

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Výpočet oteplení synchronního motoru

Vedoucí práce: Doc. Ing. Josef Červený Csc.

Autor: Bc. Petr Novák

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Petr NOVÁK**
Osobní číslo: **E14N0139P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Průmyslová elektronika a elektromechanika**
Název tématu: **Výpočet oteplení synchronního stroje**
Zadávající 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 horizontálního synchronního generátoru s parametry: $S = 1200 \text{ kVA}$, $U = 6300 \text{ V}$, $n = 500 \text{ ot/min}$, $m = 3$, $\cos \varphi = 0,8$.
2. Metodou náhradních tepelných obvodů proveďte výpočet oteplení induktu a budícího vinutí v ustáleném a přechodném stavu.
3. Nakreslete schématicky sestavu stroje v příčném a podélném směru.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **40 - 60 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, J. Červený: Postup při návrhu synchronního stroje, Courseware 2012.**
4. **J.Červený: Stavba elektrických strojů, Courseware 2012.**

Vedoucí diplomové práce:

Doc. Ing. Josef Červený, CSc.


Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2015**

Termín odevzdání diplomové práce: **16. května 2016**


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




Prof. Ing. Václav Kús, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

Čestné 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.

Datum: 15. 5. 2016

.....
podpis

Anotace

Diplomová práce se zabývá návrhem synchronního stroje s vyniklými póly. Do několika podkapitol je rozdělen výpočet hlavních rozměrů, vinutí, magnetického obvodu, ztrát a účinnosti. Dále práce obsahuje tepelný výpočet v ustáleném a přechodném stavu na základě náhradního tepelného obvodu. Na závěr jsou porovnány vybrané parametry stroje vypočítané, s parametry zjištěnými simulací v programu FEMM. Součástí této práce je i konstrukční uspořádání navrženého stroje v CAD systému.

Klíčová slova

Synchronní motor, elektromagnetický výpočet, stator, rotor, póly, ztráty, účinnost, náhradní tepelný obvod, konstrukční uspořádání

Abstract

This master thesis is dealing with electromagnetic calculation of salient- pole synchronous motor. Thesis is divided into several subsections including calculation of main dimensions, winding, magnetic circuit, power losses and efficiency. These thesis also deals with thermal calculation in steady state and transient state based on equivalent thermal circuit. At the end of my thesis, there is comparison of chosen quantities of my calculation, with the quantities gained from simulation done by program FEMM. The thesis also contains construction design of the machine done by AutoCAD..

Keywords

Synchronous motor, electromagnetic calculation, stator, rotor, poles, power losses, efficiency, equivalent thermal circuit, engineering design

Obsah

Seznam veličin a zkratk	2
Úvod	9
1 Elektromagnetický výpočet	10
1.1 Základní hodnoty	10
1.2 Vinutí statoru	11
1.3 Výpočet hlavních rozměrů	15
1.4 Návrh drážky	17
1.5 Odpor a rozptylová reaktance statorového vinutí	20
1.6 Návrh magnetického obvodu	24
1.7 Dimenzování magnetického obvodu	27
1.8 Charakteristika naprázdno	29
1.9 Návrh budícího vinutí	30
1.10 Orientační výpočet oteplení budící cívky	32
1.11 Návrh tlumiče	33
1.12 Kroužky a kartáče	34
1.13 Ztráty a účinnost	36
1.13.1 Jouleovy ztráty	36
1.13.2 V železe	36
1.13.3 Povrchové	37
1.13.4 Mechanické	37
1.13.5 Přídavné	37
1.13.6 Celkové	38
1.14 Účinnost	38
2 Mechanické výpočty	39
2.1 Výpočet průměrů hřídele	39
2.2 Výpočet sil působících na pól a druh upevnění	39
2.3 Výpočet upevnění pomocí šroubů	40
3 Výpočet oteplení induktu v ustáleném stavu	41
4 Výpočet oteplení induktu v přechodném stavu	49
5 Ověření vybraných parametrů metodou konečných prvků	53
5.1 Výpočet momentové charakteristiky	53
5.2 Výpočet v programu FEMM	55
5.3 Porovnání výsledků	58
Závěr	61

Literatura	63
Přílohy	64

Seznam veličin a zkratk

Veličina	Rozměr	Název
A	A/m^2	obvodová proudová hustota
A_σ	–	koefficient rozptylové reaktance
a	–	koefficient pro určení činitele první harmonické mag. indukce ve vzduchové mezeře
a_n	m	přesah pólového nástavce
a_{ss}	–	počet paralelních větví stejnosměrného vinutí
a_{st}	–	počet paralelních větví střídavého vinutí
α	–	činitel pólového krytí
α_c	$^\circ$	úhel sklonu čela vinutí
α_p	$\frac{W}{K \cdot m^2}$	součinitel přestupu tepla
B_{jr}	T	magnetická indukce v jádru rotoru
B_{js}	T	magnetická indukce v jádru statoru
B_P	T	magnetická indukce v těle pólu
B_δ	T	magnetická indukce ve vzduchové mezeře
B_σ	–	koefficient rozptylové reaktance
B'_{z1}	T	magnetická indukce v hlavě zubu
B_{z2}	T	magnetická indukce ve středu zubu
b	–	koefficient pro určení činitele první harmonické mag. indukce ve vzduchové mezeře
b_d	m	šířka drážky
b_k	m	šířka kartáče
b_n	m	šířka pólového nástavce
b_p	m	šířka těla pólu
b_{pe}	m	šířka pera
b_v	m	šířka holého vodiče
b_{bc}	m	šířka budící cívky
b_{bv}	m	šířka vodiče budící cívky
b_{bvi}	m	šířka vodiče budící cívky s izolací
β	–	poměrné zkrácení kroku vinutí
β_p	–	činitel povrchových ztrát
c_{vc}	m	vzdálenost mezi čely

Veličina	Rozměr	Název
c	–	koeficient pro určení činitele první harmonické
C	$\frac{kW}{m^3 \frac{ot}{min}}$	Essonův činitel elektromagnetického využití
C_1	–	činitel první harmonické magnetické indukce ve vzduchové mezeře
C_σ	–	koeficient rozptylové reaktance
C_{d1}	–	činitel podélné složky první harmonické mag. indukce
C_{q1}	–	činitel příčné složky první harmonické mag. indukce
D_{js}	m	výška jádra statoru včetně zubové vrstvy
D_K	m	vnější průměr kroužku
D_i	m	vnitřní průměr stroje
D_3	m	průměr statoru u dna drážky
D_{je}	m	vnější průměr statoru
d_h	m	průměr hřídele v místě přívodu mechanické energie
d_{mk}	m	poloměr jha rotoru
d_s	m	malý průměr šroubu
d_T	m	průměr tyče tlumiče
δ	m	velikost vzduchové mezery
E	m	vyložení čel
e	–	koeficient pro určení činitele podélné složky první harmonické mag. indukce
ϵ	–	koeficient pro volbu vlnutí
η	%	účinnost
F'_a	A	amplituda základní harmonické magnetického napětí reakce kotvy
F_b	A	magnetické budící napětí
F_C	N	celková síla působící na pól
F_{d1}	A	podélná složka základní harmonické magnetického napětí reakce kotvy
F_m	N	síla od vlastní hmotnosti pólu
F_P	N	odstředivá síla
F_{q1}	A	příčná složka základní harmonické magnetického napětí reakce kotvy
F_δ	A	magnetické napětí na vzduchové mezeře

Veličina	Rozměr	Název
f	–	koeficient pro určení činitele podélné složky první harmonické mag. indukce
g	–	koeficient pro určení činitele příčné složky první harmonické mag. indukce
h	–	koeficient pro určení činitele příčné složky první harmonické mag. indukce
h_{bc}	m	výška budící cívky
h_{bv}	m	výška vodiče budícího vinutí
h_{bvi}	m	výška vodiče budícího vinutí s izolací
h_c	m	výška cívky
h_d	m	hloubka drážky
h_{jr}	m	výška jádra rotoru
h_{js}	m	výška jádra statoru
h_n	m	výška pólového nástavce
h'_n	m	střední výška pólového nástavce
h_p	m	výška těla pólu
h_{pe}	m	šířka pera
h_v	m	výška holého vodiče
h_0	m	výška krčku drážky
h_1	m	výška drážkového klínu
h'_1	m	vzdálenost krčku drážky od odizolované cívky
h_2	m	hloubka drážky bez klínu
h'_2	m	výška dvou cívek nad sebou po odizolování
I_b	A	budící proud
I_1	A	fázový proud
i	–	počet paketů
i_k	–	počet kartáčů
J_S	MPa	namáhání na stříh
J_{SD}	MPa	maximální dovolené namáhání ve stříhu
K	–	počet lamel komutátoru
k	–	překladové číslo
k_c	–	Carterův činitel
k_{cd}	–	Carterův činitel respektující vliv drážkování
k_{ck}	–	Carterův činitel respektující vliv radiálních vent. kanálů

Veličina	Rozměr	Název
k_{Fe}	–	činitel plnění železa
k_{v1}	–	činitel vinutí první harmonické
k_0	–	činitel povrchových ztrát
L_p	m	délka těla pólu
l_c	m	délka čela
l_{be}	m	vnější obvod budící cívky
l_{bs}	m	střední délka závitů budící cívky
l_e	m	efektivní délka stroje
l_k	m	délka kartáče
l_r	m	délka siločáry procházející rotorem
l_v	m	délka vodiče
l_p	m	délka siločáry procházející pólem
L	m	celková délka induktu
L_p	m	délka pólu
L_{pe}	m	délka pera
L_R	m	délka rotoru
M_k	Nm	točivý moment stroje
m	–	počet fází
m'	–	matematický počet fází
m_{FeS}	kg	hmotnost statorového svazku plechů
m_{Fez}	kg	hmotnost zubové vrstvy
m_{Cu}	kg	hmotnost budící cívky
m_n	kg	hmotnost pólového nástavce
m_p	kg	hmotnost těla pólu
m_s	–	počet šroubů
n_d	–	počet vodičů v drážce
n'_d	–	předběžný počet vodičů v drážce
ν	–	koeficient pro výpočet šířky pólu
N_b	–	počet závitů budícího vinutí
N_p	–	počet závitů nad sebou
N_s	–	počet závitů v sérii
N'_s	–	předběžný počet závitů v sérii
n_{max}	$\frac{ot}{min}$	maximální otáčky
n_p	–	počet závitů bud. vinutí vedle sebe

Veličina	Rozměr	Název
n_{sg}	—	počet segmentů
n_s	$\frac{ot}{min}$	synchronní otáčky
O_{2pc}	m^2	ochlazovací povrch všech cívek
ω_{max}	$\frac{rad}{s}$	maximální obvodová rychlost
P	W	činný výkon
p	—	počet pólpárů
p_p	MPa	tlak působící na pero
p_{pd}	MPa	maximální dovolené namáhání na tlak
ΔP_c	W	celkové ztráty
ΔP_{Cub}	W	Ztráty v budícím vinutí
ΔP_{Cu}	W	Jouleovy ztráty statorového vinutí
ΔP_{Fej}	W	ztráty v jádru statoru
Δp_{Fe}	$\frac{W}{kg}$	ztrátové číslo
ΔP_{Fesz}	W	ztráty v zubové vrstvě
ΔP_p	W	povrchové ztráty
ΔP_{Pr}	W	přídavné ztráty
ΔP_{Mech}	W	mechanické ztráty
Φ	Wb	magnetický tok
Q	—	počet drážek na statoru
Q_p	—	počet drážek na pól
Q_{pr}	—	počet drážek na překlád
q	—	počet drážek na pól a fázi
R	m	střední poloměr oka
$R'_{1/20}$	Ω	odpor jedné fáze při průchodu střídavým proudem při 20 °
$R_{b/75}$	Ω	odpor budícího vinutí při 75 °
$R_{1/75}$	Ω	odpor vinutí při 75 °
r	m	vnitřní poloměr oka
r_p	m	střední poloměr pólu
r_n	m	střední poloměr pólového nástavce
r_{Cu}	m	střední poloměr cívky
ρ_{Cu}	$\frac{\omega \cdot mm^2}{m}$	měrný odpor mědi
ρ_C	$\frac{kg}{m^3}$	hustota mědi
ρ_{Fe}	$\frac{kg}{m^3}$	hustota železa
S_{Cub}	m^2	průřez vodiče budící cívky

Veličina	Rozměr	Název
S_{Cubv}	m^2	průřez statorového vinutí na jeden pól
S'_{Cu1}	m^2	průřez vodiče statorového vinutí
S_k	m^2	celková plocha kartáčů
S_{K1}	m^2	plocha jednoho kartáče
S_T	m^2	průřez tyče tlumiče
S_{TL}	m^2	průřez tyčí tlumiče na jeden pól
s_k	m	šířka radiálního kanálu
s_p	m	šířka paketu
σ_{Cub}	A/m^2	proudová hustota ve vodiči budicího vinutí
σ_{Cu1}	A/m^2	proudová hustota vodiče statorového vinutí
σ_D	MPa	maximální dovolené namáhání v tahu
T_t	N	tečná síla
t_{d1}	m	drážková rozteč
t_k	m	kostřička
t_{kr}	m	rozteč kartáčů
t_p	m	pólová rozteč
t_1	m	výška pera namáhaná na otláčení
$\delta\vartheta_{Cub}$	$^{\circ}C$	oteplení budicí cívky
U_b	V	budicí napětí
U_f	V	fázové napětí
U_s	V	sdužené napětí
u_r	%	procentní hodnota úbytku napětí na činném odporu
u_{σ}	%	procentní úbytek napětí na rozptylové reaktanci
u	–	počet párů paralelních větví
v	m	výběh cívky drážky
v_k	$\frac{m}{s}$	obvodová rychlost kroužků
v_o	$\frac{m}{s}$	obvodová rychlost
V_{vz}	l	množství vzduchu
X_{σ}	Ω	rozptylová reaktance statorového vinutí
x	m	délka výběhu čela
x_1	m	velikost úkosu drážkového klínu
y	m	průmět délky výběhu čela
y_k	–	krok na komutátoru

Veličina	Rozměr	Název
y_{1d}	–	cívkový krok v počtu drážek
y_1	–	přední cívkový krok
y_2	–	zadní cívkový krok
z_1	m	šířka zubu
z_2	m	šířka zubu v polovině jeho délky

Úvod

Moje diplomová práce se z podstatné části zabývá elektromagnetickým návrhem synchronního generátoru s vyniklými póly, okrajově mechanickým návrhem, a navíc také tepelným výpočtem v ustáleném a přechodném stavu. Na závěr jsou ověřeny vybrané parametry metodou konečných prvků. Celá práce je rozdělena na 5 hlavních kapitol.

První, nejrozsáhlejší kapitola, se zabývá elektromagnetickým výpočtem, který zahrnuje určení hlavních rozměrů stroje, výpočet statorového vinutí, dimenzování magnetického obvodu, výpočet budícího vinutí, kontrolní výpočet oteplení budícího vinutí a výpočet ztrát a účinnosti.

Ve druhé kapitole jsou řešeny zjednodušené mechanické výpočty, týkající se zajištění a upevnění pólů. Tím se rozumí určení druhu upevnění (šroub, kladiva) a následné dimenzování.

Třetí kapitola je věnována výpočtu oteplení v ustáleném stavu. Výpočet je určen ke kontrole oteplení jednotlivých částí stroje a ověření, zda teploty nepřesahují odolnost dané třídy izolace.

Ve čtvrté kapitole je proveden kontrolní výpočet oteplení v přechodném stavu. Vhodnou úpravou schématu pro výpočet šíření tepla v ustáleném stavu, byl proveden výpočet oteplení v přechodném stavu, a byl zjištěn průběh oteplení jednotlivých částí stroje.

Poslední, tedy pátá kapitola, je věnována porovnání vybraných hodnot mého výpočtu s výstupními hodnotami výpočetního programu FEMM. Tyto výsledky jsou dále vyhodnoceny a shrnuty v závěru této práce.

Nedílnou součástí práce je také výkresová dokumentace stroje v podélném a příčném řezu. Výkresová dokumentace byla vytvořena pomocí studentské verze programu AutoCAD 2010.

1 Elektromagnetický výpočet

V následující kapitole bude proveden elektromagnetický výpočet synchronního stroje. Postup výpočtu je inspirován výukovými materiály předmětu KEV/SES1, 2- Stavba elektrických strojů 1 a 2. [3]

1.1 Základní hodnoty

Činný výkon:

$$P = S \cdot \cos(\varphi) = 1200 \cdot 0,8 = 960 \text{ kW} \quad (1.1)$$

Fázové napětí:

$$U_f = \frac{U}{\sqrt{3}} = \frac{6300}{\sqrt{3}} = 3637 \text{ V} \quad (1.2)$$

Počet pólpárů:

$$p = \frac{60 \cdot f}{n} = \frac{60 \cdot 50}{500} = 6 \quad (1.3)$$

Počet pólů:

$$2p = 12 \quad (1.4)$$

Fázový proud:

$$I_1 = \frac{S}{U_s \cdot \sqrt{3}} = \frac{1200 \cdot 10^3}{6300 \cdot \sqrt{3}} = 110 \text{ A} \quad (1.5)$$

Průměr induktu:

Dle empirického vztahu:

$$D_1 = 0,08 \cdot (2p)^{0,625} \cdot S^{0,185} = 0,08 \cdot (12)^{0,625} \cdot 1200^{0,185} = 1,4 \text{ m} \quad (1.6)$$

Z grafu:

$$D_1 = 1,4 \text{ m}$$

Volíme:

$$D_1 = 1,4 \text{ m}$$

Z grafu v příloze č.1 odečteme předběžnou hodnotu proudové hustoty a magnetické indukce ve vzduchové mezeře.

$$A = 52000 \text{ A/m}, B_\delta = 0,8 \text{ T}$$

Volíme činitel pólového krytí:

$$\alpha = 0,65$$

Mezipólová rozteč:

$$t_p = \frac{\pi \cdot D_1}{2p} = \frac{\pi \cdot 1,4}{12} = 0,367 \text{ m} \quad (1.7)$$

1.2 Vinutí statoru

S ohledem na průměr a napětí volíme mezidrážkovou rozteč:

$$t_{d1} = 40 \text{ mm}$$

Tomu odpovídá:

Počet drážek:

$$Q = \frac{\pi \cdot D_1}{t_{d1}} = \frac{\pi \cdot 1400}{40} = 110 \quad (1.8)$$

Poté počet drážek na pól a fázi:

$$q = \frac{Q}{2p \cdot m} = \frac{110}{12 \cdot 3} = 3,06 \quad (1.9)$$

Pro velikost počtu drážek na pól a fázi je vhodné použít následující hodnotu:

$$q = 3 + \frac{1}{2} = \frac{7}{2} \quad (1.10)$$

Poté:

$$Q = 2p \cdot m \cdot q = 12 \cdot 3 \cdot \left(3 + \frac{1}{2}\right) = 126 \quad (1.11)$$

Vzhledem k velikosti vnitřního průměru, bude stator dělen na segmenty. Je tedy nutné, určit počet segmentů, překladové číslo a počet drážek na segment. Vyjdeme z počtu drážek Q a provedeme rozklad na prvočinitele:

$$Q = 126 = 2 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 7 \quad (1.12)$$

Jestliže je při skládání plechů možný poloviční, nebo třetinový překlad ($k=2$, nebo $k=3$) a musí platit:

$$Q = k \cdot n_s \cdot Q_p = 2 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 7 \quad (1.13)$$

Při volbě překladového čísla:

$$k=2$$

Počet segmentů:

$$n_s = 9$$

Počet drážek na překlad:

$$Q_p = 7$$

Počet závitů jedné fáze v sérii:

$$N_s = \frac{\pi \cdot D_1 \cdot A}{2 \cdot m \cdot I_1} = \frac{\pi \cdot 1,4 \cdot 52000}{2 \cdot 3 \cdot 110} = 346,53 \quad (1.14)$$

Počet vodičů v drážce:

$$n_d = \frac{a_{\approx} \cdot N_s}{p \cdot q} = \frac{1 \cdot 346,53}{6 \cdot \frac{7}{2}} = 16 \quad (1.15)$$

, kde a_{\approx} (volíme $a_{\approx}=1$) je počet paralelních větví každé fáze střídavého vinutí. Pro dvouvrstvé vinutí musí být číslo sudé.

Skutečný počet závitů v sérii jedné fáze:

$$N_s = \frac{n_d \cdot p \cdot q}{a_{\approx}} = \frac{16 \cdot 6 \cdot \frac{7}{2}}{1} = 336 \quad (1.16)$$

A skutečná proudová hustota:

$$A = \frac{2 \cdot m \cdot I_1}{\pi \cdot D_1} \cdot N_s = \frac{2 \cdot 3 \cdot 110}{\pi \cdot 1,4} \cdot 336 = 50420 \text{ A/m} \quad (1.17)$$

Parametry vinutí:

Počet drážek	Q=126
Počet pólů	2p=12
Počet fází	m=3
Matematický počet fází	m'=6
Počet drážek na pól a fázi	q=3,5
Typ vinutí	smyčkové

Počet drážek na pól:

$$Q_p = \frac{Q}{2p} = \frac{126}{12} = 10,5 \quad (1.18)$$

Cívkový krok v počtu drážek:

Volím cívkový krok s ohledem na zkrácení kroku.

$$y_{1d} = 9 \quad (1.19)$$

Poměrné zkrácení kroku:

$$\beta = \frac{y_{1d}}{Q_p} = \frac{9}{10,5} = 0,86 \quad (1.20)$$

Krok na komutátoru:

$$y_k = \frac{\varepsilon \cdot K \pm a_{ss}}{p} = \frac{0 \cdot 126 + 6}{6} = 1 \quad (1.21)$$

Kde K odpovídá počtu drážek, ε a znaménko $+$ zohledňuje volbu smyčkového nekříženého vinutí, a_{ss} bylo taktéž zvoleno s ohledem na smyčkové vinutí.

Přední cívkový krok:

$$y_1 = 2 \cdot u \cdot y_{1d} + 1 = 2 \cdot 1 \cdot 9 + 1 = 19 \quad (1.22)$$

Zadní cívkový krok:

$$y_2 = 2 \cdot y_k - y_1 = 2 \cdot 1 - 19 = -17 \quad (1.23)$$

Střídavé vinutí:

Počet skupin vinutí:

$$a_{ss} \cdot m' = 6 \cdot 6 = 36 \quad (1.24)$$

Počet skupin v jedné fázi:

$$\frac{a_{ss} \cdot m'}{m} = \frac{6 \cdot 6}{3} = 12 \quad (1.25)$$

Počet cívek ve skupině:

$$\frac{Q}{a_{ss} \cdot m'} = \frac{126}{6 \cdot 6} = 3,5 \quad (1.26)$$

Činitel vinutí ν . harmonické:

$$k_{v\nu} = \sin(\nu\beta \cdot \frac{\pi}{2}) \frac{\sin(\nu \frac{\pi}{m'})}{n \cdot \sin(\nu \frac{\pi}{m' \cdot n})} \quad (1.27)$$

Činitel vinutí 1. harmonické ($\nu = 1$):

$$k_{v1} = \sin(1 \cdot \beta \cdot \frac{\pi}{2}) \frac{\sin(1 \cdot \frac{\pi}{m'})}{n \cdot \sin(1 \cdot \frac{\pi}{m' \cdot n})} = \sin(1 \cdot 0,86 \cdot \frac{\pi}{2}) \frac{\sin(1 \cdot \frac{\pi}{6})}{7 \cdot \sin(1 \cdot \frac{\pi}{6 \cdot 7})} = 0,9328 \quad (1.28)$$

Postupným dosazením za $\nu = 5, 7, 11, 13$ určím činitele vinutí příslušných harmonických.

$$k_{v5} = 0,0888 \quad (1.29)$$

$$k_{v7} = 0,0049 \quad (1.30)$$

$$k_{v11} = -0,0731 \quad (1.31)$$

$$k_{v13} = -0,0830 \quad (1.32)$$

1.3 Výpočet hlavních rozměrů

Výpočtem hlavních rozměrů se rozumí určit vnitřní průměr statorového svazku a jeho efektivní délku. Vycházíme z výkonové rovnice:

$$S = C \cdot D_1^2 \cdot l_e \cdot n_s \quad (1.33)$$

kde C je Essonův činitel, n_s jsou synchronní otáčky a l_e je efektivní délka stroje.

$$C = \frac{\pi^2}{60 \cdot \sqrt{2}} \cdot A \cdot B_\delta \cdot k_{v1} = \frac{\pi^2}{60 \cdot \sqrt{2}} \cdot 50420 \cdot 0,8 \cdot 0,9328 = 4,38 \text{ kVA/m}^3 \text{ot/min} \quad (1.34)$$

Z výkonové rovnice (1.33) vyjádřím l_e :

$$l_e = \frac{S}{C \cdot D_1^2 \cdot n_s} = \frac{1200}{4,38 \cdot 1,4^2 \cdot 500} = 0,279 \text{ m} \quad (1.35)$$

Stator bude rozdělen na několik menších paketů o zvolené šířce $s_p = 0,045$ m, které budou odděleny od sebe radiálními ventilačními kanály o předepsané šířce $s_k = 0,010$ m.

Počet paketů:

$$i = \frac{l_e}{s_p} = \frac{0,279}{0,045} = 6,2 \approx 6 \quad (1.36)$$

A poté šířka paketu:

$$s_p = \frac{l_e}{i} = \frac{0,279}{6} = 0,0465 \text{ m} \quad (1.37)$$

Počet kanálů:

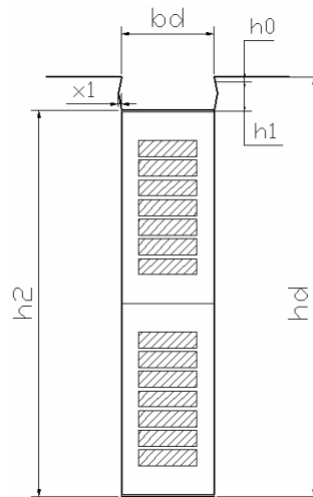
$$i_k = i - 1 = 6 - 1 = 5 \quad (1.38)$$

Celková délka

$$L = l_e + s_k \cdot i_k = 0,279 + 0,010 \cdot 5 = 0,329 \text{ m} \quad (1.39)$$

1.4 Návrh drážky

Na statoru bude použita drážka typu M. Z toho vyplývá, že zuby budou lichoběžníkového tvaru. Ostatní druhy drážek, včetně typu M, jsou zobrazeny v příloze č. 2.



Obrázek 1.1: Statorová drážka [5]

Velikost drážkové rozteče na průměru D_1 :

$$t_{d1} = \frac{\pi \cdot D_1}{Q} = \frac{\pi \cdot 1400}{126} = 34,91 \text{ mm} \quad (1.40)$$

Šířka zubu:

$$z_1 = \frac{B_\delta \cdot t_{d1}}{B'_{z1} \cdot k_{Fe}} = \frac{0,8 \cdot 34,91}{1,7 \cdot 0,92} = 17,9 \text{ mm} \quad (1.41)$$

, kde B'_{z1} je zvolená hodnota magnetické indukce v hlavě zubu (na průměru D_1) a k_{Fe} je činitel plnění železa.

Tomu odpovídá šířka drážky:

$$b_d = t_{d1} - z_1 = 34,91 - 17,9 = 17,01 \text{ mm} \quad (1.42)$$

Nejbližší normalizovaná šířka drážky je $b_d = 16,5$ mm.

A poté skutečná šířka zubu na průměru D_1 :

$$z_1 = t_{d1} - b_d = 34,91 - 16,5 = 18,4 \text{ mm} \quad (1.43)$$

Poz.	Položka	Šířka		Hloubka	
1	Vyložení drážky	2 · 0,15	0,3	3 · 0,15	0,45
2	Izolace proti železu	2 · 2,4	4,8	4 · 2,4	9,6
3	Tmelení	2 · 0,1	0,2	4 · 0,1	0,4
4	Stažení vodičů	2 · 0,15	0,3	4 · 0,15	0,6
5	Izolace závitů	2 · 0,48	0,96	2 · 16 · 0,48	15,36
6	Izolace vodičů	1 · 0,37	0,37	16 · 1 · 0,37	5,92
7	Mezivrstva	-	-	1 · 4	4
8	\sum izolace	-	6,93		36,33
9	Vůle na šířku	0,2 až 0,6	0,57	-	-
10	Holý vodič	1 · 9	9	1 · 16 · 2,8	44,8
11	Vložka na dno	-	-	1 · 1,00	1
12	Vložka pod klín	-	-	1 · 0,5	0,5
13	Vůle na hloubku	-	-	0,4 až 2,0	1,37
14	Rozměr bez klínu	b_d	16,5	h_2	84
15	Klín + můstek	-	-	6 + 1	7
16	Konečný rozměr	b_d	16,5	h_d	91

Tabulka 1.1: Návrh izolace a drážky

Proudovou hustotu ve vodiči určíme ze vztahu:

$$\sigma_{Cu1} = \sqrt{\frac{K}{b_d}} = \sqrt{\frac{190}{16,5}} = 4,59 \text{ A/mm}^2 \quad (1.44)$$

Kde K je konstanta závislá na napětí a pro $U=6,3$ kV je $K=190$ a b_d je šířka holého vodiče.

Průřez vodiče:

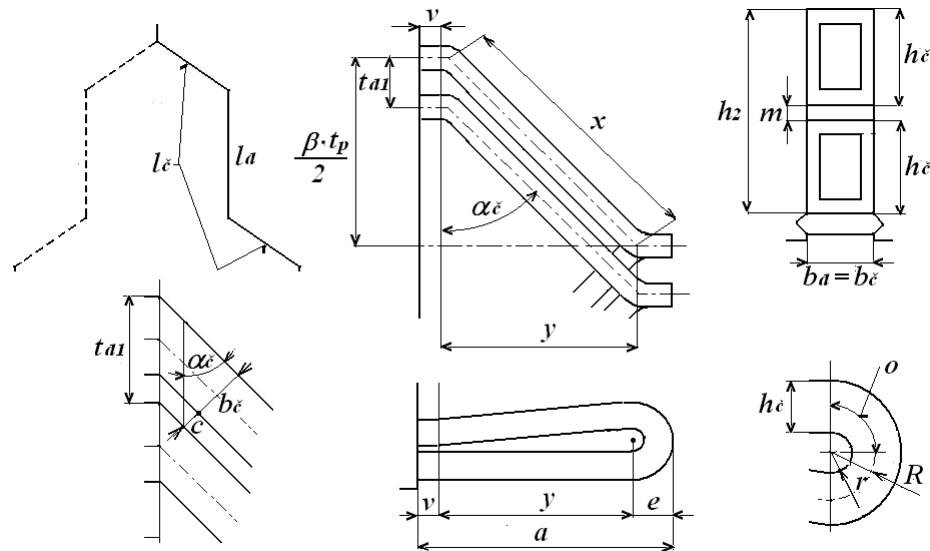
$$S'_{Cu1} = \frac{I_1}{a_{\approx} \cdot \sigma_{Cu1}} = \frac{110}{1 \cdot 4,59} = 23,97 \text{ mm}^2 \quad (1.45)$$

Z tabulky v příloze č.4 vychází skutečný průřez jednoho vodiče:

$$S_1 = 24,6 \text{ mm}^2 \quad (1.46)$$

1.5 Odpor a rozptylová reaktance statorového vinutí

Délka čela:



Obrázek 1.2: Nákres čela vinutí [3]

Výběh cívky z drážky v je závislý na napětí stroje. Pro napětí $U = 6,3$ kV volíme $v = 0,05$ m.

U [kV]	méně než 0,6	3	6	10 ÷ 15
ν [mm]	10 ÷ 25	35 ÷ 45	50 ÷ 65	80 ÷ 130

Tabulka 1.2: Výběh cívky z drážky v závislosti na napětí [3]

Výška čela:

$$h_c = \frac{1}{2}(h_2 - m) = \frac{1}{2}(84 - 6) = 39 \text{ mm} \quad (1.47)$$

Kde h_2 je hloubka drážky bez klínu a m je výška klínu. Vnitřní poloměr oka r je závislý na rozměrech vodiče, dále na velikosti cívek, napětí a požadavku na chlazení čel a pohybuje se v rozmezí $r = (5 \div 20)$.

Střední poloměr oka:

$$R = r + \frac{h_c}{2} = 10 + \frac{39}{2} = 29,5 \text{ mm} \quad (1.48)$$

Vzdálenost mezi čely c se volí např. v závislosti na velikost napětí dle vztahu:

$$c = 4 + \frac{U[kV]}{2} = 4 + \frac{6,3}{2} \approx 7 \text{ mm} \quad (1.49)$$

Úhel sklonu čel válcového vnutí:

$$\sin(\alpha_c) = \frac{b_c + c}{t_{d1}} = \frac{16,5 + 7}{34,91} = 0,673 \quad (1.50)$$

$$\alpha_c = \arcsin(0,673) = 42^\circ \quad (1.51)$$

Kde šířku čela b_c volíme stejnou, jako šířku drážky b_d .

Délka šroubovice tvořící část čela:

$$x = \frac{\beta \cdot t_p}{2\cos(\alpha_c)} = \frac{0,86 \cdot 367}{2\cos(42)} = 212 \text{ mm} \quad (1.52)$$

Délka oka:

$$o = \frac{\pi \cdot R}{2} = \frac{\pi \cdot 29,5}{2} = 46 \text{ mm} \quad (1.53)$$

Délka čela:

$$l_c = 2(v + x + o) = 2(0,05 + 0,212 + 0,046) = 0,616 \text{ m} \quad (1.54)$$

Délka vodiče:

$$l_v = L + l_c = 0,329 + 0,616 = 0,945 \text{ m} \quad (1.55)$$

Vyložení čel v podélném směru:

Délka oka:

$$e = h_c + r = 39 + 10 = 49 \text{ mm} \quad (1.56)$$

Průmět x do osového směru:

$$y = \frac{\beta \cdot t_p}{2} \cdot \tan(\alpha_c) = \frac{0,86 \cdot 0,367}{2} \cdot \tan(42^\circ) = 0,142 \text{ m} \quad (1.57)$$

Celkové vyložení:

$$a = v + y + e = 0,05 + 0,142 + 0,049 = 0,241 \text{ m} \quad (1.58)$$

Odpor jedné fáze:

Elektrický odpor pro stejnosměrný proud (bez uvažování skinefektu):

$$R'_{1/20} = \rho_{Cu} \cdot \frac{2 \cdot l_v \cdot N_s}{a_{\approx} \cdot S_{Cu1}} = \frac{1}{56} \cdot \frac{2 \cdot 0,945 \cdot 336}{1 \cdot 24,6} = 0,461 \ \Omega \quad (1.59)$$

Vliv skinefektu:

Náhradní výška vodiče:

$$\xi = 2\pi \cdot h_v \cdot \sqrt{\frac{j \cdot b_v \cdot f}{b_d \cdot \rho}} \cdot 10^{-7} = 2\pi \cdot 2,8 \cdot \sqrt{\frac{1 \cdot 9 \cdot 50}{16,5 \cdot \frac{1}{56}}} \cdot 10^{-7} = 0,217 \quad (1.60)$$

Činitel zvýšení elektrického odporu:

$$k_{Cu} = \frac{g^2 - 0,2}{9} \cdot \xi^4 = \frac{16^2 - 0,2}{9} \cdot 0,217^4 = 0,063 \quad (1.61)$$

Kde g je celkový počet vodičů v drážce nad sebou:

$$g = i \cdot n_d = 1 \cdot 16 = 16 \quad (1.62)$$

Odpor při střídavém proudu při 20°C:

$$R_{1/20} = (1 + k_{Cu}) \cdot R'_{1/20} = (1 + 0,063) \cdot 0,461 = 0,49 \, \Omega \quad (1.63)$$

Odpor při střídavém proudu při 75°C:

$$R_{1/75} = 1,22 \cdot R_{1/20} = 1,22 \cdot 0,49 = 0,598 \, \Omega \quad (1.64)$$

Procentní hodnota úbytku napětí na ohmickém odporu:

$$u_R = \frac{R_{1/75} \cdot I_1}{U_f} \cdot 100 = \frac{0,598 \cdot 110}{3637} \cdot 100 = 1,81 \, \% \quad (1.65)$$

Rozptylová reaktance statorového vinutí:

$$A_\sigma = \frac{h'_2}{3 \cdot b_d} + \frac{h'_1}{b_d} = \frac{78,4}{3 \cdot 16,5} + \frac{12,67}{16,5} = 2,352 \quad (1.66)$$

$$B_\sigma = \frac{l_c}{l_e} \cdot q \cdot (0,187 + 0,166 \cdot \frac{t_p}{l_c} \cdot \beta) = \frac{0,616}{0,279} \cdot 3,5 \cdot (0,187 + 0,166 \cdot \frac{0,367}{0,616} \cdot 0,86) = 2,102 \quad (1.67)$$

$$C_\sigma = \ln\left(1 + \frac{\pi \cdot z_1}{2 \cdot b_d}\right) = \ln\left(1 + \frac{\pi \cdot 18,4}{2 \cdot 16,5}\right) = 1,012 \quad (1.68)$$

$$X_{\sigma} = \frac{(4\pi)^2 \cdot f \cdot N_s^2}{p \cdot q} \cdot l_e \cdot [A_{\delta} + B_{\delta} + C_{\delta}] \cdot 10^{-7} =$$

$$\frac{(4\pi)^2 \cdot 50 \cdot 336^2}{6 \cdot 3,5} \cdot 0,279 \cdot [2,352 + 2,102 + 1,012] \cdot 10^{-7} = 6,473 \Omega \quad (1.69)$$

Procentní hodnota úbytku napětí na rozptylové reaktanci:

$$u_{\sigma} = x_{\sigma} = \frac{X_{\sigma} \cdot I_1}{U_f} \cdot 100 = \frac{6,473 \cdot 110}{3637} \cdot 100 = 19,5 \% \quad (1.70)$$

1.6 Návrh magnetického obvodu

Velikost magnetického toku určíme z rovnice pro indukované napětí (1.71) a provedeme kontrolu podle rozměrů stroje a velikosti magnetické indukce ve vzduchové mezeře (předpokládáme její přibližně sinusový průběh).

$$U_f = 4,44 \cdot N_s \cdot \phi \cdot f \cdot k_{v1} \quad (1.71)$$

Magnetický tok:

$$\Phi = \frac{U_f}{4,44 \cdot f \cdot N_s \cdot k_{v1}} = \frac{3637}{4,44 \cdot 50 \cdot 336 \cdot 0,9328} = 0,0523 \text{ Vs} \quad (1.72)$$

Kontrola:

$$\Phi = \frac{2}{\pi} \cdot t_p \cdot l_e \cdot B_{\delta} = \frac{2}{\pi} \cdot 0,367 \cdot 0,279 \cdot 0,8 = 0,0522 \text{ Vs} \quad (1.73)$$

Hodnoty velmi dobře souhlasí, počítáme nadále s hodnotou: $\phi = 0,0523$.

Velikost vzduchové mezery:

Při její volbě vycházíme z požadované procentní hodnoty nesyčené synchronní reaktance a procentní hodnoty rozptylové reaktance.

$$\delta = k \cdot \frac{A \cdot t_p}{B_\delta} \cdot \frac{10^{-6}}{x_d - x_\sigma} = 47 \cdot \frac{50420 \cdot 0,367}{0,8} \cdot \frac{10^{-6}}{120 - 19,5} = 0,0108 \text{ m} \quad (1.74)$$

Kde k ($43 \div 50$), závisí na tvaru pólového nástavce, velikosti Carterova činitele a dalších parametrech. Procentní hodnota nesyčené synchronní reaktance, není-li zadána, se volí dle počtu pólů.

2p	6	8	10	12	16	20	24	28	40	56
x_d	150	137	127	120	110	105	100	98	95	93

Tabulka 1.3: Volba nesyčené synchronní reaktance [3]

Volíme:

$$\delta = 0,011 \text{ m} \quad (1.75)$$

Za účelem pokud možno sinusového průběhu magnetické indukce ve vzduchové mezeře volíme po obvodu proměnnou velikost vzduchové mezery. Na okraji pólových nástavců je velikost mezery ($1,5 \div 2$) krát větší než v ose pólu.

Volíme:

$$\frac{\delta_{max}}{\delta} = 1,5. \quad (1.76)$$

Magnetické napětí reakce kotvy:

$$F_a = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \frac{1}{C_1} \cdot A \cdot t_p \cdot k_{v1} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \frac{1}{1,029} \cdot 50420 \cdot 0,367 \cdot 0,9328 = 7551 \text{ A} \quad (1.77)$$

Kde C_1 je činitel první harmonické magnetické indukce ve vzduchové mezeře, který určíme z grafu v příloze č.5.

Amplituda základní harmonické magnetického napětí v podélném (F_{d1}) a v příčném (F_{q1}) směru:

$$F_{d1} = C_{d1} \cdot F'_a = 0,8748 \cdot 7551 = 6605,61 \text{ A} \quad (1.78)$$

$$F_{q1} = C_{q1} \cdot F'_a = 0,432 \cdot 7551 = 3262,03 \text{ A} \quad (1.79)$$

, kde:

$$C_{d1} = e \cdot f = 0,81 \cdot 1,08 = 0,8748 \quad (1.80)$$

$$C_{q1} = g \cdot h = 1,44 \cdot 0,3 = 0,432 \quad (1.81)$$

Hodnoty e, f, g a h jsou odečteny z příslušných grafů v příloze č.6 pro hodnoty:

$$\frac{\delta_{max}}{\delta} = 1,5 ; \frac{\delta}{t_p} = \frac{11}{367} = 0,3 ; \alpha = 0,65.$$

1.7 Dimenzování magnetického obvodu

Výška pólu:

$$h_p = 0,3 \cdot t_p = 0,3 \cdot 0,367 = 0,110 \text{ m} \quad (1.82)$$

Výška nástavce:

$$h_n = 0,1 \cdot t_p = 0,1 \cdot 0,367 = 0,037 \text{ m} \quad (1.83)$$

Šířka pólu:

$$b_p = \frac{(1 + \nu) \cdot \Phi}{B_p \cdot L_p} = \frac{(1 + 0,2) \cdot 0,0523}{1,6 \cdot 0,329} = 0,119 \text{ m} \quad (1.84)$$

Šířka pólového nástavce:

$$b_n = \alpha \cdot t_p = 0,65 \cdot 0,367 = 0,239 \text{ m} \quad (1.85)$$

Kde ν je předpokládaná poměrná hodnota mezipólového rozptylového toku ($\nu = 0,1 \div 0,2$) a délka pólu $L_p = L$ (je stejná jako celková délka induktu, tedy včetně radiálních ventilačních kanálů).

Výška jha rotoru:

$$h_{jr} = \frac{(1 + \nu) \cdot \Phi}{2 \cdot B_{jr} \cdot L_r} = \frac{(1 + 0,2) \cdot 0,0523}{2 \cdot 1,1 \cdot 0,449} = 0,064 \text{ m} \quad (1.86)$$

Kde B_p je zvolená hodnota magnetické indukce ve jhu rotoru a L_r délka rotoru, proti délce pólu zvětšená s ohledem na prostor pro dosednutí budící cívky.

Výška jádra induktu:

$$h_{js} = \frac{\Phi}{2 \cdot B_{js} \cdot k_{Fe} \cdot l_e} = \frac{0,0523}{2 \cdot 1,3 \cdot 0,92 \cdot 0,279} = 0,0784 \text{ m} \quad (1.87)$$

Délka středních siločár částí magnetického obvodu:

Pól:

$$l_p = h_p + h_n = 0,110 + 0,037 = 0,147 \text{ m} \quad (1.88)$$

Jho rotoru:

$$l_r = \frac{\pi \cdot [D_1 - 2(\delta + h_p + h_n)]}{4p} = \frac{\pi \cdot [1,4 - 2(0,011 + 0,110 + 0,037)]}{24} = 0,14 \text{ m} \quad (1.89)$$

Jádro induktu:

$$l_s = \frac{\pi \cdot [D_1 + 2(h_d + h_{js})]}{4p} = \frac{\pi \cdot [1,4 + 2(0,091 + 0,0784)]}{24} = 0,228 \text{ m} \quad (1.90)$$

1.8 Charakteristika naprázdno

$$\frac{b_d}{z_1} = \frac{16,5}{18,4} = 0,9 \quad (1.91)$$

$$\frac{b_d}{\delta} = \frac{16,5}{11} = 1,5 \quad (1.92)$$

Pomocí předchozích dvou rovnic (1.91 a 1.92) získáme hodnotu $k_{cd} = 1,12$, která byla odečtena z grafu v příloze číslo 7.

Carterův činitel respektující vliv radiálních ventilačních kanálů:

$$k_{ck} = \frac{1}{1 + \frac{\delta}{2 + \delta} \cdot \frac{s_k \cdot i}{l_e}} = \frac{1}{1 + \frac{11}{2 + 11} \cdot \frac{10 \cdot 6}{279}} = 0,846 \quad (1.93)$$

Výsledná hodnota Carterova činitele:

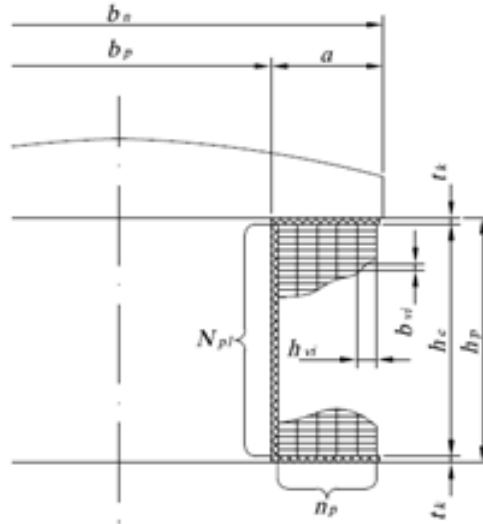
$$k_c = k_{ck} \cdot k_{cd} = 0,846 \cdot 1,12 = 0,94752 \quad (1.94)$$

Magnetické napětí na vzduchové mezeře:

$$F_\delta = 0,8 \cdot k_c \cdot \delta \cdot B_\delta \cdot 10^6 = 0,8 \cdot 0,94752 \cdot 0,011 \cdot 0,8 \cdot 10^6 = 6670,54 \text{ A} \quad (1.95)$$

Výpočet charakteristiky naprázdno je uveden v tabulkách v příloze č. 13 a 14. Charakteristika naprázdno je zobrazena v příloze č.12.

1.9 Návrh budicího vinutí



Obrázek 1.3: Budicí cívka [5]

Z charakteristiky naprázdno bylo odečteno magnetické budicí napětí $F_b = 16820$ A.

Přesahující část pólového nástavce:

$$a = \frac{b_n - b_p}{2} = \frac{0,239 - 0,119}{2} = 0,06m \quad (1.96)$$

Předběžná střední délka závitů budicí cívky:

$$l_{bs} = 2 \cdot \left(L_p + b_p + \frac{b_n - b_p}{2} \right) = 2 \cdot \left(0,329 + 0,119 + \frac{0,239 - 0,119}{2} \right) = 1,016 \text{ m} \quad (1.97)$$

Pro budicí vinutí jsem zvolil napětí 200 V. Tomu odpovídá průřez vodiče budicí cívky:

$$S'_{Cub} = \frac{\rho_{Cu} \cdot l_{bs} \cdot 2 \cdot p \cdot F_b}{0,9 \cdot U_b} = \frac{\frac{1}{56} \cdot 1,016 \cdot 2 \cdot 6 \cdot 16820}{0,9 \cdot 200} = 20,34 \text{ mm}^2 \quad (1.98)$$

Volíme rozměr vodiče holého/ izolovaného: $7 \times 3,2 / 7,37 \times 3,57$ ($h_{bv} \times b_{bv} / h_{bvi} \times b_{bvi}$), kterému odpovídá čistý průřez (při respektování zaoblení hran a nerovnosti povrchu):

$$S_{Cub} = 21,4 \text{ mm}^2 \quad (1.99)$$

Volím proudovou hustotu $\sigma_{Cub} = 2,3 \text{ A/mm}^2$

Budící proud:

$$I_b = \sigma_{Cub} \cdot S_{Cub} = 2,3 \cdot 21,4 = 49,2 \approx 49 \text{ A} \quad (1.100)$$

Počet závitů budící cívky:

$$N_b = \frac{F_b}{I_b} = \frac{16820}{49} = 343,27 \approx 343 \quad (1.101)$$

Počet závitů vedle sebe:

Mezi tělo pólu a cívku je potřeba umístit izolaci tzv. kostřičku. Pro tento případ je použita izolace o tloušťce $t_k = 5 \text{ mm}$.

$$n'_p = \frac{a_n - t_k}{h_{bvi}} = \frac{60 - 5}{7,37} = 7,46 \Rightarrow n_p = 8 \quad (1.102)$$

Šířka cívky:

$$b_{bc} = h_{bvi} \cdot n_p = 7,37 \cdot 8 = 58,96 \approx 59 \text{ mm} \quad (1.103)$$

Počet závitů nad sebou:

$$N'_p = \frac{N_p}{n_p} = \frac{343}{8} = 42,88 \Rightarrow N_p = 43 \quad (1.104)$$

Výška cívky:

$$h_{bc} = N_p \cdot b_{vi} = 43 \cdot 3,57 \approx 154 \text{ mm} \quad (1.105)$$

Výška těla pólu:

$$h_p = h_{bc} + 2 \cdot t_k = 154 + 2 \cdot 5 = 164 \text{ mm} \quad (1.106)$$

1.10 Orientační výpočet oteplení budící cívky

Nyní, když je navržena cívka budícího vinutí, je potřeba vypočítat její oteplení při dané proudové hustotě a ověřit si tak, že tato hodnota odpovídá předepsanému oteplení.

Vnější obvod budící cívky:

$$l_{bc} = 2 \cdot [L_p + b_p + 2 \cdot (b_{bc} + t_k)] = 2 \cdot [0,329 + 0,119 + 2 \cdot (0,059 + 0,005)] = 1,152 \text{ m} \quad (1.107)$$

Ochlazovací povrch všech cívek:

$$O_{2pc} = h_{bc} \cdot l_{be} \cdot 2 \cdot p = 0,154 \cdot 1,152 \cdot 2 \cdot 6 = 2,13 \text{ m}^2 \quad (1.108)$$

Střední obvod budící cívky:

$$l_{bs} = 2 \cdot [L_p + b_p + 4 \cdot (t_k + \frac{b_{bc}}{2})] = 2 \cdot [0,329 + 0,119 + 4 \cdot (0,005 + \frac{0,059}{2})] = 1,172 \text{ m} \quad (1.109)$$

Odpor všech cívek budícího vinutí:

$$R_{b/75} = 1,22 \cdot \rho \cdot \frac{l_{bs} \cdot N_b \cdot 2 \cdot p}{S_{Cub}} = 1,22 \cdot \frac{1}{56} \cdot \frac{1,172 \cdot 343 \cdot 2 \cdot 6}{21,4} = 4,91 \text{ } \Omega \quad (1.110)$$

Ztráty v budícím vinutí:

$$\Delta P_{Cub} = R_{b/75} \cdot I_b^2 = 4,91 \cdot 49^2 = 11789 \text{ W} \quad (1.111)$$

Oteplení budící cívky:

$$\Delta \vartheta_{Cub} = \frac{1,18 \cdot \Delta P_{Cub}}{\alpha \cdot O_{2pc}} = \frac{1,18 \cdot 11789}{80 \cdot 2,13} = 81,64 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (1.112)$$

1.11 Návrh tlumiče

Návrh tlumiče je založen na množství mědi statorového vinutí. [2]

Rozteč tyčí uvažovaná na obvodu statoru:

$$t'_t = (0,8 \div 0,9) \cdot t_{d1} = 0,8 \cdot t_{d1} = 0,8 \cdot 40 = 32 \text{ mm} \quad (1.113)$$

Počet tyčí na pólovém nástavci:

$$Q_{tn} = \frac{b_n}{t'_t} = \frac{239}{32} = 7,47 \quad (1.114)$$

Volím 8 tyčí.

Volba průřezu všech tyčí tlumiče:

$$\Sigma S_t = (0,15 \div 0,3) \cdot \Sigma S_{Cu1} = 0,2 \cdot n_d \cdot Q \cdot S_{Cu1} = 0,2 \cdot 16 \cdot 126 \cdot 24,6 = 9919 \text{ mm}^2 \quad (1.115)$$

Průřez jedné tyče:

$$S_t = \frac{\Sigma S_t}{2 \cdot p \cdot Q_{tn}} = \frac{9919}{2 \cdot 6 \cdot 8} = 103,3 \text{ mm}^2 \quad (1.116)$$

Průměr tyče:

$$d_t = \sqrt{\frac{4 \cdot S_t}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 103,3}{\pi}} = 11,47 \text{ mm} \quad (1.117)$$

Průřez kruhu:

$$S_k = 0,45 \cdot S_{tp} = 0,45 \cdot S_t \cdot Q_{tn} = 0,45 \cdot 103,3 \cdot 8 = 371,88 \text{ mm}^2 \quad (1.118)$$

Konečné rozměry kruhu se určí při konstrukčním návrhu pólu, stejně jako rozložení tyčí tlumiče v pólovém nástavci.

1.12 Kroužky a kartáče

Přenos budícího proudu do statorového vinutí bude proveden pomocí kluzného kontaktu kartáčů a kroužků. Použiji elektrografitové kartáče, pro které platí následující údaje:

Přechodové napětí	u_{pr}	2,1 V
Max. proudové zatížení	σ_k	10 A/cm ²
Max. obvodová rychlost	v_0	40 m/s
Měrný tlak	p_k	18 kPa
Součinitel tření	μ	0,15

Tabulka 1.4: Vlastnosti elektrografitových kartáčů [3]

Celkový průřez kartáčů jedné polaroty:

$$S_k = \frac{I_b}{\sigma_k} = \frac{49}{10} = 4,9 \text{ cm}^2 \quad (1.119)$$

Podle doporučených rozměrů kartáčů (viz. příloha č. 11) volím rozměr b_k x l_k : 20 x 10 mm a to odpovídá průřezu $S_{k1}=2 \text{ cm}^2$, kde b_k je rozměr v osovém směru stroje a určuje šířku kroužku a l_k je rozměr v obvodovém směru.

Počet kartáčů jedné polaroty na obvodu kroužku:

$$i_k = \frac{S_k}{S_{k1}} = \frac{4,9}{2} = 2,45 \quad (1.120)$$

Volím počet kartáčů $i_k=3$ a počet kartáčů obou polarit je tedy $2i_k=6$. Ještě je třeba zkontrolovat obvodovou rychlost kroužků a zda se tento počet kartáčů (včetně pouzdra kartáčových držáků) na obvod kroužků vejde.

Průměr hřídele v místě přívodu mechanické energie (volný konec hřídel):

$$d_H = 0,135 \cdot \sqrt[3]{\frac{P_{kW}}{n}} = 0,135 \cdot \sqrt[3]{\frac{960}{500}} = 0,168 \text{ m} \quad (1.121)$$

Vnější průměr kroužků budeme předpokládat:

$$D_k = 1,3 \cdot d_H = 1,3 \cdot 0,218 = 0,2834 \text{ m} \quad (1.122)$$

Obvodová rychlost kroužků:

$$v_k = \frac{\pi \cdot D_k \cdot n_{max}}{60} = \frac{\pi \cdot 0,2834 \cdot 600}{60} = 28,34 \text{ m/s} \quad (1.123)$$

Rychlost je menší než uvedená maximální hodnota.

Rozteč kartáčů:

$$t_k = \frac{\pi \cdot D_k}{2 \cdot i_k} = \frac{\pi \cdot 0,2834}{2 \cdot 3} = 0,148 \text{ m} \quad (1.124)$$

Rozteč je výrazně větší, než je délka kartáče (l_k), takže i po této stránce je návrh vyhovující.

1.13 Ztráty a účinnost

Poslední část elektromagnetického výpočtu je určení ztrát a účinnosti.

1.13.1 Jouleovy ztráty

Ve vinutí statoru:

$$\Delta P_{Cu1} = m \cdot R_{1/75} \cdot I_1^2 = 3 \cdot 0,598 \cdot 110^2 = 21707 \text{ W} \quad (1.125)$$

V budícím vinutí:

$$\Delta P_{Cub} = R_{b/75} \cdot I_b^2 = 4,91 \cdot 49^2 = 11789 \text{ W} \quad (1.126)$$

1.13.2 V železe

V jádře induktu:

Ztrátové číslo plechů: $\Delta p_{Fe} = 1,8 \text{ W/kg}$

Hmotnost jádra statoru:

$$m_{Fej} = \frac{\pi}{4} (D_{je}^2 - D_3^2) \cdot l_e \cdot k_{Fe} \cdot \rho_{Fe} = \frac{\pi}{4} (1,739^2 - 1,582^2) \cdot 0,279 \cdot 0,92 \cdot 7800 = 820 \text{ kg} \quad (1.127)$$

kde:

$$D_{je} = D_1 + 2 \cdot (h_d + h_{js}) = 1,4 + 2 \cdot (0,091 + 0,0784) = 1,739 \text{ m} \quad (1.128)$$

je vnější průměr statoru.

Ztráty v jádře induktu (statoru):

$$\Delta P_{Fej} = 1,8 \cdot \Delta p_{Fe} \cdot B_{js}^2 \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} \cdot m_{Fej} = 1,8 \cdot 1,8 \cdot 1,3^2 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1,3} \cdot 820 = 4490 \text{ W} \quad (1.129)$$

V zubech statoru:

Hmotnost zubů statoru:

$$m_{F_{ez}} = Q \cdot z_2 \cdot h_d \cdot l_e \cdot k_{Fe} \cdot \rho_{Fe} = 126 \cdot 0,0207 \cdot 0,091 \cdot 0,279 \cdot 0,92 \cdot 7800 = 475 \text{ kg} \quad (1.130)$$

Ztráty v zubech statoru:

$$\Delta P_{F_{ez}} = 2 \cdot \Delta p_{Fe} \cdot B_{z_2}^2 \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} \cdot m_{F_{ez}} = 2 \cdot 1,8 \cdot 1,54^2 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1,3} \cdot 475 = 4055 \text{ W} \quad (1.131)$$

1.13.3 Povrchové

$$\begin{aligned} \Delta P &= \frac{\pi}{2} \cdot D_1 \cdot \alpha \cdot L_p \cdot k_0 \cdot \left(\frac{Q \cdot n}{10000}\right)^{1,5} \cdot (t_{d1} \cdot \beta \cdot 1000 \cdot B_\delta \cdot k_c^2) = \\ &= \frac{\pi}{2} \cdot 1,4 \cdot 0,65 \cdot 0,329 \cdot 4,6 \cdot \left(\frac{126 \cdot 500}{10000}\right)^{1,5} \cdot \\ &\quad \cdot (0,03491 \cdot 0,86 \cdot 1000 \cdot 0,8 \cdot 0,94752) = 779 \text{ W} \quad (1.132) \end{aligned}$$

, kde β a k_0 jsou činitelé povrchových ztrát.

1.13.4 Mechanické

$$\Delta P_{Mech} = v_0^{2,5} \cdot D_1 \cdot \sqrt{l_e} = 36,65^{2,5} \cdot 1,4 \cdot \sqrt{0,279} = 6013 \text{ W} \quad (1.133)$$

$$v_0 = \frac{\pi \cdot D_1 \cdot n}{60} = \frac{\pi \cdot 1,4 \cdot 500}{60} = 36,65 \text{ m/s} \quad (1.134)$$

1.13.5 Přídavné

$$\Delta P_{Pr} = 0,003 \cdot S = 0,003 \cdot 1200 \cdot 10^3 = 3600 \text{ W} \quad (1.135)$$

1.13.6 Celkové

$$\begin{aligned}\Delta P &= \Delta P_{Cu1} + \Delta P_{Cub} + \Delta P_{Fej} + \Delta P_{Fez} + \Delta P_p + \Delta P_m + \Delta P_{Pr} = \\ &= 21707 + 11789 + 4490 + 4055 + 779 + 6013 + 3600 = 52433 \text{ W} \quad (1.136)\end{aligned}$$

1.14 Účinnost

$$\eta = 100 \cdot \left(1 - \frac{\Delta P}{P + \Delta P}\right) = 100 \cdot \left(1 - \frac{52433}{960000 + 52433}\right) = 94,82 \text{ \%} \quad (1.137)$$

2 Mechanické výpočty

Tato kapitola se zabývá zjednodušenými mechanickými výpočty, které se zabývají upevněním pólu. Jedná o nenormalizovanou součást, a proto je navrhována speciálně pro tento stroj.

2.1 Výpočet průměrů hřídele

$$d_H = 0,135 \cdot \sqrt[i]{\frac{P}{n}} = 0,135 \cdot \sqrt[3]{\frac{960}{500}} = 0,168 \text{ m} \quad (2.1)$$

Kde $i=3$ pro $\frac{P}{n} > 1$.

$$D_H = (1,3 \div 2) \cdot d_H = 1,5 \cdot 0,168 = 0,252 \text{ m} \quad (2.2)$$

2.2 Výpočet sil působících na pól a druh upevnění

$$m_{Cub} = S_{Cub} \cdot N_s \cdot l_{bs} \cdot \rho_{Cu} = 21,4 \cdot 10^{-6} \cdot 343 \cdot 1,016 \cdot 8900 = 66,4 \text{ kg} \quad (2.3)$$

$$m_p = S_p \cdot l_{bs} \cdot \rho_{Fe} = 0,329 \cdot 0,110 \cdot 0,119 \cdot 7800 = 33,6 \text{ kg} \quad (2.4)$$

$$m_n = S_n \cdot l_{bs} \cdot \rho_{Fe} = 0,037 \cdot 0,239 \cdot 0,329 \cdot 7800 = 22,7 \text{ kg} \quad (2.5)$$

Z vytvořeného konstrukčního uspořádání zjistíme poloměry od osy stroje, k těžišti jednotlivých částí:

$$r_{Cub} = 0,578 \text{ m}, r_p = 0,570 \text{ m}, r_n = 0,671 \text{ m}$$

Velikost odstředivé síly na jeden pól:

$$\begin{aligned}
 F_e = \Sigma F_i &= \left(\frac{\pi \cdot n_{max}}{30}\right)^2 \cdot (m_{Cub} \cdot r_{Cub} + m_p \cdot r_p + m_n \cdot r_n) = \\
 &= \left(\frac{\pi \cdot 1,2 \cdot n}{30}\right)^2 \cdot (m_{Cub} \cdot r_{Cub} + m_p \cdot r_p + m_n \cdot r_n) = \\
 \left(\frac{\pi \cdot 1,2 \cdot 500}{30}\right)^2 \cdot (66,4 \cdot 0,578 + 33,6 \cdot 0,570 + 22,7 \cdot 0,671) &= 287132,97 \text{ N}
 \end{aligned}
 \tag{2.6}$$

$$F_1 = \frac{F_e}{L_p} = \frac{287132,97}{0,329} = 872744,6 \text{ N/m} \tag{2.7}$$

Pokud $F_1 < 2,5 \cdot 10^6$ volíme šrouby, pokud $F_1 > 2,5 \cdot 10^6$ volíme rybiny/kladiva.

Vzhledem k tomu, že $F_1 \ll 2,5 \cdot 10^6$, volím šrouby.

2.3 Výpočet upevnění pomocí šroubů**Zvětšíme osovou sílu na předpjatý šroubový spoj:**

$$F_s = (1,5 \div 2)F_e = 1,5 \cdot 287132,97 = 430699,46 \text{ N} \tag{2.8}$$

Celkový průřez jádra všech šroubů:

$$S_s = \frac{(1,24 \div 1,36)F_s}{\sigma_{dov}} = \frac{1,24 \cdot 430699,46}{150 \cdot 10^6} = 3560 \text{ mm}^2 \tag{2.9}$$

Zvolím průměr šroubu, kterému odpovídá průřez jádra S_j a určím počet šroubů.

Volím šroub M39, $S_j = 976 \text{ mm}^2$.

Počet šroubů:

$$i = \frac{S_s}{S_j} = \frac{3560}{976} = 3,65 \tag{2.10}$$

Volím 4 šrouby M39.

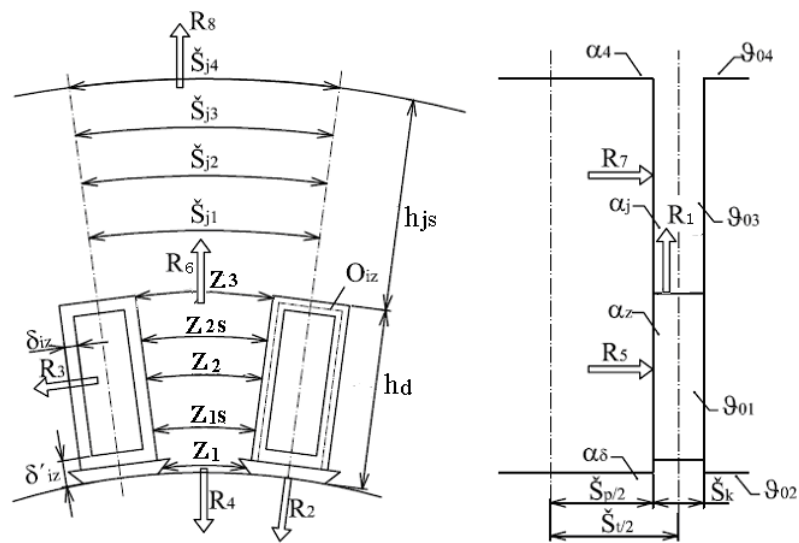
3 Výpočet oteplení induktu v ustáleném stavu

Tepelný výpočet je určen ke stanovení oteplení jednotlivých částí stroje. Ověřujeme, zda teploty jednotlivých částí nepřesahují odolnost zvolené třídy izolace.

Třída	Max. teplota [$^{\circ}C$]	Max. oteplení [$^{\circ}C$]
Y	90	45
A	105	60
E	120	75
B	130	80
F	155	105
H	180	130
C	>180	>130

Tabulka 3.1: Třídy izolací [6]

Na Obr.3.1 jsou zobrazeny jednotlivé rozměry částí obvodu nezbytné pro výpočet oteplení kotvy.



Obrázek 3.1: Vymezený úsek induktu stroje [3]

Jednotlivé velikosti vybraných částí jsou získány z již provedeného výpočtu v kapitole 1, popřípadě jejich rozdělením na části, nebo odečtením z provedeného konstrukčního uspořádání stroje.

Vstupní hodnoty:

$D_1 = 1,4 \text{ m}$, $l_e = 0,279 \text{ m}$, $L = 0,329 \text{ m}$, $Q = 126$, $l_d = 0,329 \text{ m}$, $l = 0,616 \text{ m}$, $l_{celk} = 0,945$, počet paketů $i = 6$, $\check{s}_p = 0,0465 \text{ m}$, $\check{s}_k = 0,010 \text{ m}$, $\check{s}_t = \check{s}_p + \check{s}_k = 0,0565 \text{ m}$, $t_{d1} = 0,03491 \text{ m}$, $b_d = 0,0165 \text{ m}$, $h_d = 0,091 \text{ m}$, $h_{js} = 0,0784 \text{ m}$, $\delta_{iz} = 0,00375 \text{ m}$, $\delta'_{iz} = 0,01162 \text{ m}$, $z_1 = 0,0184 \text{ m}$, $z_{1s} = 0,01955 \text{ m}$, $z_2 = 0,0207 \text{ m}$, $z_{2s} = 0,0218 \text{ m}$, $z_3 = 0,0229 \text{ m}$, $\check{s}_{j1} = 0,04042 \text{ m}$, $\check{s}_{j2} = 0,0414 \text{ m}$, $\check{s}_{j3} = 0,04238 \text{ m}$, $\check{s}_{j4} = 0,04335 \text{ m}$

Ztráty v drážkové části:

$\Delta P_{Cud} = 7557 \text{ W}$, $\Delta P_{Cuc} = 14150 \text{ W}$, $\Delta P_{Fez} = 4055 \text{ W}$, $\Delta P_{Fej} = 4490 \text{ W}$, $\Delta P_{Cub} = 11789 \text{ W}$, $\Delta P_p = 779 \text{ W}$, $\Delta P_m = 6013 \text{ W}$, $\Delta P_{pr} = 3600 \text{ W}$,
Ztráty celkové: $\Delta P = \Sigma \Delta P_i = 52433 \text{ W}$

Ztráty odváděné rotorovou větví:

$$\Delta P_{rv} = \Delta P - (\Delta P_{Cuc} + \Delta P_m + \Delta P_{pr}) = 52433 - (14150 + 6013 + 3600) = 28670 \text{ W} \quad (3.1)$$

Střední rychlost proudění vzduchu v radiálním kanálu:

Budeme vycházet z předpokladu, že by se měl chladící vzduch proudící kanálem ohřát o $\Delta\theta = 15^\circ\text{C}$.

c_v je objemové měrné teplo chladiva (pro vzduch $c_v = 1250 \text{ W} \cdot \text{s}/^\circ\text{C} \cdot \text{m}^3$)

Průtočné množství vzduchu všemi kanály:

$$Q_{rv} = \frac{\Delta P_{rv}}{c_v \cdot \Delta\theta} = \frac{28670}{1250 \cdot 15} = 1,53 \text{ m}^3/\text{s} \quad (3.2)$$

Množství na jeden kanál a drážkovou rozteč:

$$Q_{r1} = \frac{Q_{rv}}{Q \cdot i} = \frac{1,53}{126 \cdot 6} = 0,002 \text{ m}^3/\text{s} \quad (3.3)$$

Střední rychlost proudění v prostoru zubů:

$$v_{kz} = \frac{Q_{r1}}{s_{z3} \cdot s_k} = \frac{0,002}{0,0229 \cdot 0,010} = 8,73 \text{ m/s} \quad (3.4)$$

Střední rychlost proudění v prostoru jádra:

$$v_{kj} = \frac{Q_{r1}}{s_{j2} \cdot s_k} = \frac{0,002}{0,0414 \cdot 0,010} = 4,83 \text{ m/s} \quad (3.5)$$

Těmto rychlostem proudění odpovídá součinitel přestupu tepla (dle odhadu):

$$\alpha_z = 55 \text{ W/}^0\text{C} \cdot \text{m}^2, \alpha_j = 45 \text{ W/}^0\text{C} \cdot \text{m}^2, \alpha_4 = 40 \text{ W/}^0\text{C} \cdot \text{m}^2$$

Ztráty v uvažovaných úsecích (tekoucích do uzlů):

Ve vinutí:

$$\Delta P_{Cud1} = \frac{\Delta P_{Cud}}{2 \cdot Q \cdot i} = \frac{7557}{2 \cdot 126 \cdot 6} = 4,99 \text{ W} \quad (3.6)$$

V zubu:

$$\Delta P_{Fez1} = \frac{\Delta P_{Fez}}{2 \cdot Q \cdot i} = \frac{4055}{2 \cdot 126 \cdot 6} = 2,68 \text{ W} \quad (3.7)$$

V jádře kotvy:

$$\Delta P_{Fej1} = \frac{\Delta P_{Fej}}{2 \cdot Q \cdot i} = \frac{4490}{2 \cdot 126 \cdot 6} = 2,97 \text{ W} \quad (3.8)$$

Určení okolních teplot vymezeného úseku:

Oteplení chladiwa ve vzduchové mezeře:

$$\theta_{02} = \theta_0 + \frac{\Delta P_{rot}}{c_v \cdot Q_{rv}} = \theta_0 + \frac{\Delta P_{Cub} + \Delta P_p}{c_v \cdot Q_{rv}} = 0 + \frac{11789 + 779}{1250 \cdot 1,53} = 6,7 \text{ }^0\text{C} \quad (3.9)$$

Oteplení chladiwa v okolí zubu kanálu:

$$\theta_{01} = \theta_{02} + \frac{\Delta P_{Fez} + \Delta P_{Cud}}{2 \cdot c_v \cdot Q_{rv}} = 6,7 + \frac{4055 + 7557}{2 \cdot 1250 \cdot 1,53} = 9,74 \text{ } ^\circ C \quad (3.10)$$

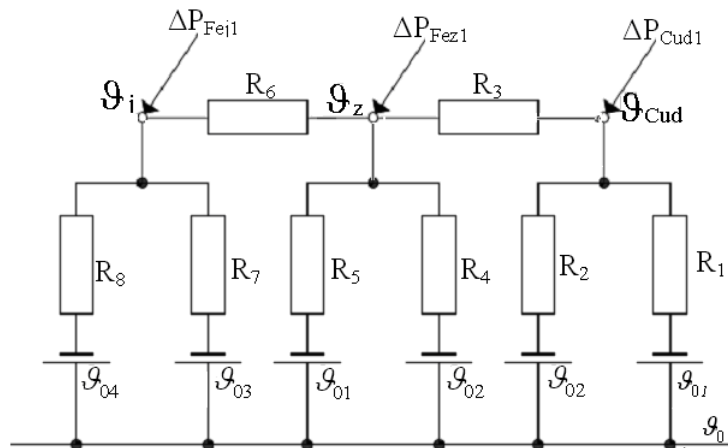
Oteplení chladiwa v okolí jádra kotvy kanálu:

$$\begin{aligned} \theta_{03} &= \theta_{02} + \frac{\Delta P_{Fez} + \Delta P_{Cud} + \frac{1}{2} \Delta P_{Fej}}{c_v \cdot Q_{rv}} = \\ &= 6,7 + \frac{4055 + 7557 + \frac{1}{2} \cdot 4490}{1250 \cdot 1,53} = 13,95 \text{ } ^\circ C \quad (3.11) \end{aligned}$$

Oteplení chladiwa vystupujícího z kanálu:

$$\theta_{04} = \theta_{02} + \frac{\Delta P_{Fez} + \Delta P_{Cud} + \Delta P_{Fej}}{c_v \cdot Q_{rv}} = 6,7 + \frac{4055 + 7557 + 4490}{1250 \cdot 1,53} = 15,12 \text{ } ^\circ C \quad (3.12)$$

Výpočet tepelných odporů:



Obrázek 3.2: Náhradní schéma ustáleného tepelného stavu vymezeného úseku [3]

Vzhledem k faktu, že není vytvořen ventilační výpočet daného stroje, zvolím si jednotlivé konstanty měrné tepelné vodivosti (λ) a součinitele přestupu tepla (α):

$$\lambda_{iz} = 0,2 \text{ W/m}^0\text{C}, \lambda_{Fed} = 45 \text{ W/m}^0\text{C}, \lambda_{Feq} = 1 \text{ W/m}^0\text{C}, \lambda_{vzd} = 0,028 \text{ W/m}^0\text{C}, \alpha_\delta = 80 \text{ W/m}^0\text{Cm}^2$$

Nepřesnost uložení, je v závislosti na použité technologii a tloušťce izolace, zohledněna součtem vzduchových mezer mezi jednotlivými vrstvami. Nejčastěji bývá použita tloušťka: [6]

$$\delta_{vzd} = 0,0001 \text{ m}$$

Obvod izolace v drážce:

$$O_{iz} = 2 \cdot h_d + b_d = 2 \cdot 0,091 + 0,0165 = 0,1985 \text{ m} \quad (3.13)$$

Poté jsem vypočítal jednotlivé tepelné odpory náhradního schématu.

Tepelné odpory:

Z vinutí do ventilačního kanálu:

$$\begin{aligned} R_1 &= \frac{\delta_{iz}}{\lambda_{iz} \cdot O_{iz} \cdot \frac{s_k}{2}} + \frac{\delta_{vzd}}{\lambda_{vzd} \cdot O_{iz} \cdot \frac{s_k}{2}} + \frac{1}{\alpha_z \cdot O_{iz} \cdot \frac{s_k}{2}} = \\ &= \frac{0,00375}{0,2 \cdot 0,1985 \cdot \frac{0,010}{2}} + \frac{0,0001}{0,028 \cdot 0,1985 \cdot \frac{0,010}{2}} + \frac{1}{55 \cdot 0,1985 \cdot \frac{0,010}{2}} = \\ &= 40,81 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}} \quad (3.14) \end{aligned}$$

Z vinutí do vzduchové mezery:

$$\begin{aligned} R_2 &= \frac{\delta'_{iz}}{\lambda_{iz} \cdot b_d \cdot \frac{s_t}{2}} + \frac{\delta_{vzd}}{\lambda_{vzd} \cdot b_d \cdot \frac{s_t}{2}} + \frac{1}{\alpha_\delta \cdot b_d \cdot \frac{s_t}{2}} = \\ &= \frac{0,01162}{0,2 \cdot 0,0165 \cdot \frac{0,0565}{2}} + \frac{0,0001}{0,028 \cdot 0,0165 \cdot \frac{0,0565}{2}} + \frac{1}{80 \cdot 0,0165 \cdot \frac{0,0565}{2}} = \\ &= 159,12 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}} \quad (3.15) \end{aligned}$$

Z vinutí do zubu:

$$\begin{aligned}
 R_3 &= \frac{\delta_{iz}}{\lambda_{iz} \cdot O_{iz} \cdot \frac{s_p}{2}} + \frac{\delta_{vzd}}{\lambda_{vzd} \cdot O_{iz} \cdot \frac{s_p}{2}} + \frac{\frac{z_2}{2}}{3 \cdot \lambda_{Fed} \cdot O_{iz} \cdot \frac{s_p}{2}} = \\
 &= \frac{0,00375}{0,2 \cdot 0,1985 \cdot \frac{0,0465}{2}} + \frac{0,0001}{0,028 \cdot 0,1985 \cdot \frac{0,0465}{2}} + \frac{\frac{0,0207}{2}}{3 \cdot 45 \cdot 0,1985 \cdot \frac{0,0465}{2}} = \\
 &= 4,85 \frac{^{\circ}C}{W} \quad (3.16)
 \end{aligned}$$

Ze zubu do vzduchové mezery:

$$\begin{aligned}
 R_4 &= \frac{\frac{h_d}{2}}{3 \cdot \lambda_{Feq} \cdot z_{1s} \cdot \frac{s_p}{2}} + \frac{1}{\alpha_{\delta} \cdot z_1 \cdot \frac{s_p}{2}} = \\
 &= \frac{\frac{0,091}{2}}{3 \cdot 1 \cdot 0,01955 \cdot \frac{0,0465}{2}} + \frac{1}{80 \cdot 0,0184 \cdot \frac{0,0465}{2}} = 62,59 \frac{^{\circ}C}{W} \quad (3.17)
 \end{aligned}$$

Ze zubu do ventilačního kanálu:

$$\begin{aligned}
 R_5 &= \frac{\frac{s_p}{2}}{3 \cdot \lambda_{Feq} \cdot z_2 \cdot h_d} + \frac{1}{\alpha_z \cdot z_2 \cdot h_d} = \\
 &= \frac{\frac{0,0465}{2}}{3 \cdot 1 \cdot 0,0207 \cdot 0,091} + \frac{1}{55 \cdot 0,0207 \cdot 0,091} = 13,77 \frac{^{\circ}C}{W} \quad (3.18)
 \end{aligned}$$

Z plechů zubu do plechů jádra:

$$\begin{aligned}
 R_6 &= \frac{\frac{h_d}{2}}{3 \cdot \lambda_{Fed} \cdot z_{2s} \cdot \frac{s_p}{2}} + \frac{\frac{h_{js}}{2}}{3 \cdot \lambda_{Fed} \cdot s_{j1} \cdot \frac{s_p}{2}} = \\
 &= \frac{\frac{0,091}{2}}{3 \cdot 45 \cdot 0,0218 \cdot \frac{0,0465}{2}} + \frac{\frac{0,0784}{2}}{3 \cdot 45 \cdot 0,04042 \cdot \frac{0,0465}{2}} = 0,97 \frac{^{\circ}C}{W} \quad (3.19)
 \end{aligned}$$

Z plechů jádra do ventilačního kanálu:

$$R_7 = \frac{\frac{s_p}{2}}{3 \cdot \lambda_{Feq} \cdot s_{j2} \cdot h_{js}} + \frac{1}{\alpha_j \cdot s_{j2} \cdot h_{js}} =$$

$$= \frac{0,0465}{3 \cdot 1 \cdot 0,0414 \cdot 0,0784} + \frac{1}{45 \cdot 0,0414 \cdot 0,0784} = 9,23 \frac{^{\circ}C}{W} \quad (3.20)$$

Z plechů jádra na vnější obvod statoru:

$$R_8 = \frac{\frac{h_{js}}{2}}{3 \cdot \lambda_{Fed} \cdot s_{j3} \cdot \frac{s_p}{2}} + \frac{1}{\alpha_4 \cdot s_{j4} \cdot \frac{s_p}{2}} =$$

$$= \frac{0,0784}{3 \cdot 45 \cdot 0,04238 \cdot \frac{0,0465}{2}} + \frac{1}{40 \cdot 0,04335 \cdot \frac{0,0465}{2}} = 25,1 \frac{^{\circ}C}{W} \quad (3.21)$$

Pro řešení teplot v ustáleném stavu, byl nejprve sestaven náhradní tepelný obvod vybraného úseku induktu (viz. Obr.3.2). Poté bylo třeba určit zbývající teploty v uzlech schématu. Za tímto účelem byla sestavena soustava tří rovnic o třech neznámých.

Soustava rovnic pro řešení:

$$\frac{\theta_{Cud} - \theta_{01}}{R_1} + \frac{\theta_{Cud} - \theta_{02}}{R_2} + \frac{\theta_{Cud} - \theta_z}{R_3} = \Delta P_{Cud1} \quad (3.22)$$

$$\frac{\theta_z - \theta_{Cud}}{R_3} + \frac{\theta_z - \theta_{02}}{R_4} + \frac{\theta_z - \theta_{01}}{R_5} + \frac{\theta_z - \theta_j}{R_6} = \Delta P_{Fez1} \quad (3.23)$$

$$\frac{\theta_j - \theta_z}{R_6} + \frac{\theta_j - \theta_{03}}{R_7} + \frac{\theta_j - \theta_{04}}{R_8} = \Delta P_{Fej1} \quad (3.24)$$

$$\frac{\theta_{Cud} - 9,74}{40,81} + \frac{\theta_{Cud} - 6,7}{159,12} + \frac{\theta_{Cud} - \theta_z}{4,85} = 4,99$$

$$\frac{\theta_z - \theta_{Cud}}{4,85} + \frac{\theta_z - 6,7}{62,59} + \frac{\theta_z - 9,74}{13,77} + \frac{\theta_z - \theta_j}{0,97} = 2,68$$

$$\frac{\theta_j - \theta_z}{0,97} + \frac{\theta_j - 13,95}{9,23} + \frac{\theta_j - 15,12}{25,1} = 2,97$$

Soustava tří rovnic byla vyřešena pomocí softwaru a byli zjištěny následující hodnoty oteplení:

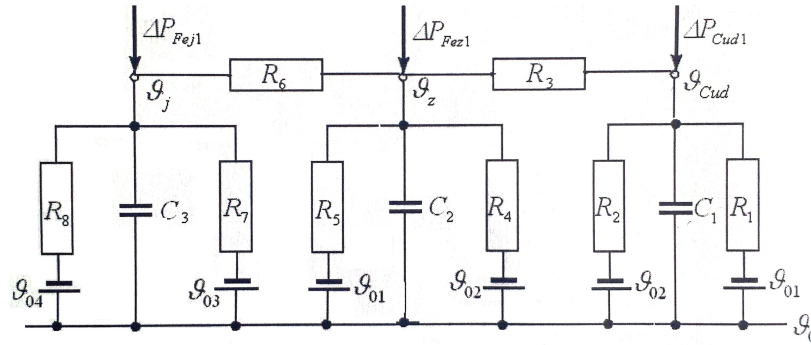
Oteplení uzlu nad teplotu okolí (40 ⁰ C)	Zaokrouhleno
$\theta_{Cud} = 66,73 \text{ } ^0C$	$\theta_{Cud} = 67 \text{ } ^0C$
$\theta_z = 51,13 \text{ } ^0C$	$\theta_z = 51 \text{ } ^0C$
$\theta_j = 49,019 \text{ } ^0C$	$\theta_j = 49 \text{ } ^0C$

Tabulka 3.2: Vypočtené hodnoty oteplení v ustáleném stavu

Z hodnoty oteplení vyplývá, že lze použít izolaci třídy E. Vzhledem k faktu, že dnes se již využívá izolace třídy F jako standard, zvolil bych v případě dalšího návrhu stroje vyšší proudovou hustotu ve vodiči.

4 Výpočet oteplení induktu v přechodném stavu

Pro výpočet teplot v přechodném stavu jsem upravil schéma na Obr. 3.2 přidáním tepelných kapacit do jednotlivých uzlů, viz. Obr 4.1.



Obrázek 4.1: Náhradní schéma přechodného tepelného stavu vymezeného úseku [3]

Výpočet tepelných kapacit

$$\begin{aligned}
 C_1 &= c_{Cu} \cdot M_{Cud1} = c_{Cu} \cdot S'_{Cu1} \cdot \frac{s_t}{2} \cdot \rho_{Cu} = \\
 c_{Cu} \cdot b_d \cdot h_d \cdot \frac{s_t}{2} \cdot \rho_{Cu} &= 385 \cdot 9 \cdot 10^{-3} \cdot 44,8 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{0,0565}{2} \cdot 8960 = 39,29 \text{ J/Kg} \cdot K
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

$$\begin{aligned}
 C_2 &= c_{Fe} \cdot M_{Fez1} = c_{Fe} \cdot \frac{s_p}{2} \cdot z_2 \cdot h_d \cdot \rho_{Fe} = 455 \cdot \frac{0,0465}{2} \cdot 0,0207 \cdot 0,091 \cdot 7870 = 156,83 \text{ J/Kg} \cdot K
 \end{aligned} \tag{4.2}$$

$$\begin{aligned}
 C_3 &= c_{Fe} \cdot M_{Fej1} = c_{Fe} \cdot \frac{\pi}{4} (D_e^2 - D_3^2) \cdot \frac{1}{Q} \cdot \frac{s_p}{2} \cdot \rho_{Fe} = \\
 455 \cdot \frac{\pi}{4} (1739^2 - 1582^2) \cdot \frac{1}{126} \cdot \frac{0,0465}{2} \cdot 7870 &= 270,6 \text{ J/Kg} \cdot K
 \end{aligned} \tag{4.3}$$

Časový průběh teploty každého uzlu, se získá řešením soustavy tří diferenciálních rovnic, které jsou aplikací I. Kirchhoffova zákona pro uvedené náhradní schéma a obdrží se po úpravě níže uvedených rovnic.

Soustava diferenciálních rovnic:

$$\frac{\theta_{Cud} - \theta_{01}}{R_1} + \frac{\theta_{Cud} - \theta_{02}}{R_2} + \frac{\theta_{Cud} - \theta_z}{R_3} + C_1 \cdot \frac{d\theta_{Cud}}{dt} = \Delta P_{Cud1} \quad (4.4)$$

$$\frac{\theta_z - \theta_{Cud}}{R_3} + \frac{\theta_z - \theta_{02}}{R_4} + \frac{\theta_z - \theta_{01}}{R_5} + \frac{\theta_z - \theta_j}{R_6} + C_2 \cdot \frac{d\theta_z}{dt} = \Delta P_{F_{ez1}} \quad (4.5)$$

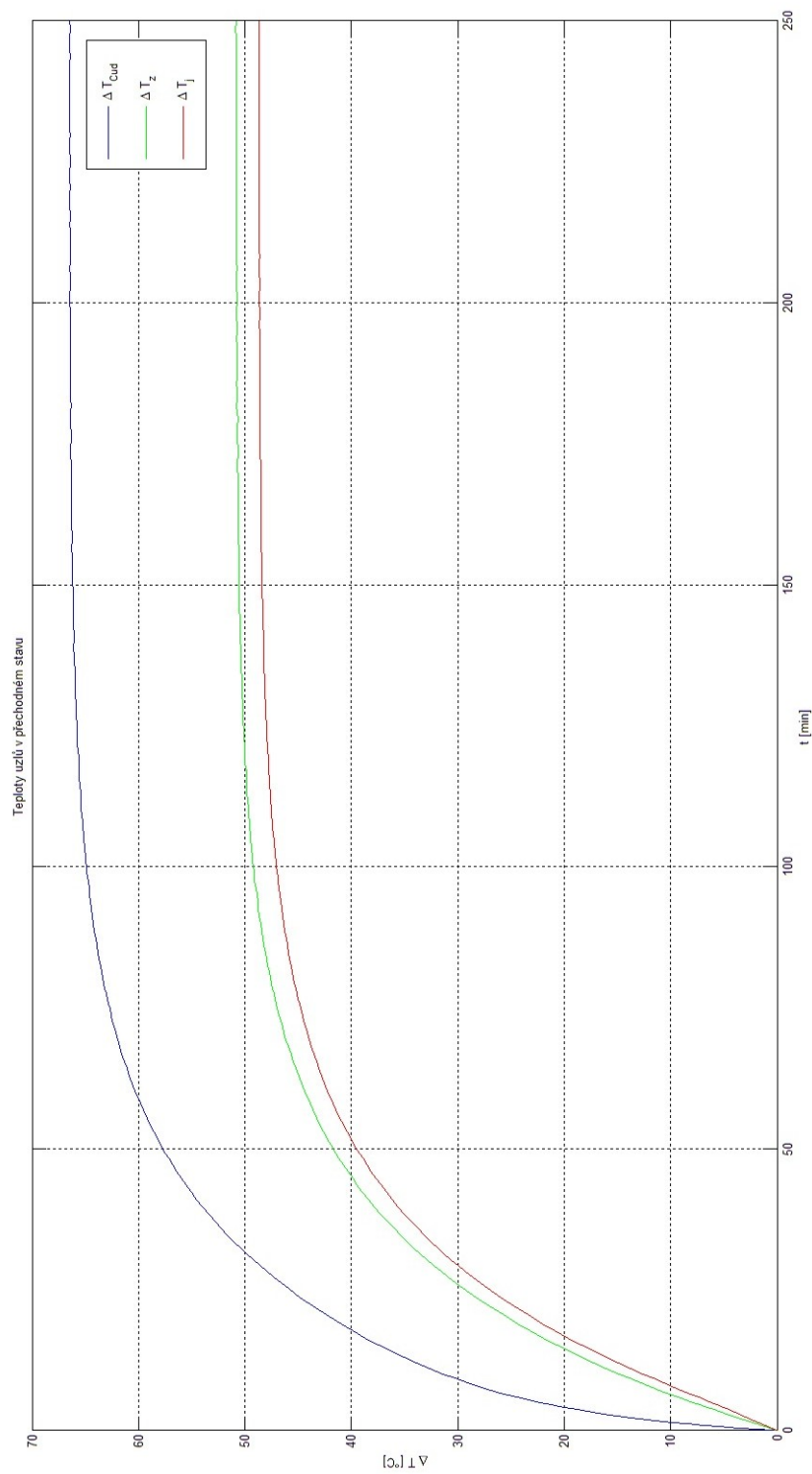
$$\frac{\theta_j - \theta_z}{R_6} + \frac{\theta_j - \theta_{03}}{R_7} + \frac{\theta_j - \theta_{04}}{R_8} + C_3 \cdot \frac{d\theta_j}{dt} = \Delta P_{F_{ej1}} \quad (4.6)$$

$$\frac{\theta_{Cud} - 9,74}{40,81} + \frac{\theta_{Cud} - 6,7}{159,12} + \frac{\theta_{Cud} - \theta_z}{4,85} + 39,29 \cdot \frac{d\theta_{Cud}}{dt} = 4,99$$

$$\frac{\theta_z - \theta_{Cud}}{4,85} + \frac{\theta_z - 6,7}{62,59} + \frac{\theta_z - 9,74}{13,77} + \frac{\theta_z - \theta_j}{0,97} + 156,83 \cdot \frac{d\theta_z}{dt} = 2,68$$

$$\frac{\theta_j - \theta_z}{0,97} + \frac{\theta_j - 13,95}{9,23} + \frac{\theta_j - 15,12}{25,1} + 270,6 \cdot \frac{d\theta_j}{dt} = 2,97$$

Časový průběh teploty každého uzlu jsem získal řešením výše uvedené soustavy diferenciálních rovnic v programu MATLAB a jsou zobrazeny na Obr.4.2 .



Obrázek 4.2: Časové průběhy teplot uzlů

Hodnoty ustálených teplot přechodného stavu jsou zobrazeny v tabulce 4.1.

Ustálená hodnota oteplení nad teplotu okolí (40°C)	Zaokrouhleno
$\theta_{Cud} = 66,48^{\circ}\text{C}$	$\theta_{Cud} = 67^{\circ}\text{C}$
$\theta_z = 50,84^{\circ}\text{C}$	$\theta_z = 51^{\circ}\text{C}$
$\theta_j = 48,66^{\circ}\text{C}$	$\theta_j = 49^{\circ}\text{C}$

Tabulka 4.1: Ustálené hodnoty oteplení v přechodném stavu

Z porovnání hodnot ustálených teplot, v ustáleném a přechodném stavu, je patrné, že hodnoty velmi dobře souhlasí.

5 Ověření vybraných parametrů metodou konečných prvků

K ověření vybraných hodnot (indukce jednotlivých částí obvodu, moment stroje) manuálního výpočtu, jsem provedl simulaci metodou konečných prvků (dále jen MKP) v programu FEMM. Abych mohl porovnat moment stroje, bylo nejdříve nutné zjistit moment stroje výpočtem.

5.1 Výpočet momentové charakteristiky

Momentová charakteristika synchronního stroje, je definovaná jako závislost momentu stroje na zátěžném úhlu. Zátěžný úhel udává zpoždění napětí, indukovaného do statoru polem rotoru, za napětím statoru.

Nejdříve jsem zjistil hodnotu jmenovitého momentu. Stroj má jmenovité otáčky 500 ot/min, z toho určíme úhlovou rychlost $\omega_n = 52,36$ rad/s.

Jmenovitý moment stroje je poté:

$$M_n = \frac{P}{\omega_n} = \frac{960 \cdot 10^3}{52,36} = 18335 \text{ N.m} \quad (5.1)$$

Magnetizační reaktance stroje: [7]

$$\begin{aligned} X_\mu &= 4m \cdot \frac{\mu_0}{\pi} \cdot \frac{(N_s \cdot k_{v1})^2}{p} \cdot \frac{t_p \cdot l_e}{\delta} \cdot f = \\ &= 4 \cdot 3 \cdot \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}}{\pi} \cdot \frac{(336 \cdot 0,9328)^2}{6} \cdot \frac{0,367 \cdot 0,279}{0,011} \cdot 50 = 36,58 \Omega \end{aligned} \quad (5.2)$$

Vlivem deformace magnetického pole se tato reaktance jeví jinak v ose d a q, a je nutno ji proto přepočítat.

$$X_{ad} = C_{d1} \cdot X_\mu = 0,8748 \cdot 36,58 = 32 \Omega \quad (5.3)$$

$$X_{aq} = C_{q1} \cdot X_\mu = 0,432 \cdot 36,58 = 15,8 \Omega \quad (5.4)$$

Při uvažování rozptylové reaktance vinutí vycházejí reaktance stroje:

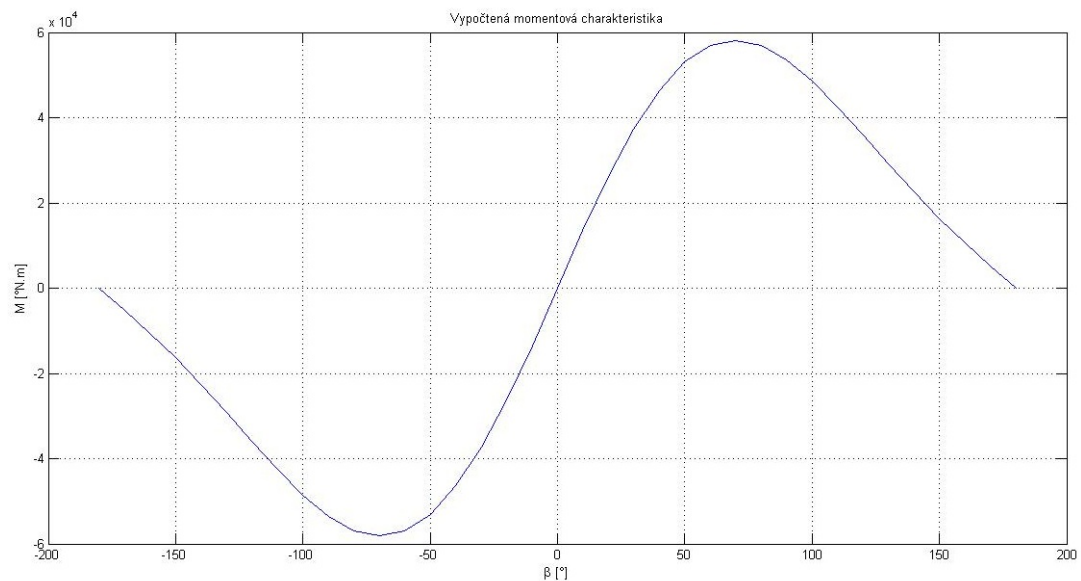
$$X_d = X_{ad} + X_\mu = 32 + 6,473 = 38,5 \Omega \quad (5.5)$$

$$X_{aq} = X_{aq} + X_\mu = 15,8 + 6,473 = 22,3 \Omega \quad (5.6)$$

Moment stroje pro zjištění momentové charakteristiky:

$$M = \frac{p \cdot m}{\omega} \cdot U_f \cdot \frac{U_{ib}}{X_d} \cdot \sin(\beta) + \frac{U_f}{2} \cdot \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cdot \sin(2\beta) \quad (5.7)$$

Jedinou neznámou veličinou je zátěžný úhel β . Postupným dosazováním do rovnice 5.7 za úhel β od -180° do 180° jsem získal momentovou charakteristiku stroje, která je zobrazena na Obr. 5.1.



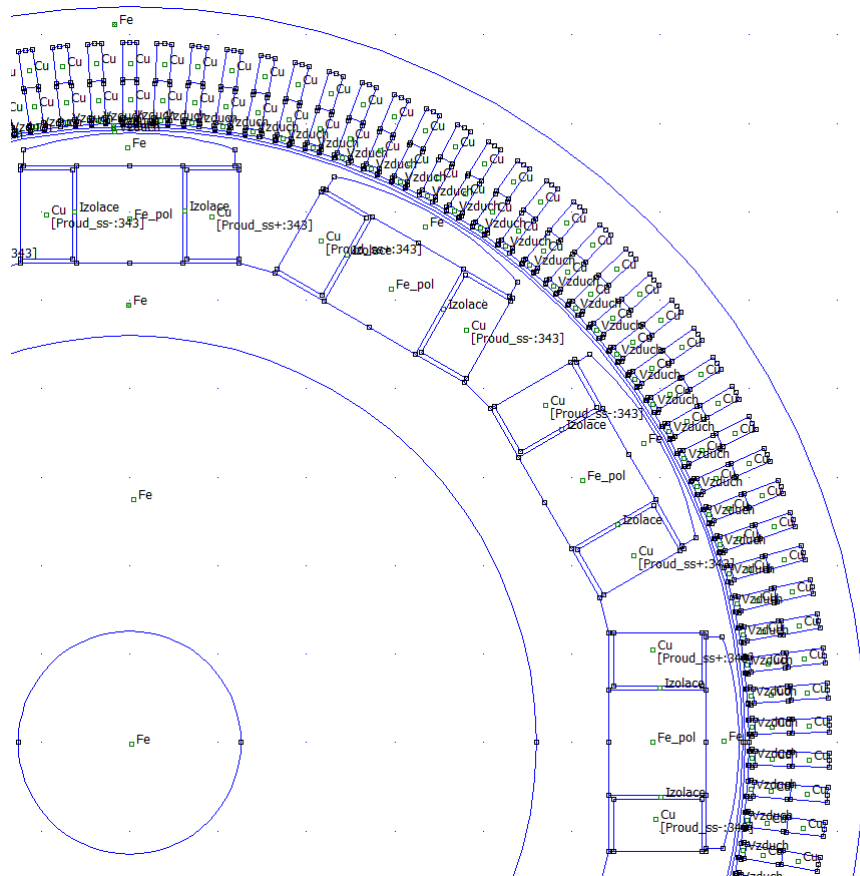
Obrázek 5.1: Momentová charakteristika zjištěná výpočtem

Z vyobrazené momentové charakteristiky je patrné, že jmenovitý moment leží přibližně v jedné třetině momentové charakteristiky, z čehož vyplývá přibližně trojnásobná momentová přetížitelnost stroje.

5.2 Výpočet v programu FEMM

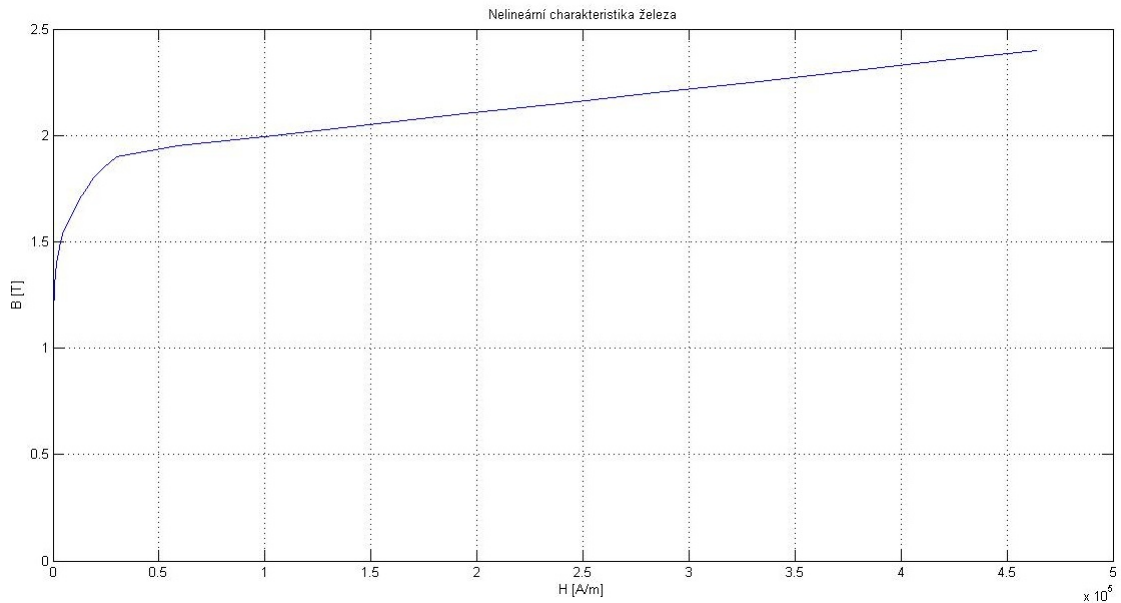
V prvním kroku, jsem vytvořil 2D náčrtek stroje v programu CAD. Ruční vkládání geometrie přímo do programu FEMM, by bylo vzhledem ke složitosti úlohy, příliš náročné. Před zahájením samotné práce v programu FEMM, bylo potřeba definovat typ úlohy. Zde byl vybrán "magnetický problém". Dalším krokem je definování základních parametrů programu pro výpočet. Zvolil jsem řešení v rovině, za hlavní rozměr jsem zvolil milimetry a hloubku úlohy odpovídající délce induktu.

Samotný 2D řez strojem, jsem doplnil o kružnici v ose vzduchové mezery, potřebnou pro zobrazení průběhu indukce ve vzduchové mezeře a pro výpočet momentové charakteristiky.



Obrázek 5.2: Část geometrie stroje

Dalším krokem bylo definování jednotlivých materiálů, vyskytujících se ve stroji. Úloha byla zjednodušena tím, že rotor je tvořen pouze magnetickým obvodem a budícím vinutím. Obě vinutí byla definována s vodivostí 43 MS/m. Magnetický obvod je složen z elektrotechnických plechů o tloušťce 0,5 mm, činitelem plnění 0,97 a nelineární magnetizační charakteristikou, viz. Obr. 5.3.

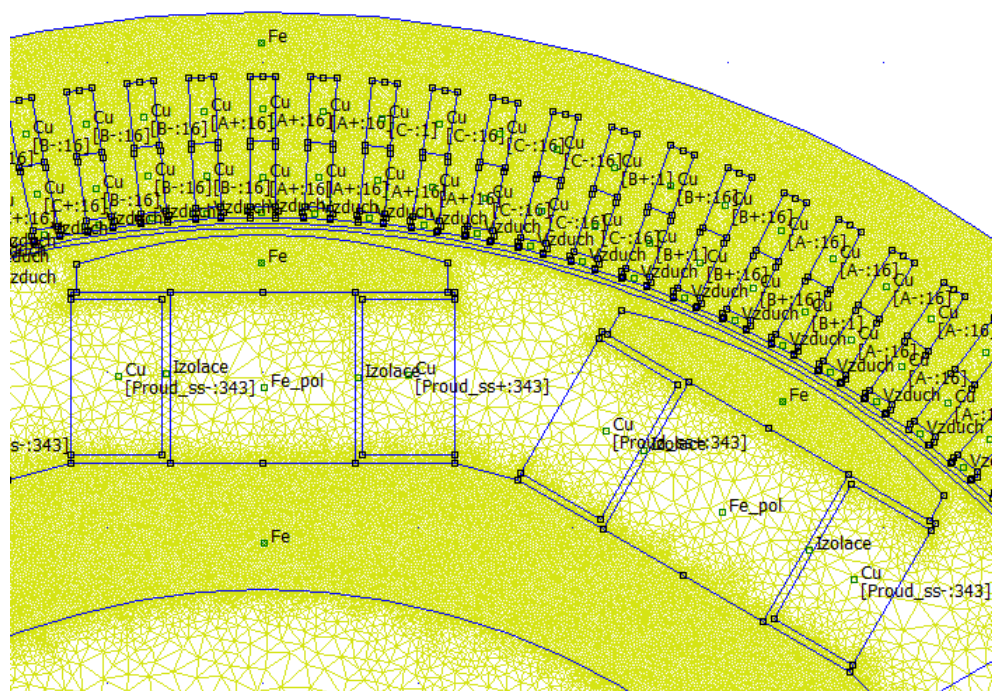


Obrázek 5.3: Nelineární charakteristika železa

Pro potřeby výpočtu jsem nastavil dvě polarity budícího proudu, vypočtené v první kapitole. Pro volbu okamžitých hodnot proudů statorového vinutí, pro každou ze tří fází v jednom časovém okamžiku, jsem zvolil okamžik, kdy proud ve fázi A, byl v maximu amplitudy a zbývající dvě fáze v polovině amplitud.

Proud v budícím vinutí byl vložen tak, aby se na pólech po obvodu stroje vždy střídal směr magnetického toku.

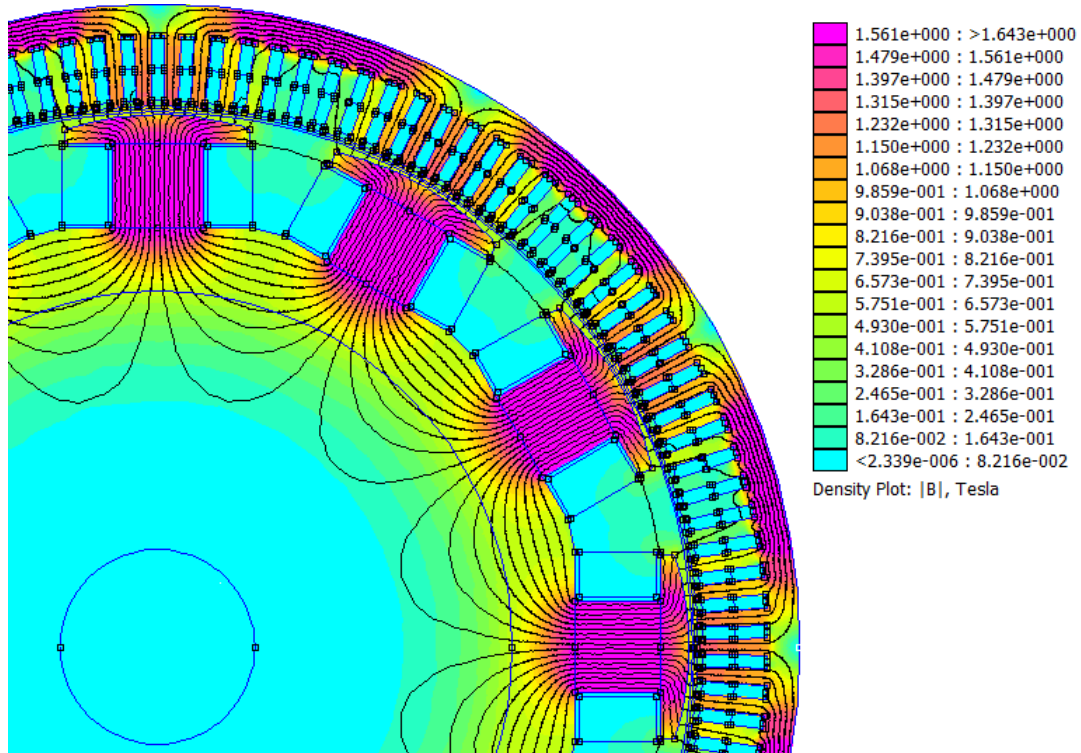
Před spuštěním vlastního výpočtu, je potřeba vytvořit odpovídající síť pro realizaci MKP. Čím je síť jemnější, tím je výpočet přesnější. Se zvyšující se přesností, roste i časová náročnost výpočtu. Z tohoto důvodu jsem zvýšil jemnost pouze ve vybraných oblastech. Jedná se prakticky o celý magnetický obvod, ale zejména jde o vzduchovou mezeru, drážkovou část a pólové nástavce viz. Obr.5.4.



Obrázek 5.4: Ukázka síťování modelu

5.3 Porovnání výsledků

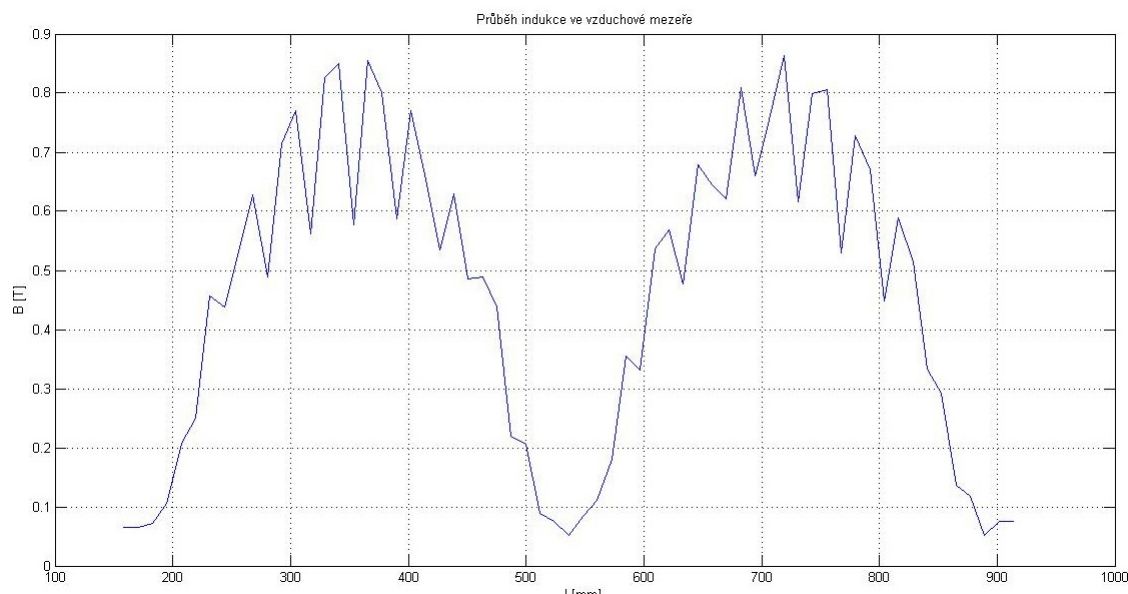
V další kapitole je provedeno porovnání několika vybraných hodnot výpočtu a výsledků simulace. Magnetické indukce ve stroji, jsou zobrazeny na Obr. 5.5. Porovnání hodnot magnetických indukcí ve stroji, je zobrazeno v tabulce č. 5.1. Průběh magnetické indukce ve vzduchové mezeře, je zobrazen na Obr. 5.6.



Obrázek 5.5: Indukce ve stroji

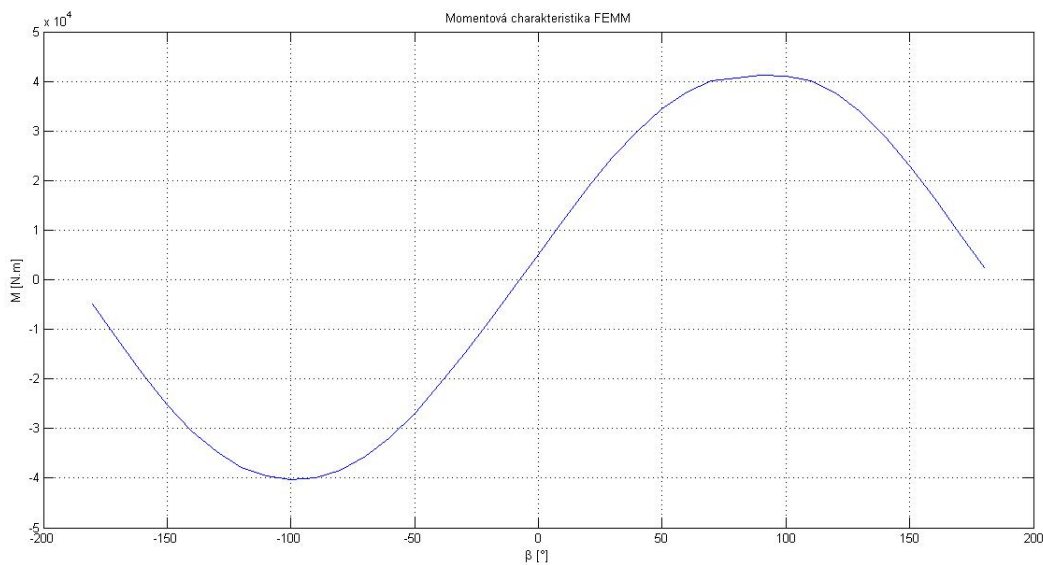
Veličina	Výpočet	Simulace
B_{δ}	0,8 T	Viz. Obr. 5.6
B_p	1,6 T	1,65 T
B_{js}	1,3 T	1,55 T
B_{jr}	1,1 T	1,07 T

Tabulka 5.1: Porovnání hodnot



Obrázek 5.6: Indukce ve vzduchové mezeře

K zjištění momentu stroje, bylo potřeba určit počet poloh rotoru, abych mohl určit moment stroje pro dané hodnoty zátěžného úhlu. Pro obvod stroje, bylo určeno 36 poloh, pro které jsem provedl výpočet. Pro otáčení rotoru, bylo využito možnosti práce se skupinami objektů. Všechny části rotoru, byli zahrnuti do jedné skupiny. V dalším kroku byla vybrána osa vzduchové mezery a spuštěn nástroj integrace, konkrétně funkce výpočtu stejnosměrného momentu. Poté jsem zapsal hodnotu momentu, rotor pootočil o požadovaný úhel, a opakoval až do požadovaného počtu hodnot. Nakonec jsem momentovou charakteristiku vykreslil do grafu, viz. Obr. 5.7.



Obrázek 5.7: Momentová charakteristika zjištěná simulací

Po srovnání charakteristiky vypočtené dříve (Obr.5.1) a charakteristiky vypočtené pomocí MKP (Obr.5.7), je zřejmé, že vypočtená charakteristika má o cca $15 \cdot 10^3$ N.m nižší maximální moment. Při výpočtu metodou konečných prvků, není uvažována změna účinníku a velikosti proudu statorem stroje. Charakteristiky lze tedy spolehlivě porovnat pouze z hlediska umístění jmenovitého momentu. Jmenovitý moment $18,335 \cdot 10^3$ N.m, je na obou charakteristikách s rezervou v říditelné oblasti.

Závěr

Cílem této práce, bylo provést elektromagnetický výpočet synchronního generátoru s vyniklými póly, provést výpočet oteplení induktu v ustáleném a přechodném stavu, a zjištěné hodnoty porovnat s hodnotami získanými pomocí metody konečných prvků. V první části diplomové práce, byl proveden návrh parametrů stroje, vinutí induktu, magnetického obvodu a budícího vinutí. Byly zde zjištěny ztráty, vypočtena účinnost, a navržen možný způsob přenosu budícího proudu na rotor. V druhé části byl navržen způsob upevnění pólu šrouby a jejich dimenzování. V dalších dvou kapitolách bylo určeno oteplení částí induktu, a navržena odpovídající třída izolace. Společně s výpočty byla vytvořena výkresová dokumentace, v podobě podélného a příčného řezu strojem.

Po výpočtu oteplení budící cívký a jednotlivých částí induktu v ustáleném stavu, byla zjištěna minimální možná třída izolace. U budícího vinutí odpovídá třídě F, a u induktu třídě E. Vzhledem k dnešním trendům, kdy se u točivých elektrických strojů využívá izolace třídy F již jako standard, byla doporučena izolace třídy F i pro indukt stroje a případné zvýšení proudové hustoty ve vodiči.

Pro ověření vybraných parametrů pomocí metody konečných prvků, byl sestaven zjednodušený dvourozměrný náčrt příčného řezu strojem. Byl vypočítán jmenovitý moment stroje 18335 N.m, a pomocí programu Matlab byla vykreslena momentová charakteristika v závislosti na zátěžném úhlu. V programu FEMM byla nadefinována úloha pro zjištění indukce ve vzduchové mezeře, a pro výpočet momentu. Magnetická indukce ve vzduchové mezeře vyšla výpočtem pomocí MKP obdobně, jako byla navržena. Průběh magnetické indukce vykazuje velký vliv drážkování statoru. Z porovnání indukce v jednotlivých částech stroje je patrné, že hodnoty velmi dobře odpovídají, vyjma indukce ve jhu statoru. Indukce ve jhu statoru je o 0,25 T větší, než předpokládaná. Rozdíl v indukci je pravděpodobně zapříčiněn nízkým jhem statoru. Jmenovitý moment je na momentové charakteristice, vypočítané pomocí programu FEMM, stále s rezervou v říditelné oblasti.

K zpřesnění návrhu, by bylo potřeba upřesnit parametry elektromagnetického návrhu na základě rozdílů mezi návrhem a hodnotami získanými MKP. Dalším důležitým parametrem, by byl ventilační návrh, který by lépe určil množství chladiva a jednotlivé součinitele přestupu tepla ve stroji, které byly pouze odhadnuty.

Seznam obrázků

1.1	Statorová drážka	17
1.2	Nákres čela vinutí	20
1.3	Budící cívka	30
3.1	Vymezený úsek induktu stroje	41
3.2	Náhradní schéma ustáleného tepelného stavu vymezeného úseku	44
4.1	Náhradní schéma přechodného tepelného stavu vymezeného úseku	49
4.2	Časové průběhy teplot uzlů	51
5.1	Momentová charakteristika zjištěná výpočtem	54
5.2	Část geometrie stroje	55
5.3	Nelineární charakteristika železa	56
5.4	Ukázka síťování modelu	57
5.5	Indukce ve stroji	58
5.6	Indukce ve vzduchové mezeře	59
5.7	Momentová charakteristika zjištěná simulací	60

Seznam tabulek

1.1	Návrh izolace a drážky	18
1.2	Výběh cívky z drážky v závislosti na napětí	20
1.3	Volba nesyčené synchronní reaktance	25
1.4	Vlastnosti elektrografitových kartáčů	34
3.1	Třídy izolací	41
3.2	Vypočtené hodnoty oteplení v ustáleném stavu	48
4.1	Ustálené hodnoty oteplení v přechodném stavu	52
5.1	Porovnání hodnot	58

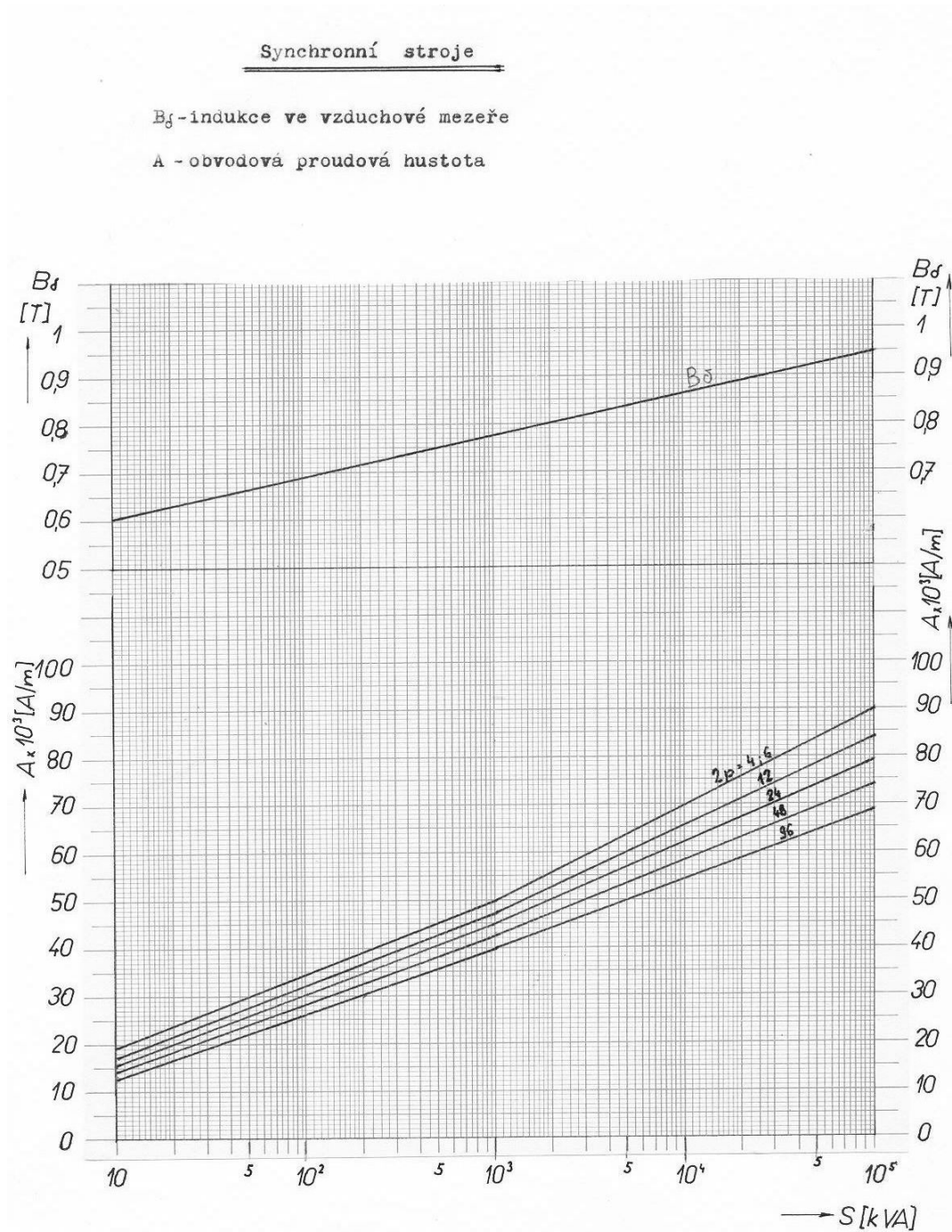
Reference

- [1] *KOPYLOV, Igor Petrovič. Stavba elektrických strojů.* Praha: SNTL/MIR, 1988.
- [2] *CIGÁNEK, Ladislav. Stavba elektrických strojů.* Praha: SNTL, 1958.
- [3] ČERVENÝ, Josef. **Stavba elektrických strojů - učební materiály předmětu KEV/SES1,2** Plzeň, 2010 [cit. 2016 – 05 – 15]. Dostupné z: <https://courseware.zcu.cz/wps/myportal/predmety/>. Výukový materiál. Západočeská univerzita v Plzni.
- [4] *FRANC, Jiří. Návrh synchronního těžního motoru [online].* Plzeň, 2014 [cit. 2016 – 05 – 15]. Dostupné z: <https://portal.zcu.cz/portal/studium/prohlizeni.html>. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [5] *FISĚR, Jiří. Návrh synchronního stroje s vyniklými póly [online].* Plzeň, 2010 [cit. 2016 – 05 – 15]. Dostupné z: <https://portal.zcu.cz/portal/studium/prohlizeni.html>. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [6] *ALTER, Jakub. Návrh synchronního hydrogenerátoru [online].* Plzeň, 2013 [cit. 2016 – 05 – 15]. Dostupné z: <https://portal.zcu.cz/portal/studium/prohlizeni.html>. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [7] *HRUŠKA, Karel. Teorie elektrických strojů- učební materiály předmětu KEV/TES2* Plzeň, 2015 [cit. 2016 – 05 – 15]. Dostupné z: <https://courseware.zcu.cz/wps/myportal/predmety/>. Výukový materiál. Západočeská univerzita v Plzni.

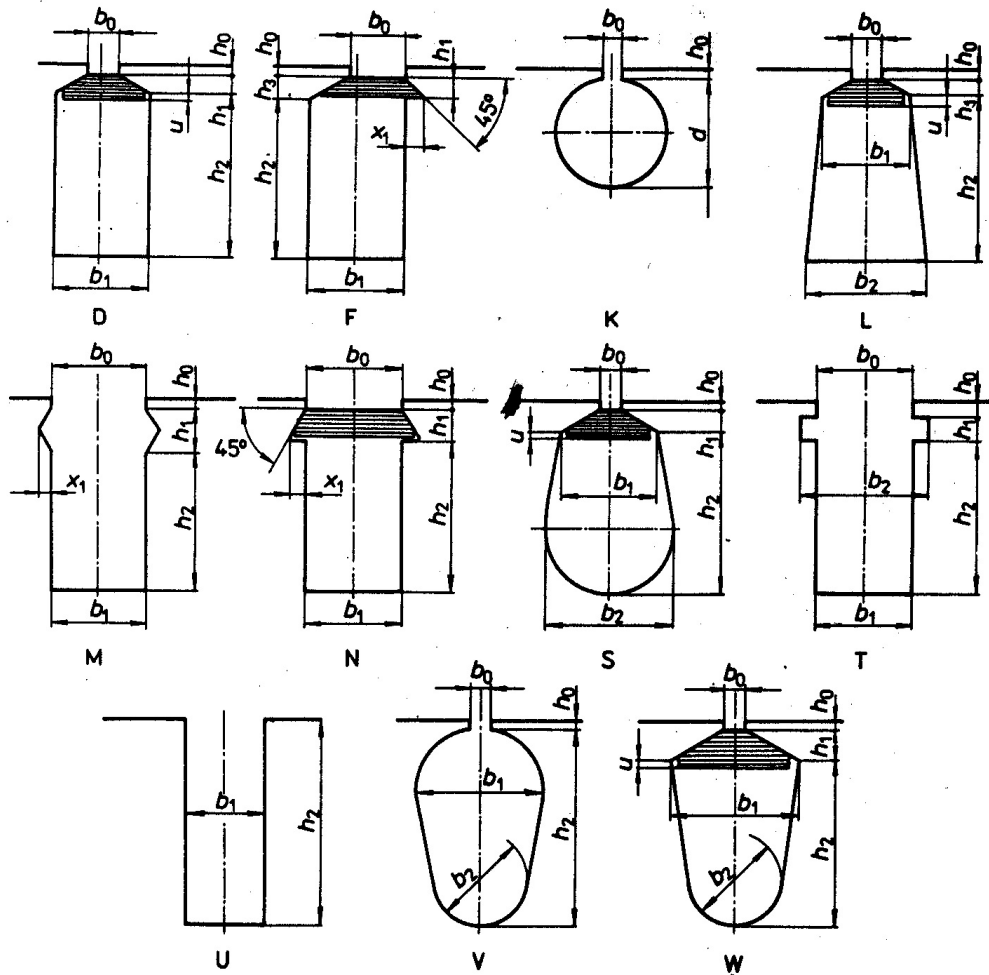
Přílohy

- Příloha č. 1:** Závislost proudové hustoty a magnetické indukce na zdánlivém výkonu
- Příloha č. 2:** Používané typy drážek
- Příloha č. 3:** Rozměry drážky typu M
- Příloha č. 4:** Rozměry normalizovaných měděných pasů
- Příloha č. 5:** Grafy určení činitele základní harmonické mg. indukce a tvaru mg. toku
- Příloha č. 6:** Grafy pro určení činitele magnetického napětí
- Příloha č. 7:** Graf pro určení Carterova činitele
- Příloha č. 8:** Nomogram k určení skutečné indukce v zubech induktu
- Příloha č. 9:** Magnetizační charakteristika dynamových plechů
- Příloha č. 10:** Graf pro určení činitele povrchových ztrát
- Příloha č. 11:** Doporučené rozměry kartáčů a jejich vlastnosti
- Příloha č. 12:** Charakteristika naprázdno
- Příloha č. 13:** Tabulka magnetizační charakteristiky zubové vrstvy
- Příloha č. 14:** Tabulka magnetizační charakteristiky celého magnetického obvodu
- Příloha č. 15:** Tingleyho schéma vinutí
- Příloha č. 16:** Příčný řez strojem
- Příloha č. 17:** Podélný řez strojem

Příloha č. 1: Závislost proudové hustoty a magnetické indukce na zdánlivém výkonu



Příloha č. 2: Používané typy drážek



Příloha č. 3: Rozměry drážky typu M

Drážka M					
b_1	h_0	h_1	x_1	λ_e	
5	0,7	3,5	1,2	0,704	
5,2		3,3	1,1	0,658	
5,5		3,6	1,2	0,664	
5,8		3,5	1,2	0,621	
6		3,3	1,1	0,581	
6,3		4,0	1,4	0,630	
6,6		3,6	1,25	0,580	
7		4,0	1,4	0,576	
7,3		3,6	1,25	0,517	
7,6		4,0	1,4	0,536	
8		4,0	1,4	0,522	
8,5		3,6	1,15	0,455	
9		4,0	1,4	0,462	
9,5		3,6	1,15	0,412	
10				0,420	
10,5				0,402	
11				0,586	
11,5			4,0	1,4	0,371
12					0,356
12,5					0,343
13				0,331	
13,5	1,0			0,404	
14				0,390	
14,5				0,372	
15			5,0	1,65	0,366
15,5					0,355
16					0,345
16,5					0,392
17					0,391
17,5					0,368
18			6,0	1,6	0,362
18,5					0,352
19					0,344
19,5				0,461	
20				0,450	
20,5				0,441	
21				0,430	
21,5				0,415	
22				0,405	
22,5				0,397	
23				0,389	
23,5		9,0	2,45	0,388	
24				0,382	
25				0,367	
26				0,354	
27				0,342	
28				0,322	
30				0,310	
32				0,292	

Príloha č. 4: Rozměry normalizovaných měděných pásů

Výběr z ČSN 42 8808-1969 Rozměry měděných pásů

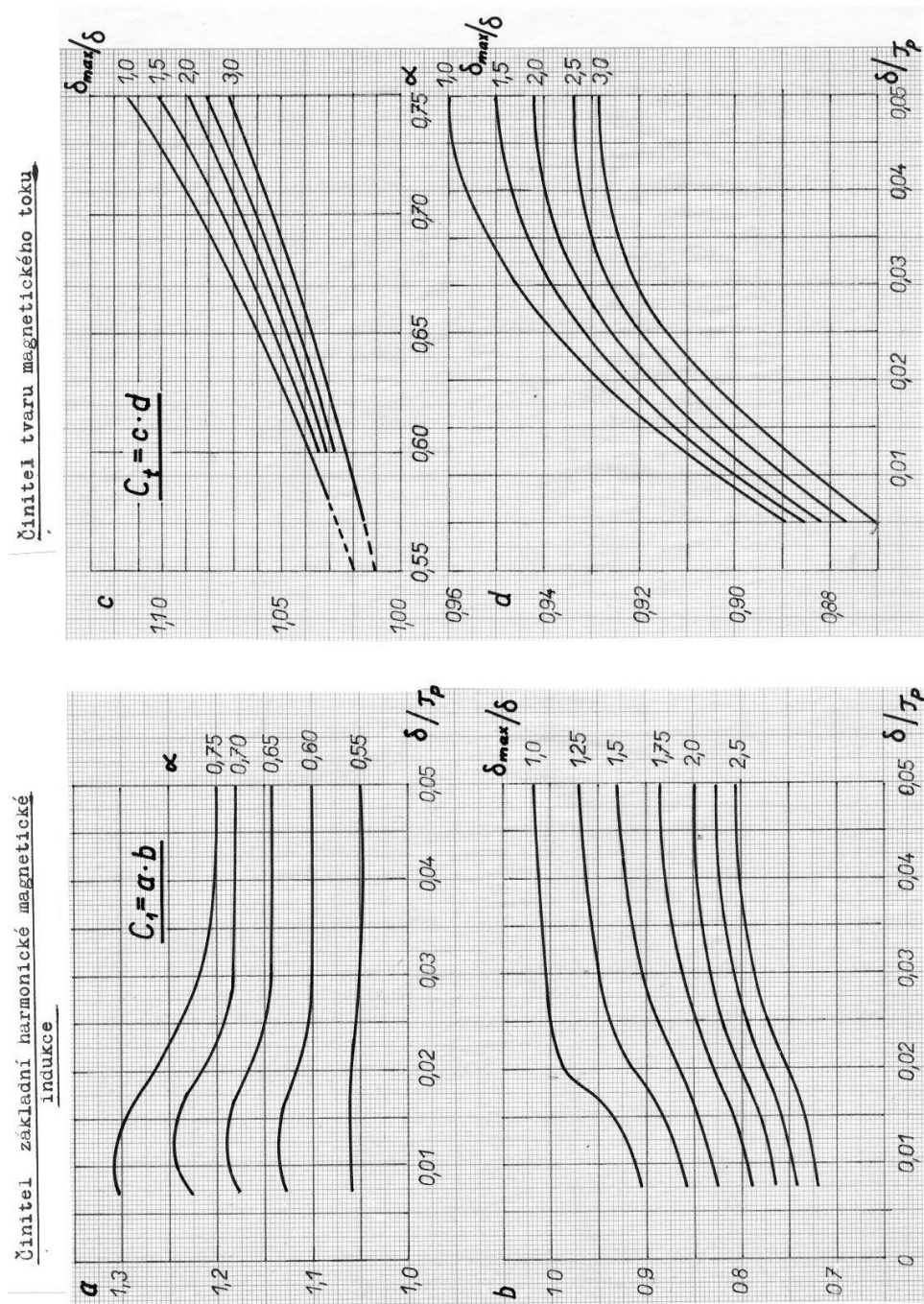
Jmenovitá tloušťka [mm]	0,8	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,8	2,0	2,2	2,5	2,8
0,30	1,8	1,3	1,66										
	2,0	1,46	1,86	2,18	2,58	2,58	2,69	2,89					
	2,2	1,62	2,06	2,42	2,64	2,86	2,99	3,21					
	2,5	1,86	2,36	2,78	3,03	3,28	3,44	3,69	4,19	4,45			
	2,8	2,1	2,66	2,94	3,14	3,42	3,70	3,89	4,17	4,73	5,05		
0,35	3,0	2,26	2,86	3,16	3,38	3,68	3,98	4,19	4,49	5,09	5,45	6,05	6,9
	3,5	2,66	3,36	3,71	3,98	4,33	4,68	4,94	5,29	5,99	6,45	7,15	8,2
	4,0	3,06	3,86	4,26	4,58	4,98	5,38	5,69	6,09	6,89	7,45	8,25	9,45
	4,5	3,46	4,36	4,81	5,18	5,63	6,08	6,44	6,89	7,79	8,45	9,35	10,7
	5,0	3,86	4,86	5,36	5,78	6,28	6,78	7,19	7,69	8,69	9,45	10,4	12,0
	5,5	4,26	5,36	5,91	6,38	6,93	7,48	7,94	8,49	9,59	10,4	11,5	13,2
	6,0	4,66	5,86	6,46	6,98	7,58	8,18	8,69	9,29	10,5	11,4	12,6	14,5
0,40	(6,5)	5,06	6,36	7,01	7,58	8,23	8,88	9,44	10,1	11,4	12,4	13,7	15,6
	7	5,46	6,86	7,56	8,18	8,88	9,58	10,2	10,9	12,3	13,4	14,8	17,0
	8	6,26	7,86	8,66	9,38	10,2	11,0	11,7	12,5	14,1	15,4	17,0	19,5
	9	7,06	8,86	10,6	11,5	12,4	13,2	14,1	15,9	17,4	19,2	22,0	24,6
	10	7,86	9,86	11,8	12,8	13,8	14,7	15,7	17,7	19,4	21,4	24,5	27,4
	11	8,66	10,9	13,0	14,1	15,2	16,2	17,3	19,5	21,4	23,6	27,0	30,2
	12	9,46	11,9	14,2	15,4	16,6	17,7	18,9	21,3	23,4	25,8	29,5	33,0
0,50	(13)								23,1	25,4	28,0	32,0	35,8
	14								20,7	22,1	24,9	27,4	30,2
	(15)								26,7	29,4	32,4	37,0	41,4
	16								28,5	31,4	34,6	39,5	44,2
	18								35,4	39,0	44,5	49,8	
	20								39,4	43,4	49,5	55,4	
0,65	25											62,0	69,4
	30											74,5	83,4

Rozměry v závorkách neplatí pro nové konstrukce.

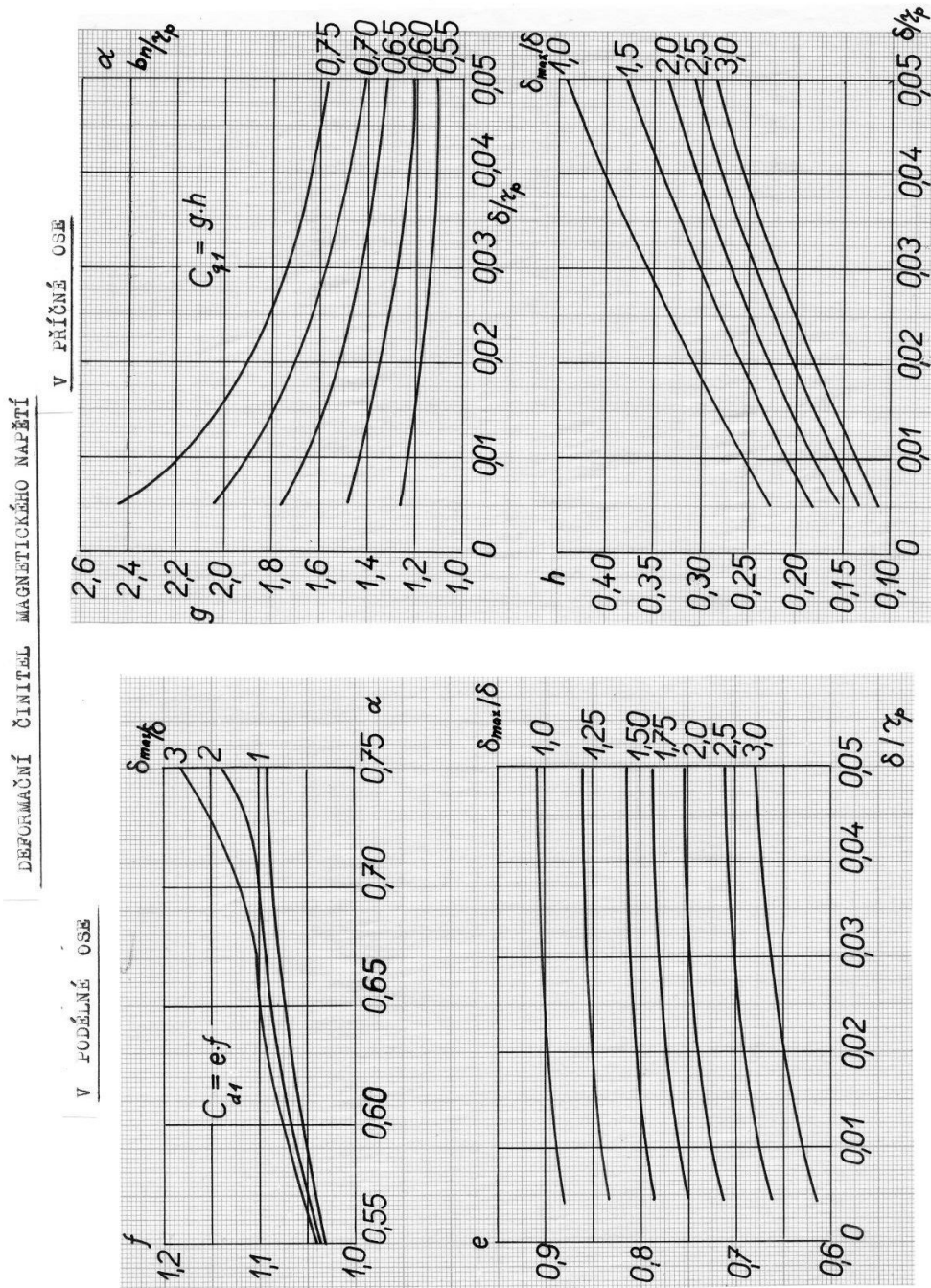
3,0	(3,2)	3,5	4	4,5	5	5,5	6	(6,5)	7	8	9	10
11,4												
12,9		13,5										
14,4		16,6	19,1									
15,9		18,4	21,1									
17,4		20,1	23,1									
18,9	19,9	21,9	25,1									
20,4	21,4	23,6	27,1	30,3	33,8							
23,4	24,7	27,1	31,1	34,8	38,8	42,8	46,8					
26,4	27,9	30,6	35,1	39,3	43,8	48,3	52,5					
29,4	31,1	34,1	39,1	43,8	48,8	53,8	58,5					
32,4	34,3	37,6	43,1	48,3	53,8	59,3	64,5					
35,4	37,5	41,1	47,1	52,8	58,8	64,8	70,5		93,8			
38,4	40,7	44,6							101,8			
41,4	43,9	48,1	55,1	61,8	68,8	75,8	82,5		109,8			
44,4	47,1	51,6	59,1	66,3					117,8			
47,4	50,3	55,1	63,1	70,8	78,8	86,8	94,5	102,5	110,5	125,8		
53,4	56,7	62,1	71,1	79,8	88,8	97,8	106,5	115,5	124,5	141,8	159,8	177,8
59,4	63,1	69,1	79,1	88,8	98,8	108,8	118,8	128,8	138,5	157,8	178,8	197,8
74,4	79,1	86,6	99,1	111,3	123,8	136,3	148,5	161,0	173,5	197,8	222,8	247,8
89,4	95,1	104,1	119,1	133,8	148,8	163,8	178,5	193,5	208,5	237,8	267,8	297,8

Příklad: pás 3,5 x 6 má průřez 20,1 mm²; rozměry izolovaného pásu jsou 3,9 x 6,4 mm.

Příloha č. 5: Grafy určení činitele základní harmonické mg. indukce a tvaru mg. toku

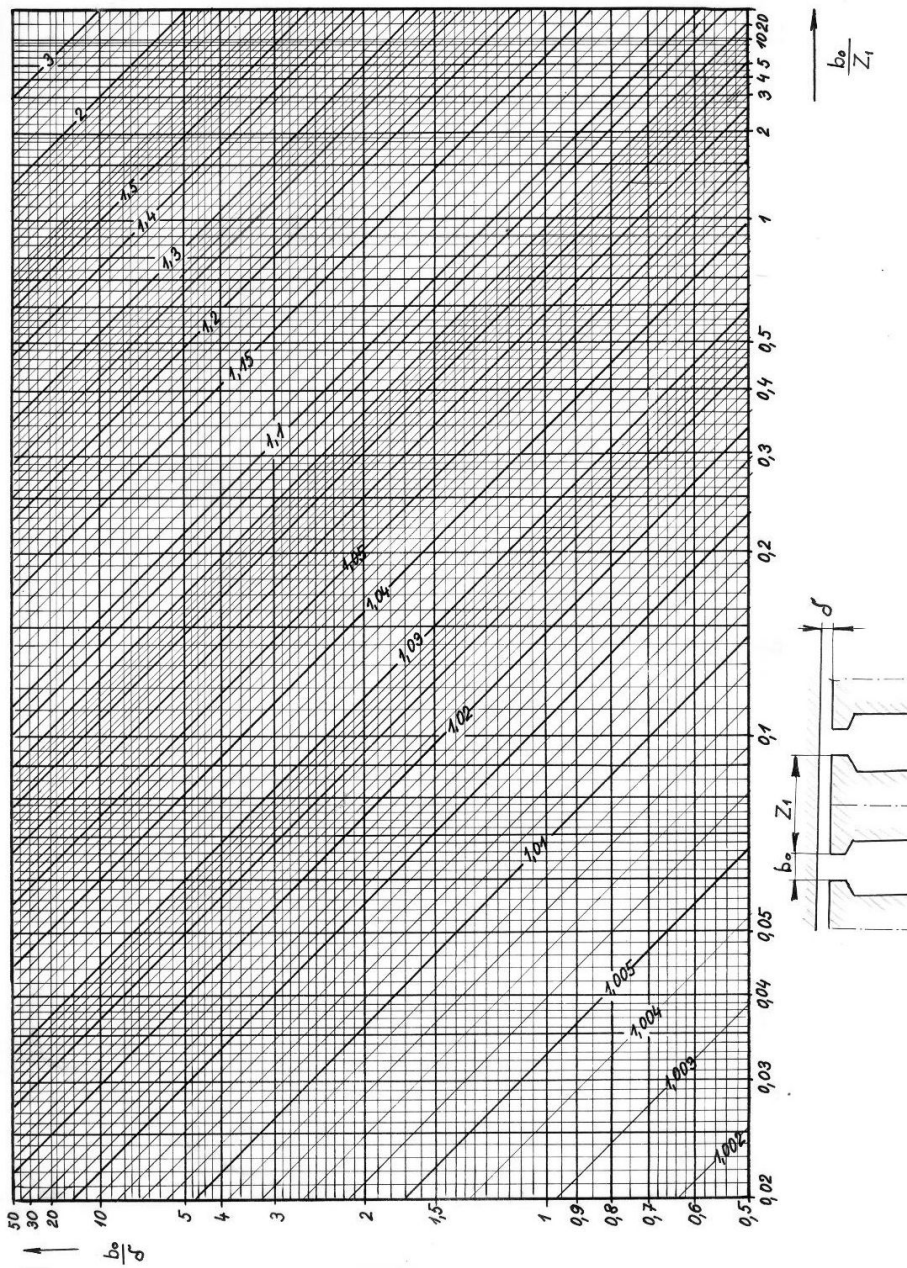


Příloha č. 6: Grafy pro určení činitele magnetického napětí

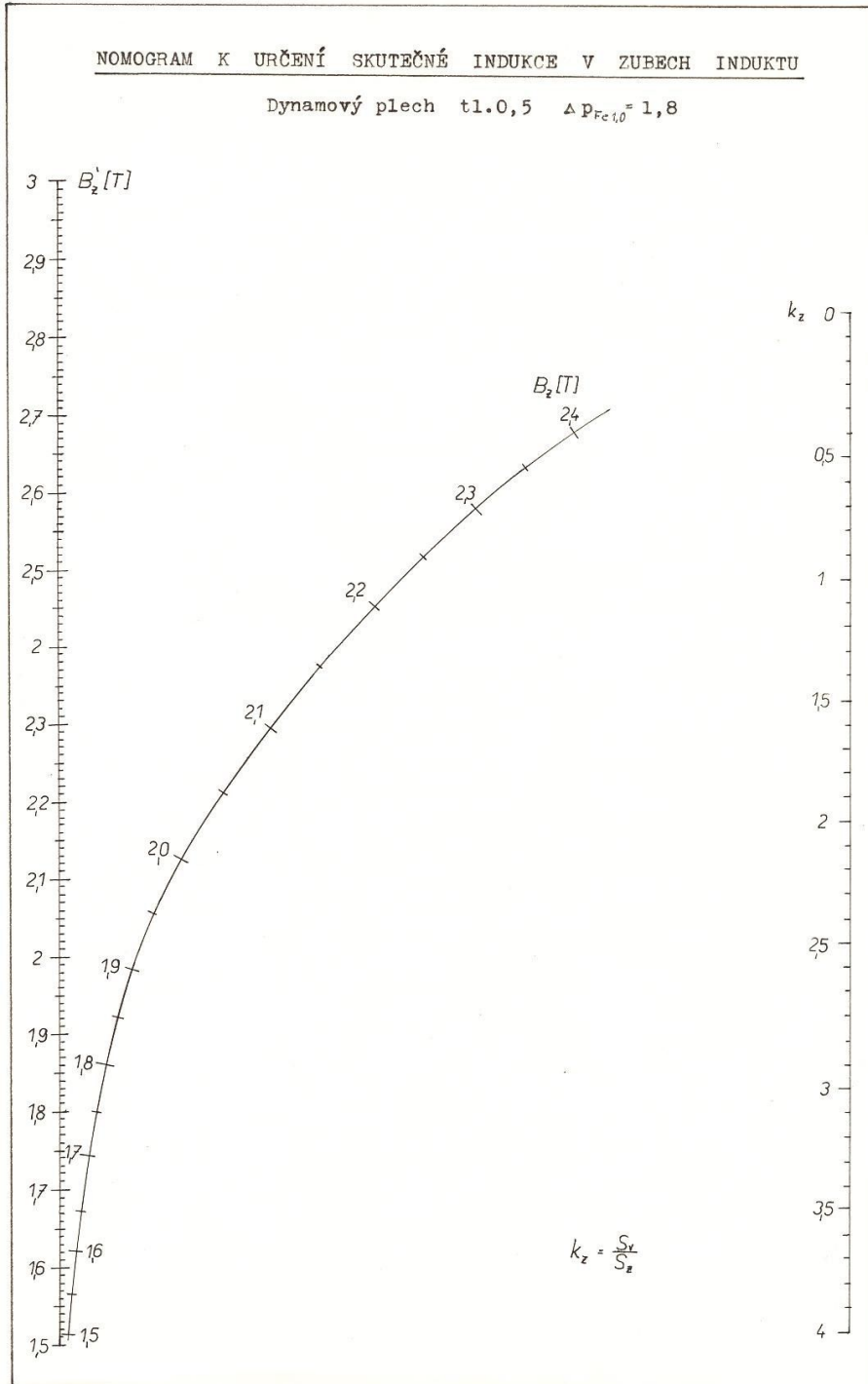


Příloha č. 7: Graf pro určení Carterova činitele

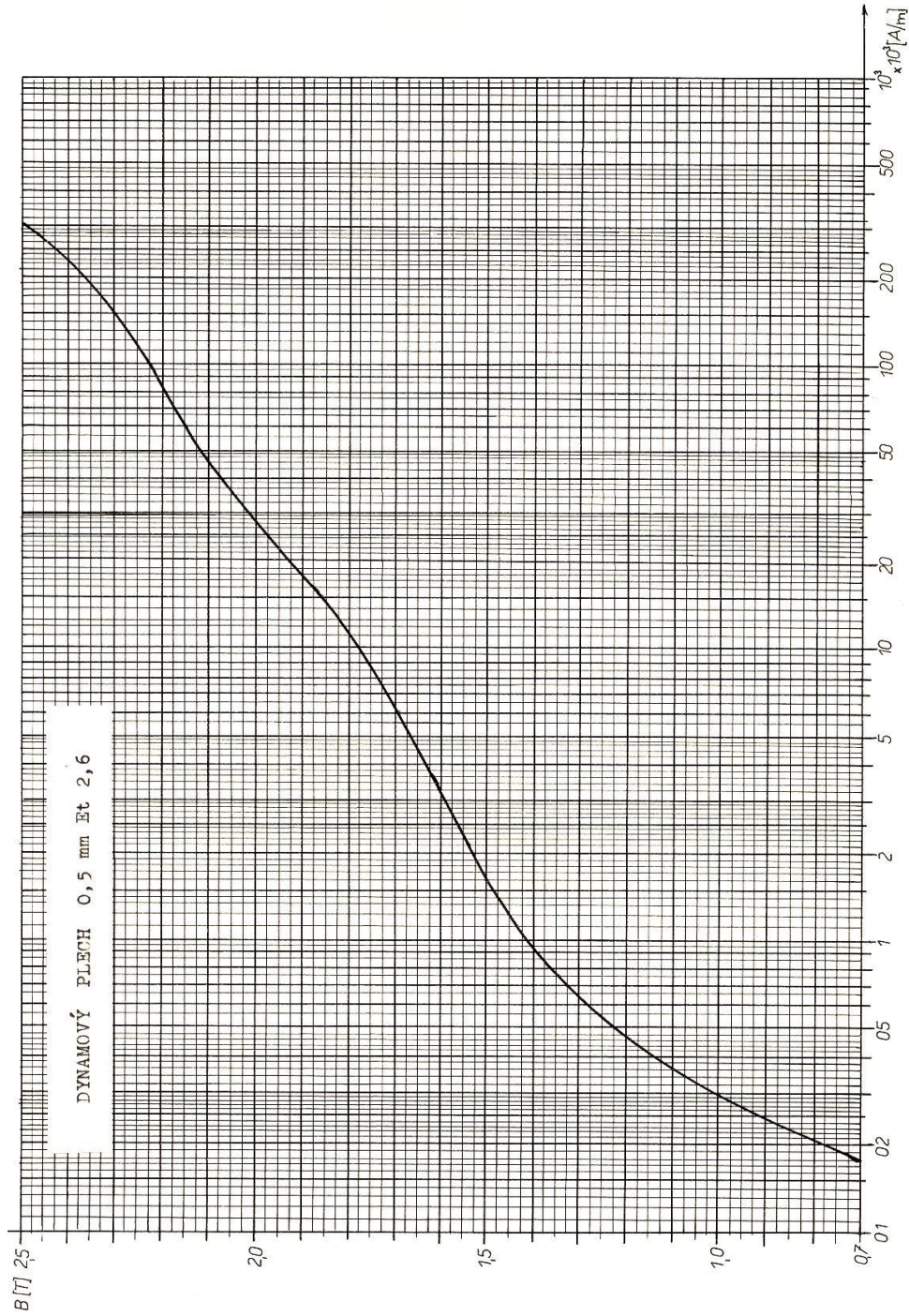
CARTERŮV ČINTEL NA DRÁŽKOVÁNÍ



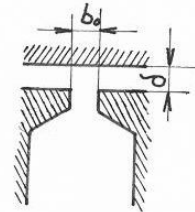
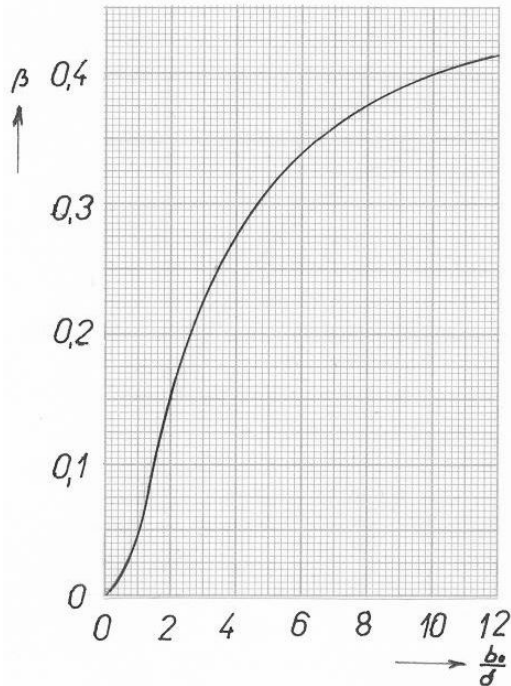
Příloha č. 8: Nomogram k určení skutečné indukce v zubech induktu



Příloha č. 9: Magnetizační charakteristika dynamových plechů



Příloha č. 10: Graf pro určení činitele povrchových ztrát



- $k_p = 23,3$ kovaná ocel
- 17,5 litina
- 8,6 plech 2 mm
- 2,8 plech 0,5 mm

$k_{p, \beta}$ - činitelé povrchových ztrát v pólovém nastavci

Činitel mechanických ztrát :

A = 1,1 ÷ 1,5 pomalub. alternátor

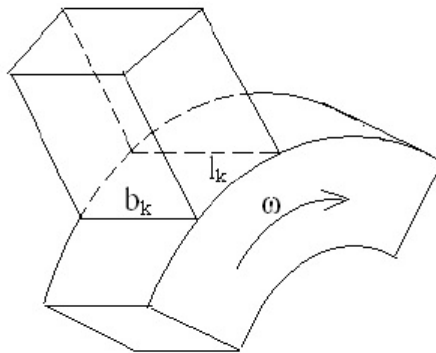
0,8 ÷ 1,1 rychloběžné alt.

0,8 ÷ 1 turboalternátor

Příloha č. 11: Doporučené rozměry kartáčů a jejich vlastnosti

Doporučené rozměry kartáčů

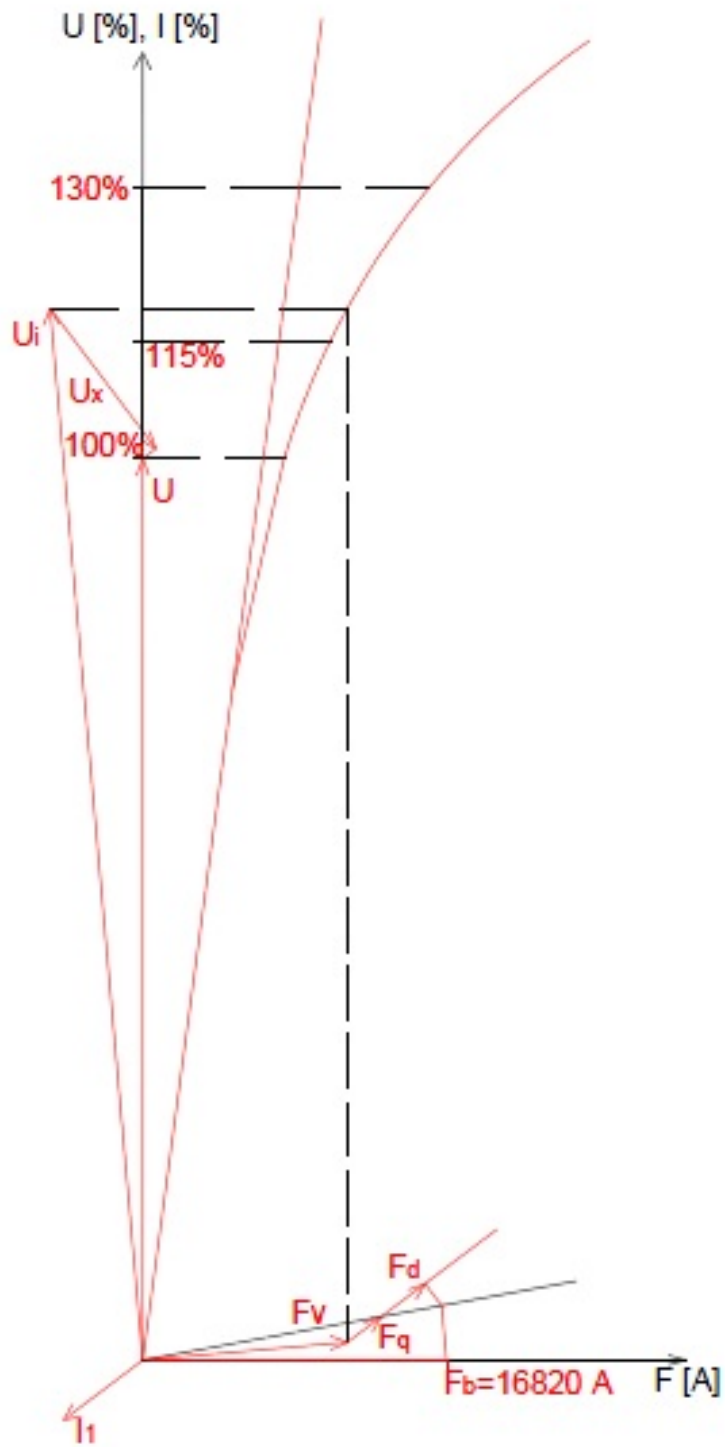
[mm]	Rozměr ve směru osy b_k									
	10	12,5	16	20	25	32	40	50	64	80
Tečný směr l_k	4	4	5	5	5	5	5	25	12,5	40
		5	6,3	6,3	6,3	6,3	6,3	40	20	
		6,3	8	8	8	8	8	50	25	
				10	10	10	10		32	
					12,5	12,5	12,5		50	
					16	16	16			
					20	20	20			
						25	25			
						32	32			
							40			



Kartáče pro kroužky – vlastnosti

Materiál	Označení	Proudová hustota [A/cm ²]	Max. obvodová rychlost [m/s]	Měrný tlak [kPa]	Celkový úbytek napětí [V]
Grafit	RGE	8	75	14	3,8
Elektrografit	EK24	10	40	18	2,1
Kovografit	K11	18	20	22	0,5
	K31	15	25	22	1,1
	K75	12	30	20	1,4
	O67	16	30	20	1,9
	MG 440	18	20	20	0,5

Příloha č. 12: Charakteristika naprázdno



Příloha č. 13: Tabulka magnetizační charakteristiky zubové vrstvy

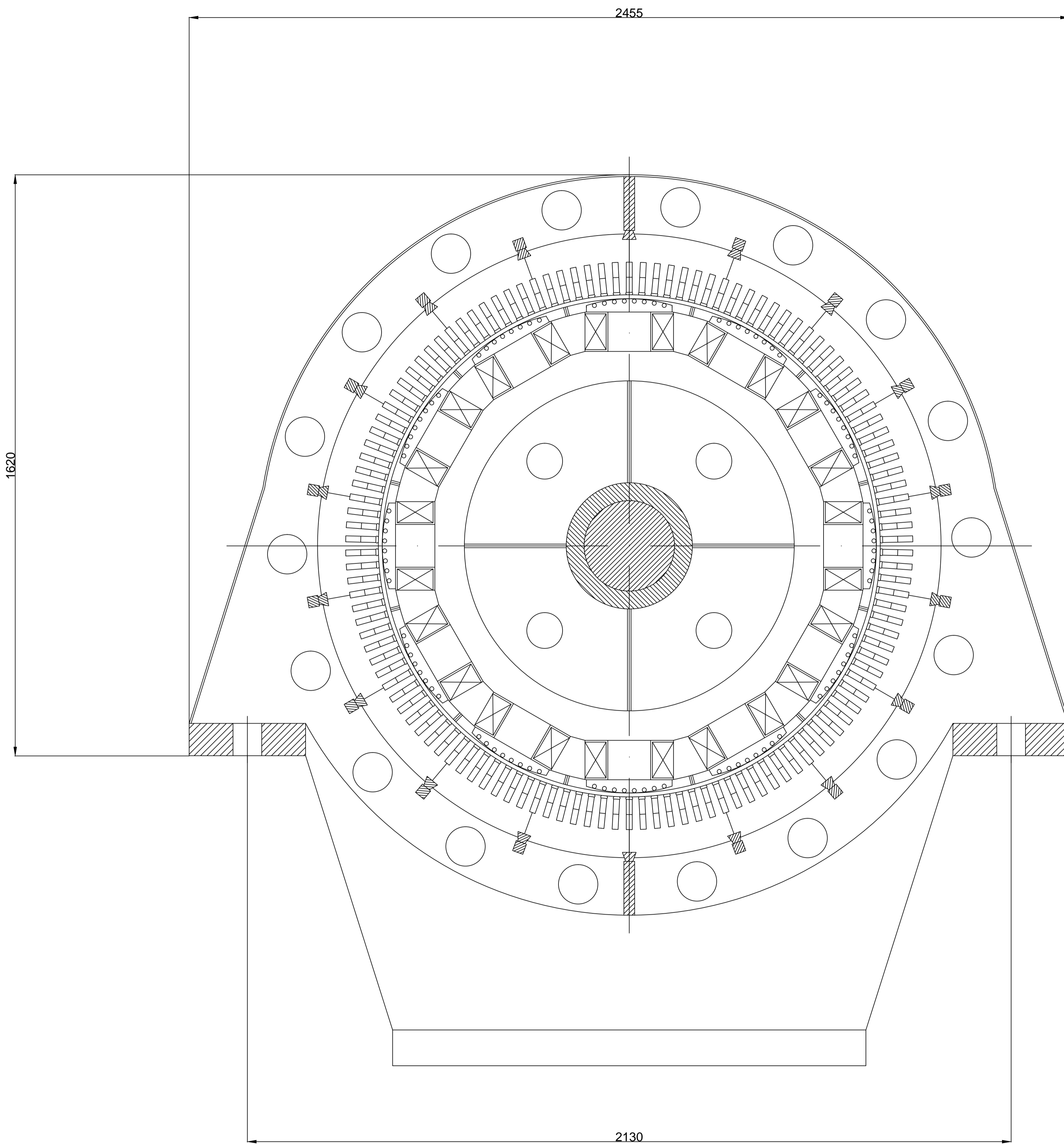
Φ	D ₁	D ₂	D ₃	t _{d1}	t _{d2}	t _{d3}	z ₁	z ₂	z ₃	k _{z1}	k _{z2}	k _{z3}	1,06	B' _{z1}	B' _{z2}	B' _{z3}	1,65	B _{z1}	B _{z2}	B _{z3}	1,68	H _{z1}	H _{z2}	H _{z3}	6500	3100	2400	H _{zstř}	3550,00	F _z	323,05
0,0523										0,0184	0,0207	0,0229	0,06	B' _{z1}	B' _{z2}	B' _{z3}	1,90	B _{z1}	B _{z2}	B _{z3}	1,875	H _{z1}	H _{z2}	H _{z3}	17900	10700	7000	H _{zstř}	11283,33	F _z	1026,78
														B' _{z1}	B' _{z2}	B' _{z3}	1,90	B _{z1}	B _{z2}	B _{z3}	1,875	H _{z1}	H _{z2}	H _{z3}	17900	10700	7000	H _{zstř}	11283,33	F _z	1026,78
														B' _{z1}	B' _{z2}	B' _{z3}	1,90	B _{z1}	B _{z2}	B _{z3}	1,875	H _{z1}	H _{z2}	H _{z3}	17900	10700	7000	H _{zstř}	11283,33	F _z	1026,78
														B' _{z1}	B' _{z2}	B' _{z3}	1,90	B _{z1}	B _{z2}	B _{z3}	1,875	H _{z1}	H _{z2}	H _{z3}	17900	10700	7000	H _{zstř}	11283,33	F _z	1026,78
														B' _{z1}	B' _{z2}	B' _{z3}	1,90	B _{z1}	B _{z2}	B _{z3}	1,875	H _{z1}	H _{z2}	H _{z3}	17900	10700	7000	H _{zstř}	11283,33	F _z	1026,78
														B' _{z1}	B' _{z2}	B' _{z3}	1,90	B _{z1}	B _{z2}	B _{z3}	1,875	H _{z1}	H _{z2}	H _{z3}	17900	10700	7000	H _{zstř}	11283,33	F _z	1026,78
0,0523										0,0184	0,0207	0,0229	0,07	B' _{z1}	B' _{z2}	B' _{z3}	2,14	B _{z1}	B _{z2}	B _{z3}	2,075	H _{z1}	H _{z2}	H _{z3}	33000	27500	21500	H _{zstř}	27416,67	F _z	2494,92
														B' _{z1}	B' _{z2}	B' _{z3}	2,14	B _{z1}	B _{z2}	B _{z3}	2,075	H _{z1}	H _{z2}	H _{z3}	33000	27500	21500	H _{zstř}	27416,67	F _z	2494,92
														B' _{z1}	B' _{z2}	B' _{z3}	2,14	B _{z1}	B _{z2}	B _{z3}	2,075	H _{z1}	H _{z2}	H _{z3}	33000	27500	21500	H _{zstř}	27416,67	F _z	2494,92
														B' _{z1}	B' _{z2}	B' _{z3}	2,14	B _{z1}	B _{z2}	B _{z3}	2,075	H _{z1}	H _{z2}	H _{z3}	33000	27500	21500	H _{zstř}	27416,67	F _z	2494,92
														B' _{z1}	B' _{z2}	B' _{z3}	2,14	B _{z1}	B _{z2}	B _{z3}	2,075	H _{z1}	H _{z2}	H _{z3}	33000	27500	21500	H _{zstř}	27416,67	F _z	2494,92
														B' _{z1}	B' _{z2}	B' _{z3}	2,14	B _{z1}	B _{z2}	B _{z3}	2,075	H _{z1}	H _{z2}	H _{z3}	33000	27500	21500	H _{zstř}	27416,67	F _z	2494,92

Příloha č. 14: Tabulka magnetizační charakteristiky celého magnetického obvodu

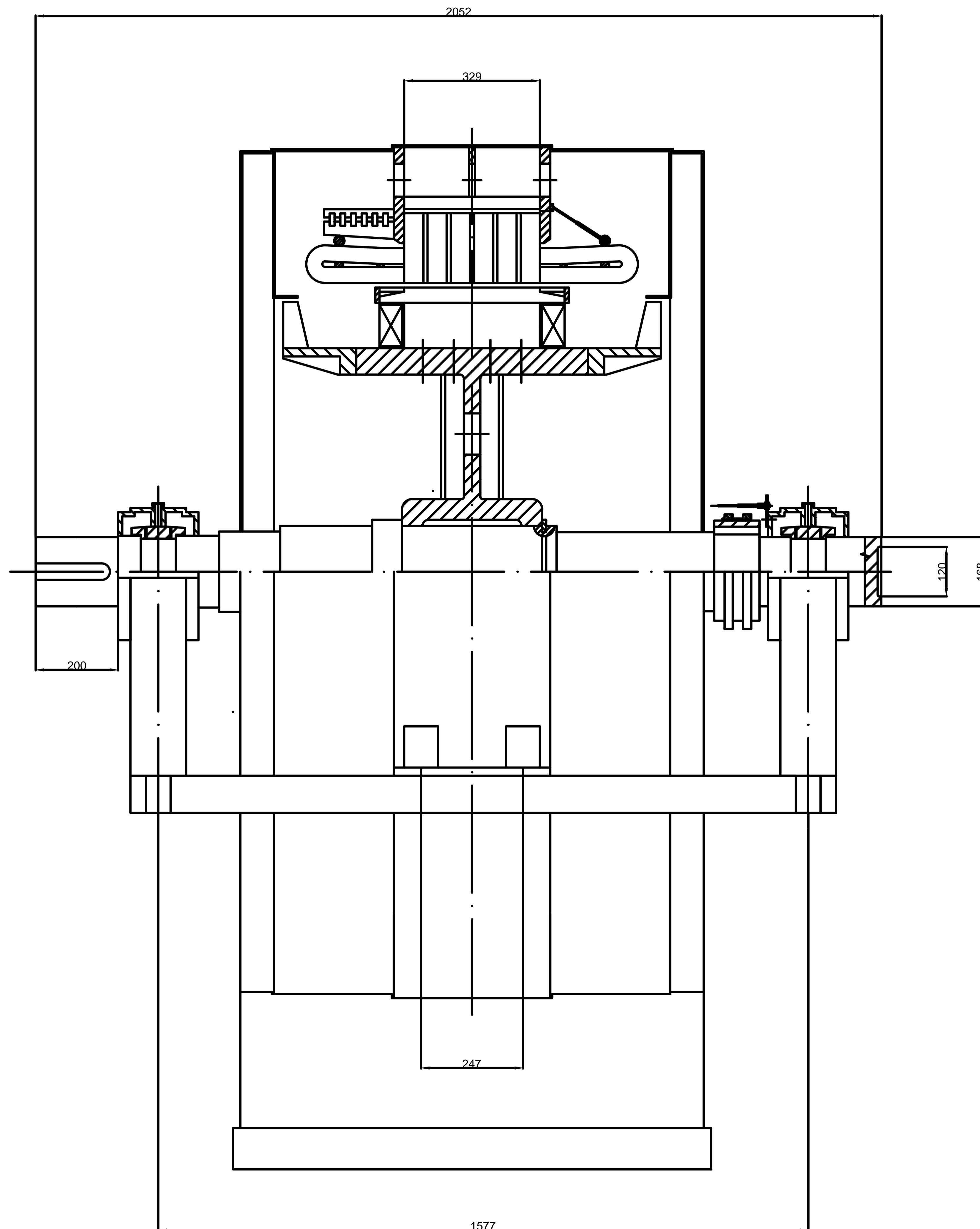
		Φ			$k1 \Phi$			$k2 \Phi$		
		B	H	F	B	H	F	B	H	F
Vzd. Mezera	0,011	0,8		6671			7671			8672
hlava	B'z1	1,65	6500		1,90	17900		2,14	33000	
	Bz1	1,68			1,88			2,08		
zuby	B'z2	1,56	3100		1,80	10700		2,03	27500	
	Bz2	1,54			1,79			2,00		
pata	B'z3	1,49	2400		1,72	7000		1,94	21500	
	Bz3	1,49			1,70			1,92		
stř hodn	hz		3550	323		11283	1027		27417	2495
jádro induktu	ls	1,30	1100	251	1,50	2600	593	1,69	6900	1573,2
	$\Sigma F = F\delta + Fz + Fji$		7244			9291			12740	
Pól	lp	1,60	3400	500	1,68	6500	956	1,90	19400	2852
Jho	lr	1,10	600	84	1,265	950	133	1,43	1800	252
$\Sigma F = Fp + Fj$			584			1089			3104	
$\Sigma F = F\delta + Fz + Fji + Fp + Fj$			7828			10379			15844	

Příloha č. 15: Tingleyho schéma vinutí

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



	Příloha č.16	
	Příčný řez	
	Novák, Petr	15.5.2016



	Příloha č.17	
	Podélný řez	
	Novák, Petr	15.5.2016