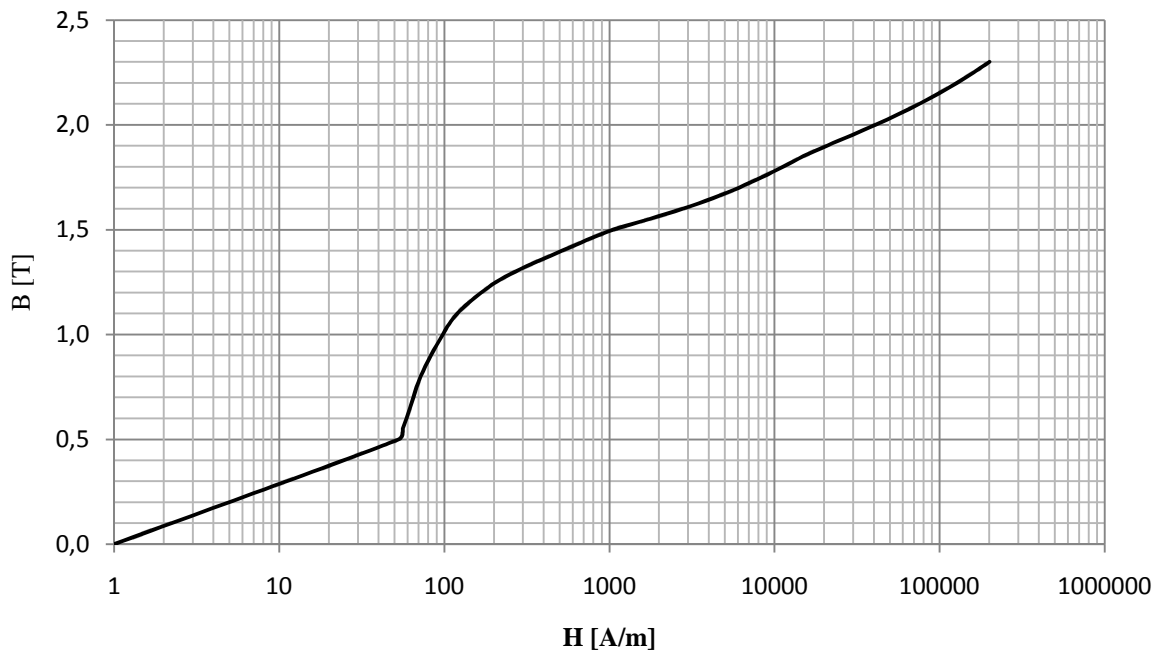
Příloha A

Zdroj: Brush SEM

Magnetizační charakteristika statorového plechu (M250-50-A5):



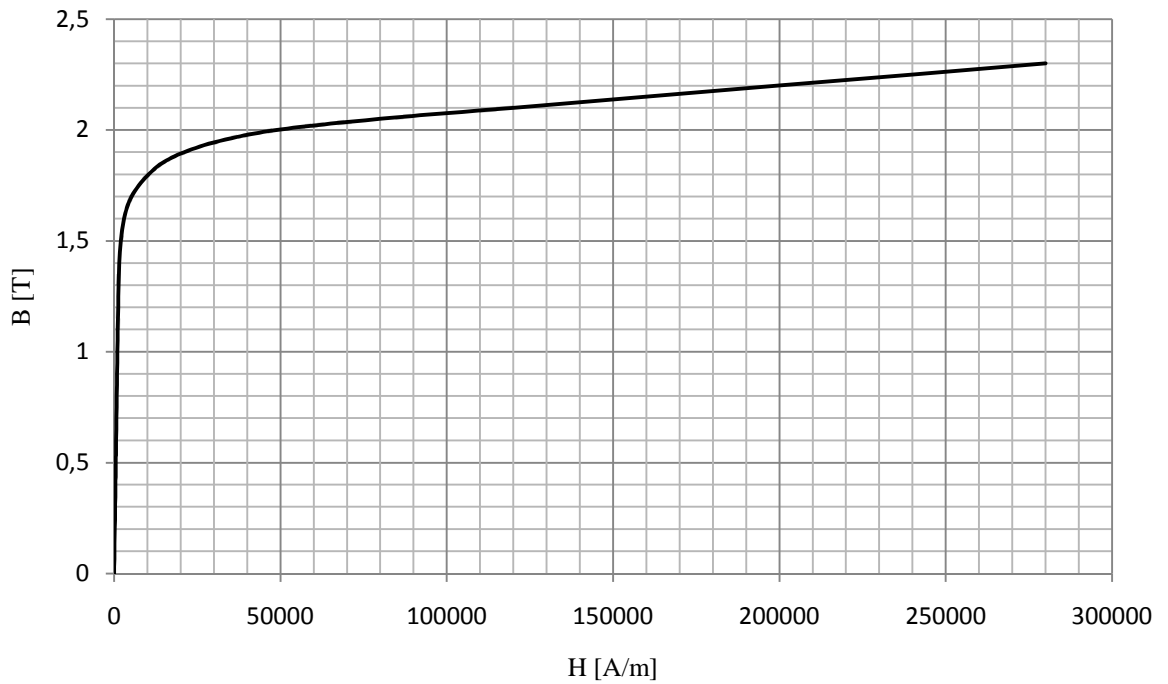
Magnetizační charakteristika statorového plechu (M250-50-A5):



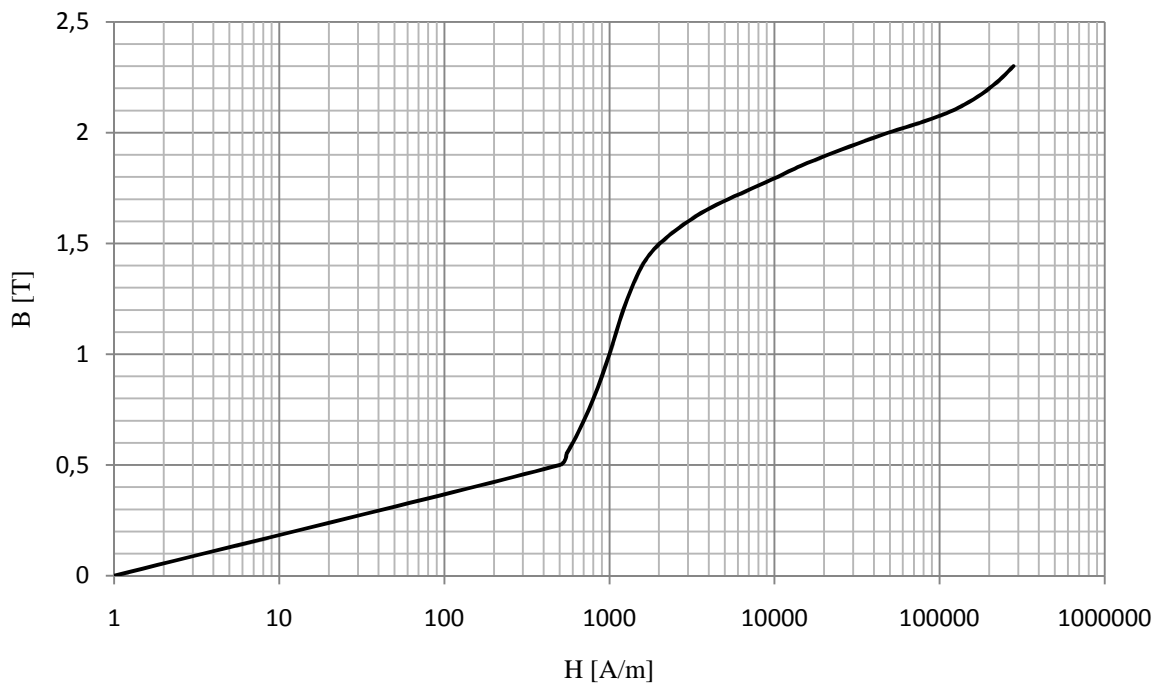
Příloha B

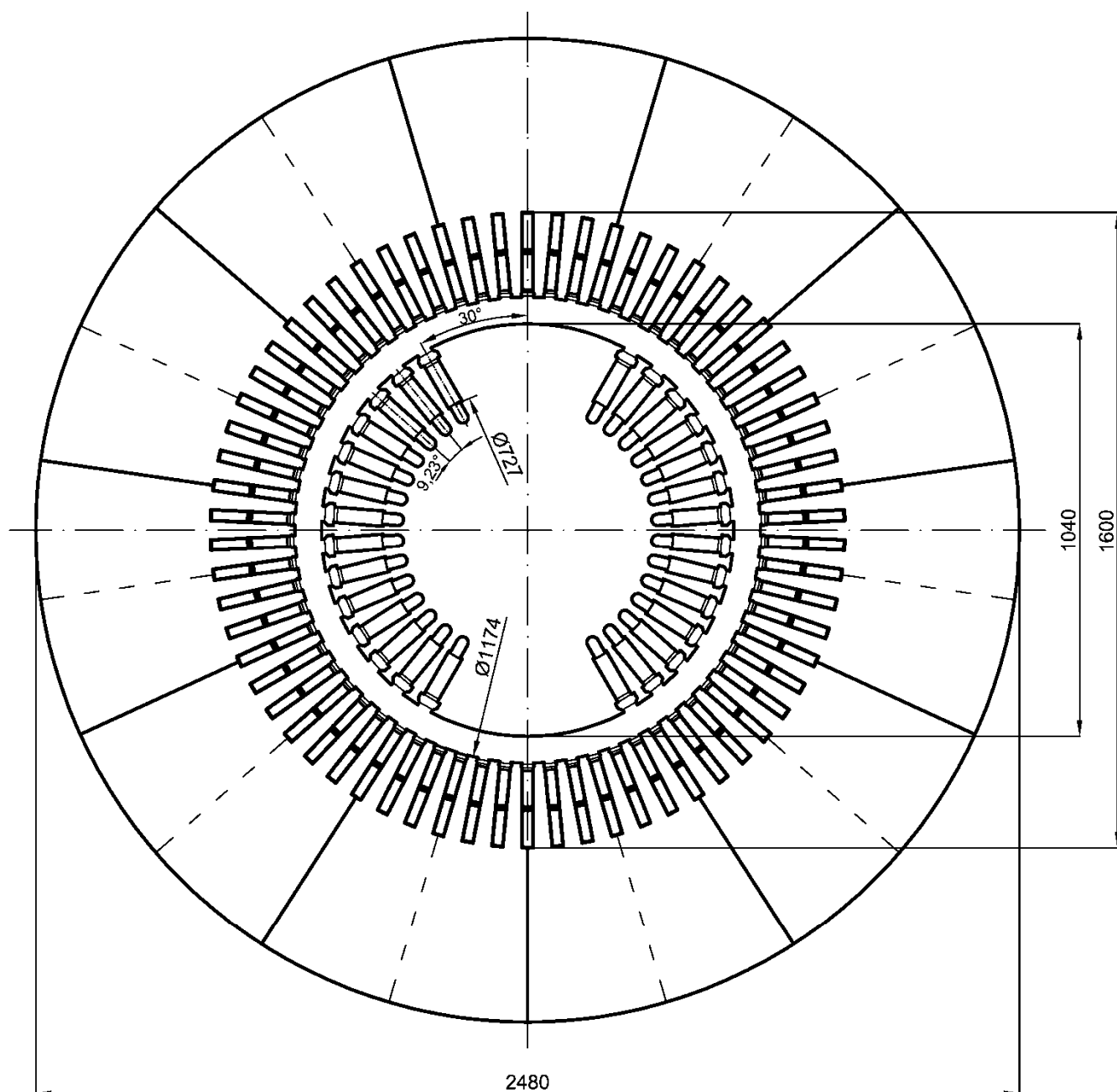
Zdroj: Brush SEM

Magnetizační charakteristika rotorové oceli (CrNiMoV):



Magnetizační charakteristika rotorové oceli (CrNiMoV):





Formát: **A4**

Vypracoval: **Bc. František Brom**

Měřítko: **1:16**

Datum vydání: **30.4. 2013**

Název:

Příčný řez strojem

Číslo přílohy:

Příloha C