

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Závislost účinnosti synchronního stroje na jeho zatížení

**Vedoucí práce: Doc. Ing. Josef Červený, CSc.
Autor: Bc. Jiří Ponert**

2015

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

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jiří PONERT**
Osobní číslo: **E13N0046P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Průmyslová elektronika a elektromechanika**
Název tématu: **Závislost účinnosti synchronního stroje na jeho zatížení**
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 synchronního generátoru těchto parametrů: $S = 2500$ kVA; $U = 10500\text{V}$; $n = 750$ ot/min.; $\cos \phi = 0,8$; $m = 3$; $X_d = 137\%$.
2. Metodou náhradních tepelných obvodů proveďte výpočet oteplení induktu a pólové cívky.
3. Určete závislost ztrát a účinnosti stroje na zatížení a účinníku s respektováním odpovídajícího oteplení výše uvedených částí stroje.
4. Nakreslete schématicky konstrukční uspořádání stroje v podélné a příčné poloze.

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

1. Cigánek L. : Stavba elektrických strojů, SNTL 1958.
2. Kopylov I.P. : Stavba elektrických strojů, SNTL 1988.
3. Červený J.: Stavba elektrických strojů, portál ZCU, Courseware 2012.
4. Červený J.: Postup při elektromagnetickém návrhu synchronního stroje, portál ZCU, Courseware 2012.

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Josef Červený, CSc.**
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

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


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




Prof. Ing. Václav Kús, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

Anotace

Předmětem této diplomové práce je provést elektromagnetický návrh synchronního generátoru daných parametrů, dále určit oteplení induktu a pólové cívky pomocí metody náhradních tepelných obvodů a nakreslit podélný a příčný řez stroje.

Cílem této práce je určit závislost účinnosti a ztrát na zatížení a účinníku s respektováním odpovídajícího oteplení výše uvedených částí stroje.

Klíčová slova

Synchronní generátor, elektromagnetický návrh, stator, vinutí, rotor, póly, charakteristika naprázdno, zatěžovací charakteristika, oteplení, náhradní tepelné obvody, ztráty, účinnost, účinník, příčný a podélný řez strojem

Annotation

The subject of this diploma thesis is to perform an electromagnetic design of a synchronous generator of given parameters, determine the temperature rise of stator and pole windings using equivalent thermal circuits and draw longitudinal and cross section of the machine.

The aim of this work is to determine the dependence of efficiency and losses on load and power factor with respect to the corresponding temperature rise of the aforementioned parts of the machine.

Key words

Synchronous generator, electromagnetic design, stator winding, rotor poles, open circuit characteristic, load characteristic, warming, equivalent thermal circuits, losses, efficiency, power factor, transverse and longitudinal section of the machine

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 4. 5. 2015

.....

Jméno a příjmení

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Doc. Ing. Josefu Červenému, CSc. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

SEZNAM V PRÁCI POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
1 ÚVOD.....	14
2 ELEKTROMAGNETICKÝ NÁVRH STROJE.....	15
2.1 Zadané parametry	15
2.2 Výpočet základních parametrů	15
2.3 Návrh vinutí induktu (statoru)	17
2.3.1 Parametry vinutí	18
2.3.2 Výpočet činitelů vinutí	20
2.3.3 Návrh drážky	22
2.3.4 Odpor a rozptylová reaktance statorového vinutí.....	25
2.4 Návrh magnetického obvodu.....	30
2.4.1 Určení magnetického toku.....	30
2.4.2 Velikost vzduchové mezery	30
2.4.3 Magnetické napětí reakce kotvy	31
2.4.4 Dimenzování magnetického obvodu	32
2.4.5 Charakteristika naprázdno	33
2.5 Návrh budícího vinutí.....	37
2.5.1 Orientační výpočet oteplení pólové cívky	40
2.6 Kroužky a kartáče.....	41
2.7 Výpočet celkových ztrát	42
2.8 Mezipólový rozptyl	45
2.8.1 Analytická metoda.....	46
2.8.2 Metoda konečných prvků	48

2.8.3 Analytická verze upravená pro potřeby porovnání s MKP	50
2.9 Výpočet tlumícího (rozběhového) vinutí.....	51
3 NÁVRH PŘIPEVNĚNÍ PÓLŮ STROJE	53
3.1 Připevnění pomocí kladiva	54
4 VÝPOČET OTEPLENÍ STATORU A PÓLOVÉ CÍVKY	56
4.1 Tepelné obvody	56
4.2 Výpočet oteplení induktu	57
4.2.1 Výpočet oteplení v drážkové části vinutí	57
4.2.2 Výpočet oteplení čel vinutí.....	66
4.3 Výpočet oteplení jádrové (pólové) cívky	68
4.3.1 Určení náhradních parametrů	68
4.3.2 Určení polohy uzlu maximální teploty	69
4.3.3 Sestavení a řešení tepelné sítě jádrové cívky.....	76
5 ZATĚŽOVACÍ CHARAKTERISTIKA STROJE	88
6 ZÁVISLOST ZTRÁT A ÚČINNOSTI STROJE NA ZATÍŽENÍ A ÚČINÍKU	89
6.1 Závislost účinnosti na zatížení.....	89
6.2 Závislost účinnosti na zatížení s respektováním oteplení daných částí.....	94
6.3 Porovnání účinnosti a ztrát	100
7 KONSTRUKČNÍ USPOŘÁDÁNÍ STROJE	102
ZÁVĚR.....	103
SEZNAM POUŽITÉ A CITOVANÉ LITERATURY	106
SEZNAM PŘÍLOH	1
PŘÍLOHY	3

Seznam v práci použitých symbolů a zkratek

U	[V]	sdužené napětí
P	[W]	činný výkon stroje
S	[VA]	zdánlivý výkon stroje
$\cos\varphi$	[-]	účinník stroje
f	[Hz]	frekvence
n	[$\frac{ot}{min}$]	jmenovité otáčky stroje
m	[-]	počet fází stroje
U_f	[V]	fázové napětí
I_l	[A]	fázový proud
D_l	[m]	průměr induktu
α	[-]	činitel pólového krytí
p	[-]	počet pólpárů
t_p	[m]	mezipólová rozteč
Q	[-]	počet drážek induktu
q	[-]	počet drážek na pól a fázi
N_s	[-]	počet drážek v sérii jedné fáze
n_d	[-]	celkový počet vodičů v drážce
a_{st}	[-]	počet paralelních větví každé fáze
A	[A/m]	obvodová proudová hustota
β	[-]	činitel zkrácení kroku
y_{ld}	[-]	cívkový krok
y_K	[-]	fiktivní krok na komutátoru
K	[-]	počet cívek vinutí
u	[-]	konstanta rozložení cívkových stran v drážce
k_v	[-]	činitel vinutí
k_{r1}	[-]	činitel rozlohy vinutí pro základní harmonickou
C	[$\frac{kVA}{m^3 \cdot \frac{ot}{min}}$]	Essonův činitel elektromagnetického využití stroje
l_e	[m]	efektivní délka stroje
\check{s}_k	[m]	šířka radiálního chladicího kanálu
\check{s}_p	[m]	šířka paketu plechového svazku

i	[-]	počet paketů statorového svazku
i_k	[-]	počet chladicích kanálů
l	[m]	celková délka stroje
l_c	[m]	délka čela cívky
t_{dl}	[m]	drážková rozteč
z_l	[m]	šířka zubu
b_d	[m]	šířka drážky
B_δ	[T]	magnetická indukce ve vzduchové mezeře
B_z	[T]	magnetická indukce v zubu
k_{Fe}	[-]	činitel plnění plechového svazku
S_{cu}	[m ²]	průřez vodiče
σ_{cu}	[A/mm ²]	proudová hustota ve vodiči
b_v	[m]	šířka vodiče
h_v	[m]	výška vodiče
R_{lf}	[Ω]	elektrický odpor jedné fáze
R_S	[Ω]	elektrický odpor vinutí induktu
R_b	[Ω]	elektrický odpor budícího vinutí
u_R	[%]	procentní hodnota úbytku napětí na odporu fáze
X_σ	[Ω]	rozptylová reaktance vinutí
u_σ	[%]	procentní hodnota rozptylové reaktance jedné fáze
Φ	[Wb]	magnetický tok
δ	[m]	výška vzduchové mezery
F_A	[A]	magnetické napětí reakce kotvy
F_{dl}	[A]	magnetické napětí reakce kotvy v podélném směru
F_{ql}	[A]	magnetické napětí reakce kotvy v příčném směru
\check{s}_p	[m]	šířka pólu
h_p	[m]	výška pólu
\check{s}_n	[m]	šířka nástavce
h_n	[m]	výška nástavce
B_{js}	[T]	magnetická indukce ve jhu statoru
B_{jr}	[T]	magnetická indukce ve jhu rotoru
l_p	[m]	délka pólu
l_s	[m]	délka jha statoru

l_r	[m]	délka jha rotoru
k_{ck}	[-]	Carterův činitel
F_δ	[A]	magnetické napětí ve vzduchové mezeře
F_b	[A]	magnetické napětí budícího vinutí
l_{bs}	[m]	střední délka závitů budícího vinutí
N_b	[-]	počet závitů budící cívky
I_b	[A]	budící proud
n_p	[-]	počet poloh vodičů budící cívky
b_c	[m]	šířka cívky
h_c	[m]	výška cívky
O_{2pc}	[m ²]	ochlazovací plocha všech budících cívek
ΔP_{Cub}	[W]	Jouleovy ztráty v budícím vinutím
ΔP_{CuI}	[W]	Jouleovy ztráty v induktu
ΔP_{Fej}	[W]	Jouleovy ztráty v jádře induktu
ΔP_{Fesz}	[W]	Jouleovy ztráty v zubech
$\Delta P_{přid}$	[W]	přídavné ztráty
$\Delta \vartheta_{Cub}$	[°C]	oteplení budící cívky
$\Delta \vartheta_{Cubo}$	[°C]	orientační oteplení budící cívky
$\Delta \vartheta_{SCu}$	[°C]	střední hodnota oteplení vinutí induktu
m_{Fer}	[k]	hmotnost rotorových plechů
m_{Fesz}	[kg]	hmotnost zubů statoru
ΔP_P	[W]	povrchové ztráty
$\Delta P_{Přid}$	[W]	přídavné ztráty
ΔP	[W]	celkové ztráty vzniklé ve stroji
F_o	[N]	odstředivá síla
m	[kg]	hmotnost
ω	[rad/s]	úhlová rychlost
λ	[W/°C · m]	měrná tepelná vodivost
α	[W/°C · m ²]	součinitel přestupu tepla
Q	[W]	tepelný tok
c	[W/kg · K]	hmotnostní měrné teplo
$c\rho$	[W/m ³ · K]	objemové měrné teplo prostředí

Q_c	[-]	počet čel
ϑ_0	[°C]	teplota okolí
O_{iz}	[m]	obvod izolace
R	[°C/W]	tepelný odpor
Q	[m ³ /s]	množství chladícího média procházejícího strojem
η_T	[%]	účinnost stroje při respektování oteplení jednotlivých částí
η	[%]	účinnost stroje
$\sum \Delta P_T$	[W]	součet všech ztrát ve stroji při respektování oteplení jednotlivých částí
$\sum \Delta P$	[W]	součet všech ztrát ve stroji
P_i	[W]	vnitřní výkon stroje
MKP		metoda konečných prvků
č.		číslo
tzn.		to znamená
atd.		a tak dále
obr.		obrázek
tab.		tabulka
z. ch.		zatěžovací charakteristika

1 Úvod

Diplomová práce je zaměřena na elektromagnetický návrh synchronního generátoru a na určení závislosti účinnosti na zatížení a účinníku s respektováním oteplení daných částí stroje. Téma diplomové práce jsem si vybral z důvodu, že daná problematika mě velmi zajímá a také proto, že v současné době je otázka určování účinnosti synchronních strojů velmi důležitá.

S touto problematikou souvisí určování a vyhodnocování ztrát, které jsou v této práci také uvedeny. Dále je v práci uveden výpočet oteplení induktu stroje a oteplení budícího vinutí.

Celá práce je rozdělena do sedmi kapitol včetně úvodu.

Druhá kapitola se zabývá elektromechanickým výpočtem, který zahrnuje kromě určení hlavních rozměrů stroje i výpočet statorového a budícího vinutí, dimenzování magnetického obvodu, mezi pólový rozptyl, kontrolní výpočet oteplení, určení celkových ztrát a účinnosti.

Třetí kapitola je zaměřená na mechanické výpočty, na upevnění a zajištění pólů.

Ve čtvrté kapitole je řešeno oteplení statorového a budícího vinutí. Zde se řeší určení rozměrů daných elementů pro vybrané úseky, ve kterých se počítá dané oteplení, dále se zde určují hodnoty daných tepelných odporů a sestavení soustav rovnic pro dané uzly tepelné sítě.

V páté kapitole je popsán postup sestavení zatěžovacích charakteristik pro jednotlivé účinníky, se kterými stroj pracuje.

Šestá kapitola slouží k porovnání výsledků. Jsou zde porovnány průběhy účinností stroje pro daná zatížení v závislosti a bez závislosti na oteplení daných částí stroje pro dané účinníky. Dále jsou zde porovnány ztráty v závislosti na daném zatížení. V této kapitole jsou také uvedeny průběhy oteplení budícího a statorového vinutí.

V sedmé kapitole je popsáno konstrukční uspořádání stroje, je zde také přiložen výkres se schematickým konstrukčním uspořádáním stroje v podélné a příčné poloze.

2 Elektromagnetický návrh stroje

V následující kapitole bude v několika sekcích proveden elektromagnetický výpočet stroje. Elektromagnetický návrh stroje je složen z určení hlavních rozměrů a parametrů stroje, návrhu vinutí a izolačního systému v drážce, z dimenzování magnetického obvodu, dále z návrhu budícího vinutí a určení ztrát a účinnosti stroje.

2.1 Zadané parametry

Proveďte elektromagnetický návrh vzduchem chlazeného horizontálního synchronního generátoru s uzavřeným oběhem chladiva.

Parametry:

Zdánlivý výkon	$S = 2\,500$	kVA
Sdružené napětí	$U = 10\,500$	V
Jmenovité otáčky	$n = 750$	ot. / min
Účinník	$\cos\varphi = 0,8$	
Počet fází	$m = 3$	
Nesycená synchronní reaktance	$x_{dn} = 137$	%
Frekvence	$f = 50$	Hz

2.2 Výpočet základních parametrů

Činný výkon:

$$P = S \cdot \cos \varphi = 2500 \cdot 0,8 = 2000 \text{ kW} \quad (2.1)$$

Fázové napětí:

$$U_f = \frac{U}{\sqrt{3}} = \frac{10500}{\sqrt{3}} = 6062,18 \text{ V} \quad (2.2)$$

Fázový proud:

$$I_1 = \frac{S}{U_s \cdot \sqrt{3}} = \frac{2500 \cdot 10^3}{10500 \cdot \sqrt{3}} = 137,46 \text{ A} \quad (2.3)$$

Počet pólpárů:

$$p = \frac{60 \cdot f}{n} = \frac{60 \cdot 50}{750} = 4 \quad (2.4)$$

Počet pólů:

$$2p = 8 \quad (2.5)$$

Průměr induktu (statoru) ve vzduchové mezeře (vrtání statoru):

a) Podle empirického vztahu:

$$D_1 = 0,08 \cdot (2p)^{0,625} \cdot S^{0,185} = 0,08 \cdot (8)^{0,625} \cdot 2500^{0,185} = 1,248 \text{ m} \quad (2.6)$$

b) Odečteno z grafu (Příloha č. 1):

$$D_1 = 1,33 \text{ m}$$

Volím: $D_1 = 1,25 \text{ m}$

Z grafu (Příloha č. 2) odečteme předběžnou hodnotu proudové hustoty a magnetické indukce.

Proudová hustota: $A = 56\,000 \text{ A/m}$

Magnetická indukce: $B_\delta = 0,81 \text{ T}$

Volím činitel pólového krytí:

$$\alpha = 0,65$$

Mezipólová rozteč:

$$t_p = \frac{\pi \cdot D_1}{2p} = \frac{\pi \cdot 1,25}{8} = 0,49 \text{ m} \quad (2.7)$$

[2] [3]

2.3 Návrh vinutí induktu (statoru)

S ohledem na průměr induktu a napětí volím mezidrážkovou rozteč:

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

Tomu odpovídá:

počet drážek induktu:

$$Q = \frac{\pi \cdot D_1}{t_{d1}} = \frac{\pi \cdot 1,25}{0,04} = 98,17 \rightarrow 98 \quad (2.8)$$

a počet drážek na pól a fázi:

$$q = \frac{Q}{2 \cdot p \cdot m} = \frac{98}{8 \cdot 3} = 4,083 \quad (2.9)$$

Protože je počet drážek na pól a fázi menší než 7 a 8, volím zlomkové vinutí, tedy $q = \frac{n}{c}$.

Aby byl počet drážek v každé fázi stejný, tedy $Q_f = \frac{Q}{m} = \frac{2p \cdot m \cdot q}{m} = 2p \cdot q = 2p \cdot \frac{n}{c} =$

č. celé, může být jmenovatel zlomku $c = 2$ nebo 4 .

Pro velikost počtu drážek na pól a fázi jsou vhodné a možné následující hodnoty:

počet drážek na pól a fázi:

$$q = 4 \frac{1}{2} = \frac{9}{2} = 4,5$$

a pak je počet drážek induktu roven:

$$Q = 2p \cdot m \cdot q = 8 \cdot 3 \cdot 4,5 = 108 = 2 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 3 \quad (2.10)$$

a počet drážek na fázi:

$$Q_f = \frac{Q}{m} = \frac{2p \cdot m \cdot q}{m} = 2p \cdot q = 8 \cdot 4,5 = 36 \quad (2.11)$$

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

$$Q = k \cdot n_s \cdot Q_{př} \quad (2.12)$$

kde n_s je počet segmentů a

$Q_{př}$ počet drážek na překlad

S přihlédnutím na skutečnou velikost obvodové proudové hustoty, na velikost drážkové rozteče a na vhodný počet vodičů v drážce, se jeví jako nejvhodnější výše uvedená varianta, kde je zároveň proveden rozklad počtu drážek na prvočinitele

Po volbě překladového čísla $k = 2$ obdržíme:

překladové číslo $k = 2$

počet segmentů $n_s = 6$

počet drážek na překlad $Q_{př} = 9$

Počet závitů jedné fáze v sérii:

$$N_s = \frac{\pi \cdot D_1 \cdot A}{2 \cdot m \cdot l_1} = \frac{\pi \cdot 1,25 \cdot 56000}{2 \cdot 3 \cdot 137,46} = 266,63 \quad (2.13)$$

Počet vodičů v drážce:

$$n_d = \frac{a_{\approx} \cdot N_s}{p \cdot q} = \frac{1 \cdot 266,63}{4 \cdot 4,5} = 14,8 \rightarrow 14 \quad (2.14)$$

kde a_{\approx} (volím $a_{st} = 1$) je počet paralelních větví každé fáze střídavého vinutí.

Zaokrouhlím na: $n_d = 14$

Počet závitů v sérii jedné fáze:

$$N_s = \frac{n_d \cdot p \cdot q}{a_{st}} = \frac{14 \cdot 4 \cdot 4,5}{1} = 252 \quad (2.15)$$

Skutečné hodnota obvodové proudové hustoty:

$$A = \frac{2 \cdot m \cdot l_1}{\pi \cdot D_1} \cdot N_s = \frac{2 \cdot 3 \cdot 137,46}{\pi \cdot 1,25} \cdot 252 = 52\,925,899 \text{ A/m} \quad (2.16)$$

[2] [3]

2.3.1 Parametry vinutí

Počet drážek: $Q = 108$

Počet pólů: $2p = 8$

Počet fází: $m = 3$

Matematický počet fází: $m' = 6$

Počet drážek na pól a fázi: $q = 4,5$

Typ vinutí: smyčkové (nekřížené)

Počet drážek na pól:

$$Q_p = \frac{Q}{2p} = \frac{108}{8} = 13,5 \quad (2.17)$$

Volíme cívkový krok:

$$y_{1d} = Q_p \cdot 0,8\bar{3} = 13,5 \cdot 0,8\bar{3} = 11,25 \rightarrow 11 \quad (2.18)$$

Poměrné zkrácení kroku:

$$\beta = \frac{y_{1d}}{Q_p} = \frac{11}{13,5} = 0,8148 \quad (2.19)$$

Počet cívek vinutí:

$$K = u \cdot Q = 1 \cdot 108 = 108 \quad (2.20)$$

Fiktivní krok na komutátoru:

$$y_k = \frac{\varepsilon \cdot K \pm a_{ss}}{p} = \frac{0 \cdot 108 \pm 4}{4} = \frac{4}{4} = 1 \quad (2.21)$$

Přední cívkový krok:

$$y_1 = 2 \cdot u \cdot y_{1d} + 1 = 2 \cdot 1 \cdot 11 + 1 = 23 \quad (2.22)$$

Zadní cívkový krok:

$$y_2 = 2 \cdot y_k - y_1 = 2 \cdot 1 - 23 = -21 \quad (2.23)$$

Počet fázových svazků

$$S_c = a_{ss} \cdot m' = 4 \cdot 6 = 24 \quad (2.24)$$

Počet fázových svazků na fázi:

$$S_f = \frac{a_{ss} \cdot m'}{m} = \frac{4 \cdot 6}{3} = 8 \quad (2.25)$$

Počet cívek ve svazku:

$$K_1 = \frac{K}{a_{ss} \cdot m'} = \frac{108}{4 \cdot 6} = 4,5 \quad (2.26)$$

[2] [3]

2.3.2 Výpočet činitelů vinutí

V tomto místě návrhu bylo vytvořeno Tingleyho schéma (Příloha č. 13), které znázorňuje rozložení cívkových stran jednotlivých fází v drážkách induktu. Dále byla nakreslena část pilového schématu (Příloha č. 28) a úsečkové schéma (Příloha č. 29) ukazující zapojení cívkových skupin.

Parametry Tingleyho schématu:

$$\text{Počet řádků: } 2p = 8$$

$$\text{Počet sloupců: } m \cdot n = 3 \cdot 9 = 27$$

$$\text{Schéma je vyplněno po c sloupcích: } c = 2$$

Po sestavení Tingleyho schématu je možné podle něj vypočítat činitel rozlohy.

$$\text{Elektrický úhel mezi následujícími drážkami: } \alpha_{el} = \frac{180^\circ}{m \cdot n} = \frac{180^\circ}{3 \cdot 9} = \frac{20^\circ}{3}$$

Činitel rozlohy vinutí pro základní harmonickou lze vypočítat:

$$k_{r1} = \frac{16 \cdot \left[\cos \frac{10}{3} + \cos 10 \right] + 8 \cdot \left[\cos \frac{50}{3} + \cos \frac{70}{3} + \cos 30 + \cos \frac{110}{3} + \cos \frac{130}{3} \right]}{72}$$

$$k_{r1} = 0,9153$$

Činitel vinutí v -té harmonické:

$$k_{vv} = \sin \left(v \cdot \beta \cdot \frac{\pi}{2} \right) \frac{\sin v \cdot \frac{\pi}{m'}}{n \cdot \sin v \cdot \frac{\pi}{m' \cdot n}} \quad (2.27)$$

Činitel vinutí 1. harmonické:

$$k_{v1} = \sin \left(1 \cdot 0,8148 \cdot \frac{\pi}{2} \right) \frac{\sin 1 \cdot \frac{\pi}{6}}{9 \cdot \sin 1 \cdot \frac{\pi}{6 \cdot 9}} = 0,915$$

Kde:

v řád harmonické

β poměrné zkrácení kroku

m matematický počet fází

n čísel počet drážek na pól a fázi ($q = \frac{n}{c}$)

Po postupném dosazení za $v = 5, 7, 11, 13$ určíme činitele vinutí příslušných harmonických:

$$k_{v5} = 0,0579$$

$$k_{v7} = -0,0629$$

$$k_{v11} = -0,0929$$

$$k_{v13} = -0,0649$$

Nyní můžeme určit skutečnou hodnotu Essonova činitele elektromagnetického využití stroje:

$$C = \frac{\pi^2}{60 \cdot \sqrt{2}} \cdot A \cdot B_{\delta} \cdot k_{v1} = \frac{\pi^2}{60 \cdot \sqrt{2}} \cdot 52,925 \cdot 0,81 \cdot 0,915 = 4,56 \frac{kVA}{m^3 \cdot \frac{ot.}{min}} \quad (2.28)$$

Za předpokladu, že obvodová proudová hustota A je dosazena v kA.

Z toho vychází efektivní délka stroje:

$$l_e = \frac{S}{c \cdot D_1^2 \cdot n} = \frac{2500}{4,56 \cdot 1,25^2 \cdot 750} = 0,4678 \text{ m} \quad (2.29)$$

Předpokládáme použití radiálních chladicích kanálů, které rozdělí plechový svazek induktu na pakety o zvolené šířce přibližně $\check{s}_p = 50$ mm, přičemž volíme šířku kanálu $\check{s}_k = 10$ mm.

Počet paketů:

$$i = \frac{l_e}{\check{s}_p} = \frac{0,4678}{0,05} = 9,3 \rightarrow 9 \quad (2.30)$$

Počet kanálů:

$$i_k = i - 1 = 9 - 1 = 8 \quad (2.31)$$

Celková délka induktu (včetně radiálních kanálů):

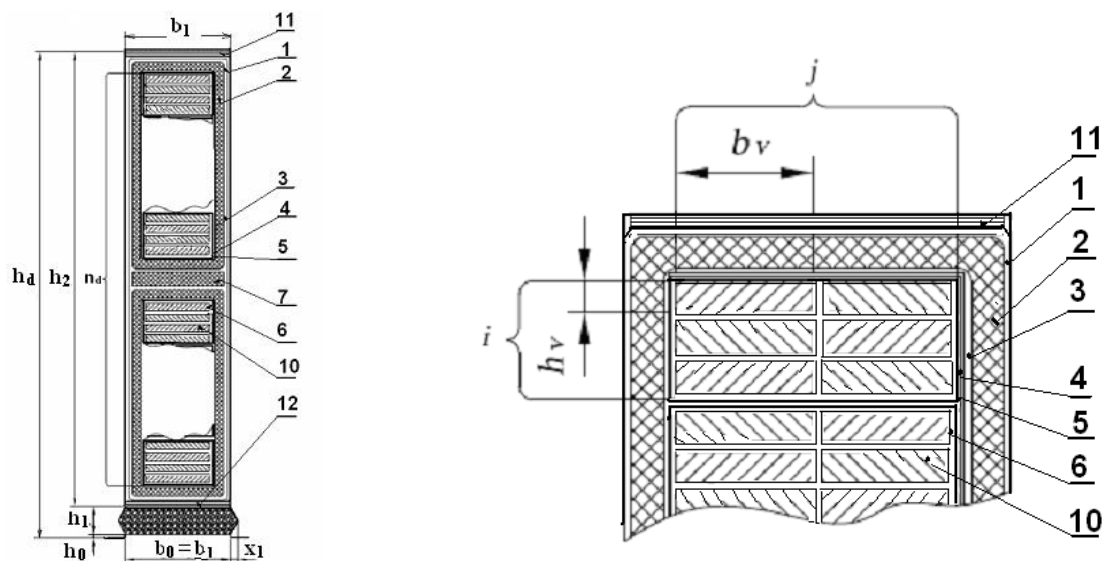
$$L = l_e + \check{s}_k \cdot i_k = 0,4678 + 0,01 \cdot 8 = 0,5478 \text{ m} \quad (2.32)$$

[2] [3]

2.3.3 Návrh drážky

Drážka pro $n_d > 2$ se závitovým vinutím. Prostor pro šířku holého vodiče a hloubka drážky se určí podle následující tabulky.

Na induktu použijeme otevřenou obdélníkovou drážku tvaru M, tzn. že zuby budou lichoběžníkového tvaru.



Obrázek 2.1: Uspořádání drážky tvaru M [3]

Velikost drážkové rozteče na průměr D_1 :

$$t_{d1} = \frac{\pi \cdot D_1}{Q} = \frac{\pi \cdot 1250}{108} = 36,36 \text{ mm} \quad (2.33)$$

Šířka zubu:

$$z_1 = \frac{B_{\delta} \cdot t_{d1}}{B'_{z1} \cdot k_{Fe}} = \frac{0,81 \cdot 36,36}{1,7 \cdot 0,92} = 18,83 \text{ mm} \quad (2.34)$$

kde: B'_{z1} je zvolená hodnota magnetické indukce v hlavě zubu (na průměru D_1)

k_{Fe} činitel plnění železa

Tomu odpovídá šířka drážky:

$$b_d = t_{d1} - z_1 = 36,36 - 18,83 = 17,53 \text{ mm} \quad (2.35)$$

Nejbližší normalizovaná šířka určená z tabulky drážky M (příloha č.3) je:

$$b_d = 17,5 \text{ mm}$$

$$h_0 = 1 \text{ mm}$$

$$h_1 = 6 \text{ mm}$$

$$X_1 = 1,6 \text{ mm}$$

a skutečná šířka zubu:

$$z_1 = t_{d1} - b_d = 36,36 - 17,5 = 18,86 \text{ mm} \quad (2.36)$$

Jedná se o závitové vinutí ($n_d=14$), tomu odpovídá pro napětí 10,5 kV následující uspořádání vodičů a izolace v drážce:

Poz	Položka	Šířka [mm]		Hloubka [mm]	
1	Vyložení drážky 1)	2 . 0,15	-	3 . 0,15	-
2	Izolace proti železu	2 . $t_i \rightarrow 2 . 3,1$	6,2	4 . $t_i \rightarrow 4 . 3,1$	12,4
3	Tmelení	2 . 0,1	0,20	4 . 0,1	0,40
4	Stažení vodičů	2 . 0,15	0,30	4 . 0,15	0,60
5	Izolace závitů	2 . 0,48	0,96	2 . $n_d . 0,48 \rightarrow 2 . 14 . 0,48$	13,44
6	Izolace vodičů 2)	1.j.0,37 \rightarrow 1.1.0,37	0,37	$n_d.i.0,37 \rightarrow 14.2.0,37$	10,36
7	Mezivrstva	-	-	1 . $m_v \rightarrow 1 . 6$	6
8	Σ izolace		8,03		43,2
9	Vůle na šířku	0,2 až 0,6	0,47	-	-
10	Holý vodič 3)	j. $b_v \rightarrow 1.9$	9	$n_d.i.h_v \rightarrow 14.2.2$	56
11	Vložka na dno	-	-	1 . 1	1
12	Vložka pod klín	-	-	1 . 0,5	0,50
13	Vůle na hloubku	-	-	0,4 až 2,0	1,3
14	Rozměr drážky bez klínu	b_d	17,5	h_2	102
15	Klín + můstek	-	-	$h_1 + h_0 \rightarrow 6 + 1$	7
16	Konečný rozměr drážky	b_d	17,5	h_d	109

Tabulka 2.1: Rozměry drážky

- 1) jen do napětí 6,3 kV, pro vyšší napětí se povrch cívky je natírá polovodivým nátěrem a ten musí přijít do styku s povrchem drážky, a proto se vyložení drážky nepoužívá
- 2) jde o oboustranný přírůstek izolace
- 3) rozměry vodičů jsou podle ČSN (Příloha č. 4)

Napětí / kV /	Izolace proti železu – t : / mm /				Mezivrstva m _v : /mm/
	obyčejná	lepší	typ: samicatherm	typ: Relanex	
0,4 až 1,5	0,45	-	-	-	3
3,0	1,8	1,6	1,4	1,4	3
6,3	3,0	2,7	2,4	1,8	4
10,5	3,5	3,3	3,1	2,8	6
13,8	4,5	4,2	4,0	3,8	6
15,7		4,6	4,4	4,0	7
18,0		5,5	5,0	5,0	7
24,0				6,5	

Tabulka 2.2: Rozměry izolací [3]

Průřez vodiče:

$$S'_{Cu1} = \frac{I_1}{a_{st} \sigma_{Cu1}} = \frac{137,464}{1 \cdot 4,15} = 33,12 \text{ mm}^2 \quad (2.37)$$

když jsme proudovou hustotu ve vodiči určili z empirického vztahu:

$$\sigma_{Cu1} = \sqrt{\frac{K}{b_v}} = \sqrt{\frac{155}{9}} = 4,15 \text{ A/mm}^2 \quad (2.38)$$

b_v - šířka holého vodiče v drážce

kde K je konstanta závislá na napětí:

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

Tabulka 2.3: Závislost K na napětí [3]

Výška vodiče h_v při jeho šířce 9 mm, jak vychází z bilance drážky na šířku:

$$h_v = \frac{S_{Cu1}}{b_v} = \frac{33,12}{9} = 3,68 \text{ mm} \quad (2.39)$$

pro $S_{Cu1} = 33,12 \text{ mm}^2$ najdeme z tabulky nejbližší průřez S_{Cu1}'' pro $b_v = 9 \text{ mm}$

$$S_{Cu1}'' = 35,1 \text{ mm}^2$$

Původní vodič je rozdělen na šířku na jeden vodič ($j=1$) a na výšku na dva vodiče ($i=2$) o rozměrech 9 x 2 mm

$$b_v = 9 \text{ mm}$$

$$h_v = 2 \text{ mm}$$

Skutečný průřez vodiče:

$$S_1 = 17,4 \text{ mm}^2 \rightarrow 9 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$$

Výsledný průřez vodičů tvořícího jeden závit:

$$S_{Cu} = j \cdot i \cdot S_1 = 1 \cdot 2 \cdot 17,4 = 34,8 \text{ mm}^2 \quad (2.40)$$

a skutečná proudová hustota:

$$\sigma_{Cu1} = \frac{I_1}{a_{st} S_{Cu}} = \frac{137,464}{1 \cdot 34,8} = 3,95 \text{ A/mm}^2 \quad (2.41)$$

[2] [3]

2.3.4 Odpor a rozptylová reaktance statorového vinutí

Délka čela:

Úhel sklonu čel válcového vinutí:

$$\sin \alpha_{\xi} = \frac{b_{\xi} + c}{t_{d1}} = \frac{17,5 + 9,25}{36,36} = 0,736 \quad (2.42)$$

$$\alpha_{\xi} = \arcsin 0,736 = 47,37^{\circ}$$

když šířku čela b_{ξ} volím stejnou jako šířku drážky b_d a vzdálenost mezi čely volím v závislosti na velikosti napětí podle vztahu:

$$c = 4 + \frac{U[\text{kV}]}{2} = 4 + \frac{10,5}{2} = 9,25 \text{ mm} \quad (2.43)$$

$$x = \frac{\beta \cdot t_p}{2 \cdot \cos \alpha_\zeta} = \frac{0,8148 \cdot 490,87}{2 \cdot \cos 47,37^\circ} = 295,24 \text{ mm} \quad (2.44)$$

$$h_\zeta = \frac{1}{2} \cdot (h_2 - m) = \frac{1}{2} \cdot (102 - 6) = 48 \text{ mm} \quad (2.45)$$

$$R = \frac{h_\zeta}{2} + r = \frac{48}{2} + 10 = 34 \text{ mm} \quad (2.46)$$

Délka oka:

$$o = \frac{\pi \cdot R}{2} = \frac{\pi \cdot 34}{2} = 53,4 \text{ mm} \quad (2.47)$$

Délka čela:

$$l_\zeta = 2 \cdot (v + x + o) = 2 \cdot (80 + 295,24 + 53,4) \quad (2.48)$$

$$l_\zeta = 857,28 \text{ mm} = 0,857 \text{ m}$$

Délka vodiče:

$$l_v = L + l_\zeta = 0,5478 + 0,857 = 1,4 \text{ m} \quad (2.49)$$

Vyložení čel v podélném směru:

celkové vyložení čel

$$a = v + y + e = 80 + 217 + 58 = 355 \text{ mm} \quad (2.50)$$

délka oka:

$$e = h_\zeta + r = 48 + 10 = 58 \text{ mm} \quad (2.51)$$

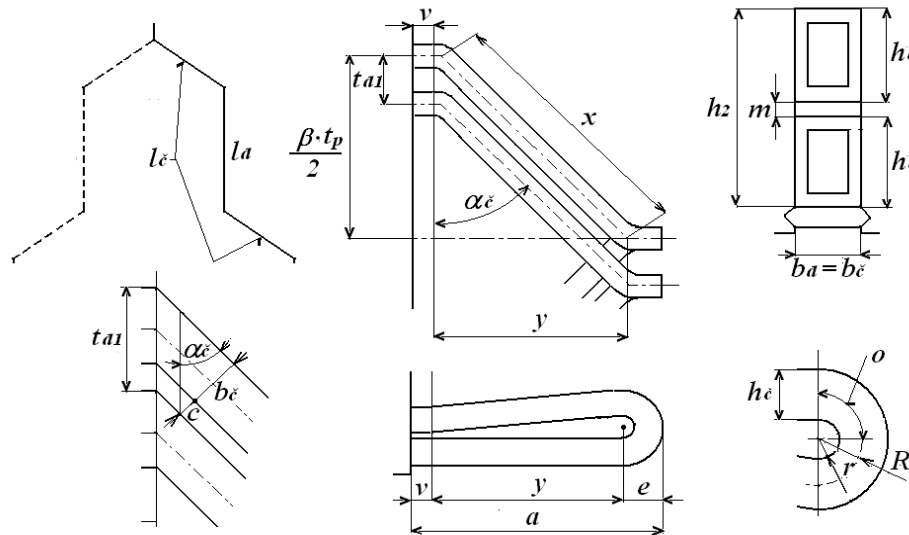
průmět x do osového směru:

$$y = \frac{\beta \cdot t_p}{2} \cdot \operatorname{tg} \alpha_\zeta = \frac{0,8148 \cdot 490,87}{2} \cdot \operatorname{tg} 47,37^\circ = 217 \text{ mm} \quad (2.52)$$

Výběh cívky z drážky „v“ je závislý na napětí stroje podle následující tabulky:

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

Tabulka 2.4: Závislost v na napětí [3]



Obrázek 2.2: Rozměry čel vinutí [3]

Odpor jedné fáze:

Elektrický odpor pro stejnosměrný proud (tedy bez uvažování skinefektu):

$$R'_{1/20} = \rho_{Cu} \cdot \frac{2 \cdot l_v \cdot N_s}{a_{st} \cdot S_{Cu}} = \frac{1}{56} \cdot \frac{2 \cdot 1,4 \cdot 252}{1 \cdot 34,8} = 0,362 \Omega \quad (2.53)$$

kde ρ_{Cu} je měrný odpor měděného vodiče při teplotě 20 °C $\left[\Omega \frac{m}{mm^2} \right]$

Vliv skinefektu:

Náhradní výška vodiče:

$$\xi = 2\pi h_v \sqrt{\frac{j b_v f}{b_a \rho}} 10^{-7} = 2\pi 2 \sqrt{\frac{1 \cdot 9 \cdot 50}{17,5 \cdot \frac{1}{56}}} 10^{-7} = 0,15 \quad (2.54)$$

Činitel zvýšení elektrického odporu:

$$k_{Cu} = \frac{g^2 - 0,2}{9} \xi^4 = \frac{28^2 - 0,2}{9} 0,15^4 = 0,044 \quad (2.55)$$

Kde g je celkový počet vodičů v drážce nad sebou:

$$g = i \cdot n_d = 2 \cdot 14 = 28 \quad (2.56)$$

Odpor při střídavém proudu při 20°C:

$$R_{1/20} = (1 + k_{Cu}) R'_{1/20} = (1 + 0,044) 0,362 = 0,378 \Omega \quad (2.57)$$

Odpor při 75 °C:

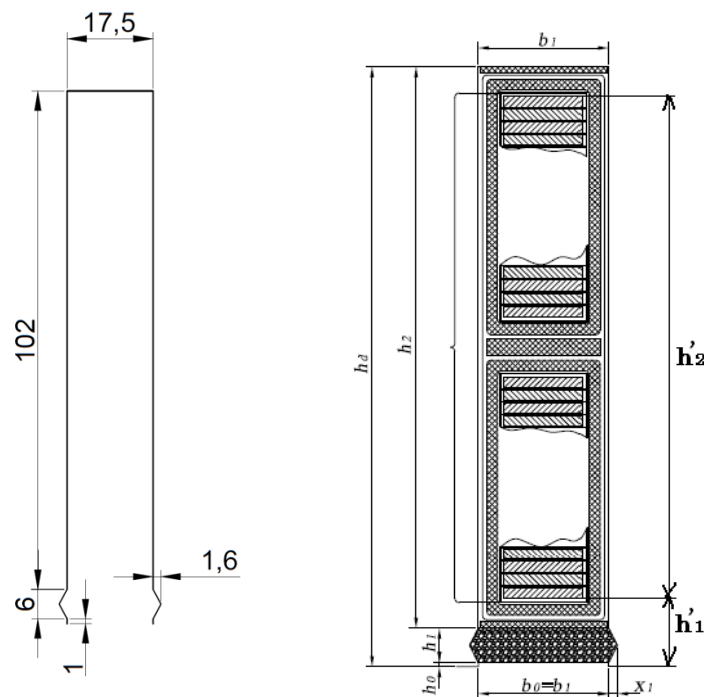
$$R_{1/75} = 1,22 \cdot R_{1/20} = 1,22 \cdot 0,378 = 0,461 \, \Omega \quad (2.58)$$

Procentní hodnota úbytku napětí na ohmickém odporu:

$$u_R = \frac{R_{1/75} \cdot I_1}{U_f} \cdot 100 = \frac{0,461 \cdot 137,46}{6062,178} \cdot 100 = 1,05 \, \% \quad (2.59)$$

Velikost rozptylové reaktance je dána magnetickou vodivostí drážky induktu, vodivostí čel vinutí a vodivostí mezi sousedními zuby přes vzduchovou mezeru. Tyto vodivosti jsou zahrnuty uvnitř hranaté závorky následujícího výrazu.

Co se týče rozptylu drážky, tak h'_d je vzdálenost krajních vláken vodičů v drážce a h'_1 je vzdálenost horního krajního vodiče od kraje drážky (viz obr. vlevo). Hodnota b_d je šířka drážky a je rovna b_l .



Obrázek 2.3: Drážka tvaru M

$$h'_1 = \text{izolace proti železu} + \text{stažení vodičů} + \text{izolace závitů} + \frac{\text{izolace vodičů}}{2} + \text{vložka pod klín} + \text{klín} + \text{můstek} + \text{vůle na hloubku} \quad (2.60)$$

$$h'_1 = 3,1 + 0,15 + 0,48 + \frac{0,37}{2} + 0,5 + 6 + 1 + 1,3 = 12,715 \text{ mm}$$

$$h'_2 = h_d - h'_1 - \text{vložka na dno} - \text{izolace proti železu} - \text{stažení vodičů} - \\ - \text{izolace závitů} - \frac{\text{izolace vodičů}}{2} \quad (2.61)$$

$$h'_2 = 109 - 12,715 - 1 - 3,1 - 0,15 - 0,48 - \frac{0,37}{2} = 91,37 \text{ mm}$$

$$X_\sigma = \frac{(4 \cdot \pi)^2 \cdot f \cdot N_s^2}{p \cdot q} \cdot l_e \cdot \left[\left(\frac{h'_2}{3 \cdot b_d} + \frac{h'_1}{b_d} \right) + \frac{l_\xi}{l_e} \cdot q \cdot \left(0,187 + 0,166 \cdot \frac{t_p}{l_\xi} \cdot \beta \right) + \ln \left(1 + \frac{\pi \cdot z_1}{2 \cdot b_d} \right) \right] \cdot 10^{-7}$$

$$X_\sigma = \frac{(4 \cdot \pi)^2 \cdot 50 \cdot 252^2}{4 \cdot 4,5} \cdot 0,47 \cdot \left[\left(\frac{91,37}{3 \cdot 17,5} + \frac{12,72}{17,5} \right) + \frac{0,86}{0,47} \cdot 4,5 \cdot \left(0,187 + 0,166 \cdot \frac{0,49}{0,857} \cdot 0,81 \right) + \ln \left(1 + \frac{\pi \cdot 18,9}{2 \cdot 17,5} \right) \right] \cdot 10^{-7}$$

$$X_\sigma = 7,6 \Omega \quad (2.62)$$

Procentní hodnota úbytku napětí na rozptylové reaktanci:

$$u_\sigma = \frac{X_\sigma \cdot I_1}{U_f} \cdot 100 = \frac{7,6 \cdot 137,464}{6062,178} \cdot 100 = 17,24 \% \quad (2.63)$$

Procentní hodnota rozptylové reaktance:

$$X_\sigma = u_\sigma = 17,24 \%$$

[2] [3]

2.4 Návrh magnetického obvodu

2.4.1 Určení magnetického toku

Magnetický tok:

$$\Phi = \frac{U_f}{4,44 \cdot f \cdot N_s \cdot k_{v1}} = \frac{6062,1778}{4,44 \cdot 50 \cdot 252 \cdot 0,915} = 0,11843 \text{ Wb} \quad (2.64)$$

Kontrola:

$$\Phi = \frac{2}{\pi} \cdot t_p \cdot l_e \cdot B_\delta = \frac{2}{\pi} \cdot 0,49 \cdot 0,4678 \cdot 0,81 = 0,1182 \text{ Wb} \quad (2.65)$$

Hodnoty velmi dobře souhlasí, počítám nadále s hodnotou:

$$\Phi = 0,1184 \text{ Wb}$$

[2] [3]

2.4.2 Velikost vzduchové mezery

$$\delta = k \cdot \frac{A \cdot t_p}{B_\delta} \cdot \frac{10^{-6}}{X_d - X_\sigma} = 47 \cdot \frac{52 \cdot 925,9 \cdot 0,49}{0,81} \cdot \frac{10^{-6}}{137 - 17,24} = 0,01257 \text{ m} \quad (2.66)$$

kde $k = (43 \div 50)$, závisí na tvaru pólového nástavce, velikosti Carterova činitele a dalších parametrech

x_d -procentní hodnota nesyčené synchronní reaktance:

$$x_d = 137\%$$

2p	2	4	6	8	10	12	16	20	24	28	40	56
x_d	200÷220	170	150	137	127	120	110	105	100	98	95	93

Tabulka 2.5: Závislost reaktance na počtu pólů [3]

Volím: $\delta = 12 \text{ mm}$

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

Volím: $\frac{\delta_{max}}{\delta} = 1,5$

[2] [3]

2.4.3 Magnetické napětí reakce kotvy

Amplituda základní harmonické reakce kotvy:

$$F'_a = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{1}{C_1} \cdot A \cdot t_p \cdot k_{v1} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{1}{1,0296} \cdot 52\,925,9 \cdot 0,49 \cdot 0,915 = 10\,375 \text{ A} \quad (2.67)$$

kde C_1 je činitel základní harmonické magnetické indukce ve vzduchové mezeře.

Následující konstanty a, b, e, f, g, h jsou odečteny z grafů (Příloha č.5 a č.6)

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

$$a = 1,17$$

$$b = 0,88$$

$$C_1 = a \cdot b = 1,17 \cdot 0,88 = 1,0296 \quad (2.68)$$

$$F_{d1} = C_{d1} \cdot F'_a = 0,8775 \cdot 10\,375 = 9\,104 \text{ A} \quad (2.69)$$

$$F_{q1} = C_{q1} \cdot F'_a = 0,4155 \cdot 10\,375 = 4\,311 \text{ A} \quad (2.70)$$

kde:

$$C_{d1} = e \cdot f = 0,8125 \cdot 1,08 = 0,8775 \quad (2.71)$$

$$C_{q1} = g \cdot h = 1,5 \cdot 0,277 = 0,4255 \quad (2.72)$$

$$\text{pro: } \frac{\delta_{max}}{\delta} = 1,5; \quad \frac{\delta}{t_p} = \frac{0,012}{0,49} = 0,0245; \quad \alpha = 0,65$$

[2] [3]

2.4.4 Dimenzování magnetického obvodu

výška pólu:

$$h_p = 0,3 \cdot t_p = 0,3 \cdot 0,49 = 0,147 \text{ m} \quad (2.73)$$

výška nástavce:

$$h_n = 0,1 \cdot t_p = 0,1 \cdot 0,49 = 0,049 \text{ m} \quad (2.74)$$

šířka pólu:

$$b_p = \frac{(1+\nu) \cdot \Phi}{B_p \cdot L_p} = \frac{(1+0,2) \cdot 0,1184}{1,5 \cdot 0,5478} = 0,175 \text{ m} \quad (2.75)$$

šířka pólového nástavce:

$$b_n = \alpha \cdot t_p = 0,65 \cdot 0,49 = 0,3185 \text{ m} \quad (2.76)$$

kde ν je předpokládaná poměrná hodnota mezipólového rozptylového toku

a délka pólu $L_p = L$ (je stejná jako celková délka induktu, tedy včetně radiálních ventilačních kanálů)

výška jha rotoru:

$$h_{jr} = \frac{(1+\nu) \cdot \Phi}{2 \cdot B_{jr} \cdot L_r} = \frac{(1+0,2) \cdot 0,1184}{2 \cdot 1,1 \cdot 0,6778} = 0,0969 \text{ m} \quad (2.77)$$

kde B_{jr} je zvolená hodnota magnetické indukce ve jhu rotoru

L_r délka rotoru, proti délce pólu zvětšená s ohledem na prostor pro dosednutí budící cívky

$$L_r = L_p + 2 \cdot b_c = 0,5478 + 2 \cdot 0,065 = 0,6778 \text{ m}$$

výška jádra induktu:

$$h_{js} = \frac{\Phi}{2 \cdot B_{js} \cdot k_{Fe} \cdot l_e} = \frac{0,1184}{2 \cdot 1,3 \cdot 0,92 \cdot 0,4678} = 0,1059 \text{ m} \quad (2.78)$$

Délky středních siločar částí magnetického obvodu:

pól:

$$l_p = h_p + h_n = 0,147 + 0,049 = 0,196 \text{ m} \quad (2.79)$$

jho rotoru:

$$l_r = \frac{\pi \cdot [D_1 - 2 \cdot (\delta + h_p + h_n)]}{4 \cdot p} = \frac{\pi \cdot [1,25 - 2 \cdot (0,012 + 0,147 + 0,049)]}{4 \cdot 4} = 0,1638 \text{ m} \quad (2.80)$$

jádro induktu:

$$l_s = \frac{\pi \cdot [D_1 + 2 \cdot (h_d + h_{js})]}{4 \cdot p} = \frac{\pi \cdot [1,25 + 2 \cdot (0,109 + 0,1059)]}{4 \cdot 4} = 0,33 \text{ m} \quad (2.81)$$

[2] [3]

2.4.5 Charakteristika naprázdno

Carterův činitel respektující vliv drážkování induktu

$$\frac{b_0}{z_1} = \frac{17,5}{18,86} = 0,928 \quad b_0 = b_d \quad \text{platí pro otevřenou drážku}$$

$$\frac{b_0}{\delta} = \frac{17,5}{12} = 1,458$$

Z nomogramu - $k_{cd} = 1,13$ (Příloha č. 7)

Carterův činitel respektující vliv radiálních ventilačních kanálů k_{ck} :

$$k_{ck} = \frac{1}{1 + \frac{\delta}{2 + \delta} \cdot \frac{\check{s}_k \cdot i}{l_e}} = \frac{1}{1 + \frac{12}{2 + 12} \cdot \frac{10 \cdot 9}{467,8}} = 0,858 \quad (2.82)$$

Kde \check{s}_k je šířka radiálního kanálu

i počet paketů

Výsledná hodnota Carterova činitele:

$$k_c = k_{cd} \cdot k_{ck} = 1,13 \cdot 0,858 = 0,97 \quad (2.83)$$

Magnetické napětí na vzduchové mezeře:

$$F_\delta = 0,8 \cdot k_c \cdot \delta \cdot B_\delta \cdot 10^6 = 0,8 \cdot 0,97 \cdot 0,012 \cdot 0,81 \cdot 10^6 = 7543 \text{ A} \quad (2.84)$$

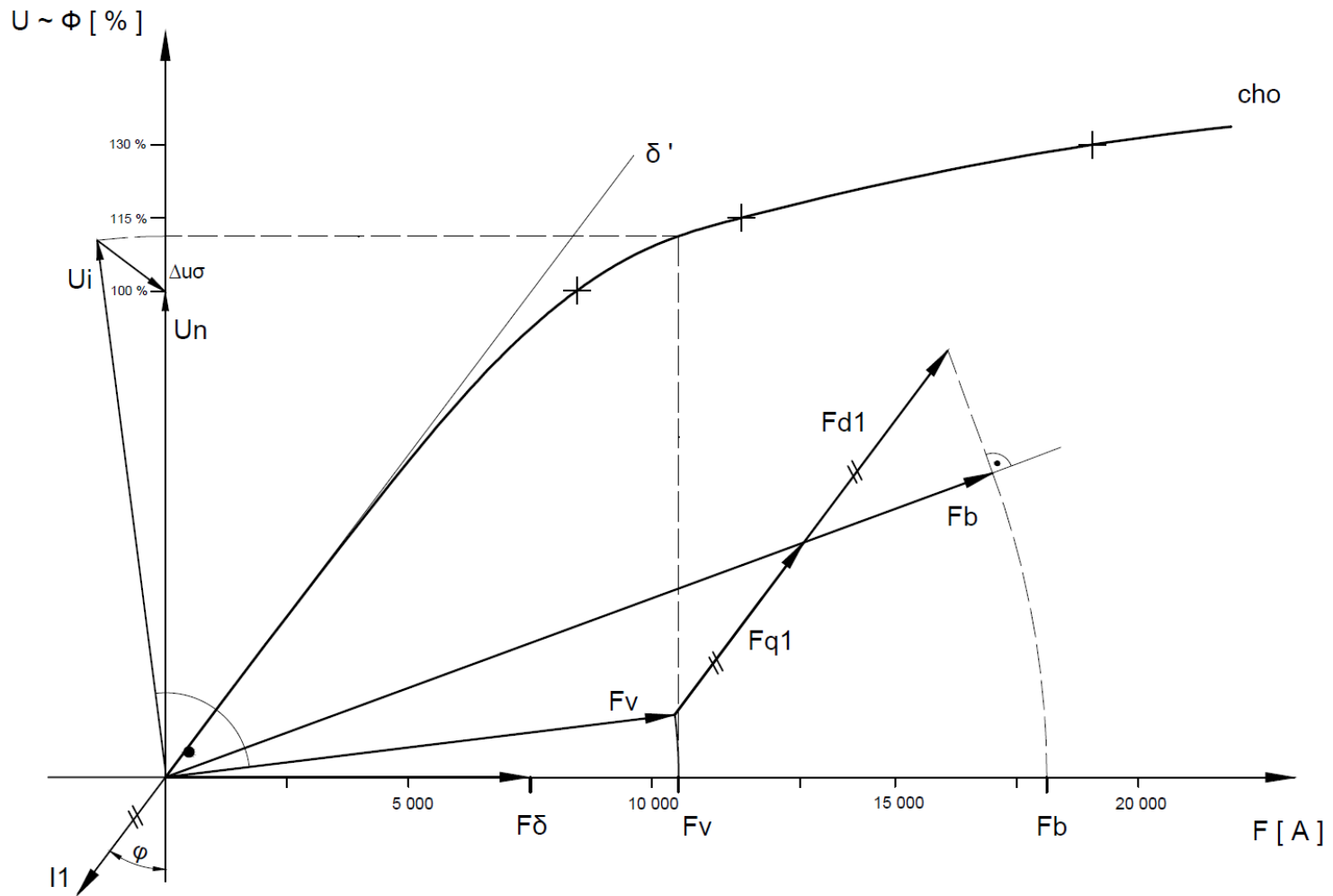
Výpočet charakteristiky naprázdno je proveden v tabulkách uvedených níže.

D_1	$D_1= 1250$	$t_{d1}= 36,4$	$z_1= 18,9$	$k_{z1}= 1,093$	$B'_{z1}= 1,69$	$B_{z1}= 1,675$	$H_{z1}= 5\ 400$	$H_{zstr}= 3\ 300$	$F_z= 359,7$								
$D_2=D_1\pm h_d$	$D_2= 1359$	$t_{d2}= 38,53$	$z_2= 21,03$	$k_{z2}= 0,99$	$B'_{z2}= 1,61$	$B_{z2}= 1,6$	$H_{z2}= 3\ 200$										
$D_3=D_1\pm 2h_d$	$D_3= 1468$	$t_{d3}= 42,7$	$z_3= 25,2$	$k_{z3}= 0,84$	$B'_{z3}= 1,5$	$B_{z3}= 1,5$	$H_{z3}= 1\ 600$										
k_1	1,15	i=1, 2, 3 + stator	$t_{di} = \frac{\pi \cdot D_i}{Q}$	$z_i = t_{di} - b_d$	$k_{zi} = \frac{t_{di}}{z_i \cdot k_{fe}} - 1$	$B'_{zi} = \frac{B_\delta \cdot t_{d1}}{z_i \cdot k_{Fe}}$	$H_{str} = \frac{H_{z1} + 4 \cdot H_{z2} + H_{z3}}{6}$	$F_z = H_{str} \cdot h_d$	$k_1 \cdot \phi$	$B'_{z1}= 1,94$	$B_{z1}= 1,9$	$H_{z1}= 18\ 000$	$H_{zstr}= 12\ 750$	$F_z= 1\ 384$			
k_2										1,3	- rotor	$k_2 \cdot \phi$			$B'_{z2}= 1,85$	$B_{z2}= 1,83$	$H_{z2}= 13\ 000$
															$B'_{z3}= 1,73$	$B_{z3}= 1,72$	$H_{z3}= 6\ 500$
									$B'_{z1}= 2,2$	$B_{z1}= 2,07$	$H_{z1}= 40\ 000$	$H_{zstr}= 31\ 500$	$F_z= 3\ 433$				
									$B'_{z2}= 2,1$	$B_{z2}= 2,03$	$H_{z2}= 32\ 000$						
									$B'_{z3}= 1,95$	$B_{z3}= 1,93$	$H_{z3}= 21\ 000$						

Tabulka 2.6: Magnetizační charakteristika zubové vrstvy

			ϕ			$k_1 \cdot \phi$			$k_2 \cdot \phi$			
			B	H	F	B	H	F	B	H	F	
Vzduch. Mezera	δ [m]=	0,012	0,81		7 543			8 675			9 806	
Zuby	Hlava	$k_{z1} = 1,11$	$B_{z'1}$	1,69	5 400		1,94	18 000		2,2	40 000	
			B_{z1}	1,675			1,9			2,07		
	Střed	$k_{z2} = 0,97$	$B_{z'2}$	1,61	3 200		1,85	13 000		2,1	32 000	
			B_{z2}	1,6			1,83			2,03		
	Pata	$k_{z3} = 0,86$	$B_{z'3}$	1,5	1 600		1,73	6 500		1,95	21 000	
B_{z3}			1,5			1,72			1,93			
Střed. hodnota		$h_z =$	0,109		3 300	359,7		12 750	1 384		31 500	3 433
Jádro induktu		$l_s =$	0,33	1,3	650	214,5	1,495	1 590	525	1,69	6 250	2 062
Pól		$l_p =$	0,196	1,5	1 600	313,6	1,725	7 500	1 470	1,95	23 000	4 508
Jho		$l_r =$	0,1638	1,1	460	75,35	1,265	550	90	1,43	1 090	178,5
$\Sigma F = F_\delta + F_z + F_{ji} + F_p + F_j$					8 506			12 144			19 987	

Tabulka 2.7: Magnetizační charakteristika celého magnetického obvodu



Obrázek 2.4: Charakteristika naprázdno

Grafickým postupem (z Charakteristiky naprázdno, Obr. 2.4) jsem zjistil velikost budícího magnetického napětí pro jmenovité zatížení a účinník:

$$F_b = 18\,000\text{ A}$$

[2] [3]

2.5 Návrh budícího vinutí

Předběžná střední délka závitu budící cívky (za předpokladu, že šířka cívky i s kostříčkou bude rovna velikosti přečnávajícího pólového nástavce přes tělo pólu):

Přesahující část pólového nástavce:

$$a = \frac{b_n - b_p}{2} = \frac{0,3185 - 0,175}{2} = 0,07165\text{ m} \rightarrow 71,7\text{ mm} \quad (2.85)$$

Při tloušťce kostříčky budící cívky $t_k = 6\text{ mm}$ zbývá pro šířku cívky $65,7\text{ mm}$, nemá-li cívka přesahovat přes pólový nástavec.

Střední délka závitu cívky:

$$l_{bs} = 2 \cdot (L_p + b_p + 2 \cdot a) = 2 \cdot (0,5478 + 0,175 + 2 \cdot 0,0717) \quad (2.86)$$

$$l_{bs} = 1,73\text{ m}$$

Pro menší průřez vodiče budící cívky, kdy bude cívka vícepolohová. Volíme proto budící napětí:

$$U_b = 115\text{ V}$$

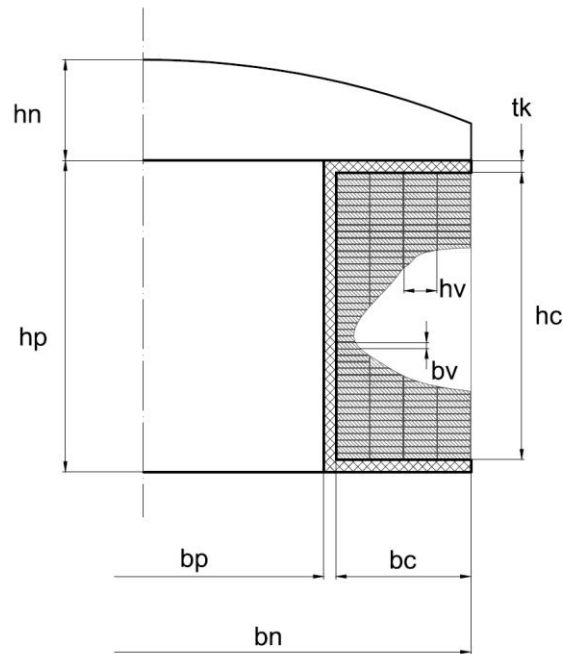
Průřez vodiče budící cívky:

$$S'_{Cub} = \frac{\rho_{Cu} \cdot l_{bs} \cdot 2p \cdot F_b}{0,9 \cdot U_b} = \frac{\frac{1}{56} \cdot 1,73 \cdot 8 \cdot 18\,000}{0,9 \cdot 115} = 42,98\text{ mm}^2 \quad (2.87)$$

Vodič má rozměr: holý / izolovaný, tedy $h_v \times b_v / h_{vi} \times b_{vi}$.

Podle ČSN volím vodič o rozměrech $16\text{ mm} \times 2,8\text{ mm} / 16,37 \times 3,17$

se skutečným průřezem: $S_{Cub} = 44,2\text{ mm}^2$



Obrázek 2.5: Pólová cívka

Budící proud:

$$I_b = \sigma_{Cub} \cdot S_{Cub} = 2,3 \cdot 44,2 = 101,66 \text{ A} \quad (2.88)$$

Počet závitů budící cívky:

$$N_b = \frac{F_b}{I_b} = \frac{18\,000}{101,66} = 177,06 \rightarrow 177 \quad (2.89)$$

Volím tloušťku kostříčky cívky: $t_k = 6 \text{ mm}$

Počet poloh cívky:

$$n'_p = \frac{a-t_k}{h_{vi}} = \frac{71,65-6}{16,37} = 4,01 \quad (2.90)$$

$$n_p = 4$$

Tloušťka cívky:

$$b_c = h_{vi} \cdot n_p = 16,37 \cdot 4 = 65,48 \text{ mm} \quad (2.91)$$

Počet závitů v jedné poloze:

$$N'_{p1} = \frac{N_b}{n_p} = \frac{177}{4} = 44,25 \quad (2.92)$$

$$N_{p1} = 44$$

Výsledný počet závitů budící cívky:

$$N_b = N_{p1} \cdot n_p = 44 \cdot 4 = 176 \quad (2.93)$$

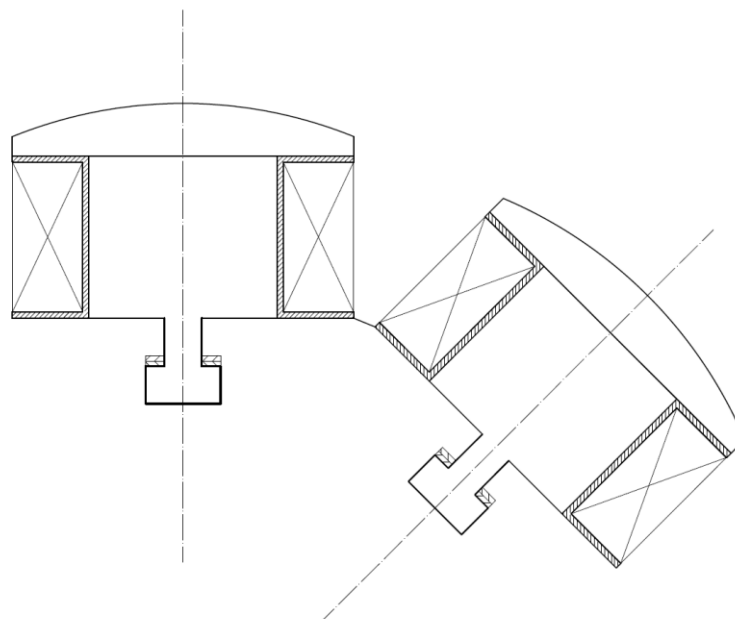
Výška budící cívky:

$$h_c = N_{p1} \cdot b_{vi} = 44 \cdot 3,17 = 139,48 \text{ mm} \quad (2.94)$$

Výška pólu:

$$h_p = h_c + 2 \cdot t_k = 139,48 + 2 \cdot 6 = 151,48 \text{ mm} \quad (2.95)$$

Po návrhu budící cívky je důležité zjistit, zda se navržená cívka vejde do mezipólového prostoru. Za tím účelem je třeba nakreslit v měřítku část příčného řezu, jak je uvedeno na obrázku. Osa mezipólového prostoru nesmí protínat cívky. Pokud by tato podmínka nebyla splněna, bylo by nutné navrhnout vícepolohovou cívku (zvýšit budící napětí U_b , aby se zmenšil průřez vodiče cívky), a tu provést odstupňovanou. [3]



Obrázek 2.6: Mezipólový prostor s budícími cívkami

2.5.1 Orientační výpočet oteplení pólové cívk

Vnější obvod budící cívk:

$$l_{be} = 2 \cdot [L_p + b_p + 4(b_c + t_k)] \quad (2.96)$$

$$l_{be} = 2 \cdot [0,5478 + 0,175 + 4 \cdot (0,06548 + 0,006)] = 2 \text{ m}$$

Střední obvod budící cívk:

$$l_{bs} = 2 \left[L_p + b_p + 4 \left(t_k + \frac{b_c}{2k} \right) \right] \quad (2.97)$$

$$l_{bs} = 2 \left[0,5478 + 0,175 + 4 \left(0,006 + \frac{0,06548}{2} \right) \right] = 1,76 \text{ m}$$

Ochlazovací povrch všech cívek:

$$O_{2pc} = h_c \cdot l_{be} \cdot 2p = 0,139 \cdot 2 \cdot 8 = 2,22 \text{ m}^2 \quad (2.98)$$

Odpor všech cívek budícího vinutí:

$$R_{b/75} = 1,22 \cdot \rho \cdot \frac{l_{bs} \cdot N_b \cdot 2p}{S_{Cub}} = 1,22 \cdot \frac{1}{56} \cdot \frac{1,76 \cdot 176 \cdot 8}{44,2} = 1,2 \Omega \quad (2.99)$$

Ztráty v budícím vinutí:

$$\Delta P_{Cub} = R_{b/75} \cdot I_b^2 = 1,2 \cdot 101,66^2 = 12\,401,707 \text{ W} \quad (2.100)$$

Oteplení cívk:

$$\Delta \vartheta_{Cubo} = \frac{1,18 \cdot \Delta P_{Cub}}{\alpha \cdot O_{2pc}} = \frac{1,18 \cdot 12\,401,707}{90 \cdot 2,22} = 73,24 \text{ }^\circ\text{C} \quad (2.101)$$

[2] [3]

2.6 Kroužky a kartáče

Pro přenos budícího proudu na rotor použijeme elektrografitové kartáče, pro které platí následující údaje:

Přechodové napětí	$u_{př}$	= 2,1 V
Maximální proudové zatížení	σ_k	= 10 A/cm ²
Maximální obvodová rychlost	v_o	= 40 m/s
Měrný tlak	p_k	= 18 kPa
Součinitel tření	μ	= 0,15

Celkový průřez kartáčů jedné polaroty:

$$S_k = \frac{I_b}{\sigma_k} = \frac{101,66}{10} = 10,166 \text{ cm}^2 \quad (2.102)$$

Podle doporučených rozměrů kartáčů (Příloha č. 9) volím rozměr $b_k \times l_k = 32 \times 16$ a tomu odpovídá průřez: $S_{k1} = 5,12 \text{ cm}^2$

kde b_k je rozměr v osovém směru stroje a určuje šířku kroužku

l_k rozměr v obvodovém směru

Počet kartáčů jedné polaroty na obvodu kroužku:

$$i_k = \frac{S_k}{S_{k1}} = \frac{10,166}{5,12} = 1,986 \rightarrow 2 \quad (2.103)$$

Volím počet kartáčů $i_k=2$ a počet kartáčů obou polarit je tedy

$$2 \cdot i_k = 2 \cdot 2 = 4.$$

V tomto případě budou dva kartáče jedné polaroty, na obvodu budou celkem 4 kartáče.

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

$$d_H = 0,135 \sqrt[3]{\frac{P_{kW}}{n}} = 0,135 \sqrt[3]{\frac{2000}{750}} = 0,187 \text{ m} \quad (2.104)$$

Vnější průměr kroužků budeme předpokládat: $D_k = 1,3d_H = 1,3 \cdot 0,187 = 0,2434 \text{ m}$.

$$(2.105)$$

Obvodová rychlost kroužků:

$$v_k = \frac{\pi \cdot D_k \cdot n_{max}}{60} = \frac{\pi \cdot 0,243 \cdot 900}{60} = 11,468 \text{ m/s} \quad (2.106)$$

Rychlost je menší než uvedená maximální hodnota.

$$\text{Rozteč kartáčů: } t_k = \frac{\pi D_k}{2i_k} = \frac{\pi \cdot 0,2434}{4} = 0,191 \text{ m.} \quad (2.107)$$

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

[2] [3]

2.7 Výpočet celkových ztrát

Jouleovy ztráty:

ve vinutí statoru:

$$\Delta P_{Cu1} = m \cdot R_{\frac{1}{75}} \cdot I_1^2 = 3 \cdot 0,461 \cdot 137,5^2 = 26\,132,13 \text{ W} \quad (2.108)$$

v budícím vinutí:

$$\Delta P_{Cub} = R_{Cub} \cdot I_b^2 = 1,2 \cdot 101,66^2 = 12\,401,7 \text{ W} \quad (2.109)$$

Ztráty v železe:

v jádře induktu:

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

hmotnost jádra statoru:

$$m_{Fej} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_{je}^2 - D_3^2) \cdot l_e \cdot k_{Fe} \cdot \rho_{Fe} = \frac{\pi}{4} \cdot (1,68^2 - 1,47^2) \cdot 0,4678 \cdot 0,92 \cdot 7800$$

$$m_{Fej} = 1\,744 \text{ kg} \quad (2.110)$$

Kde

$$D_{je} = D_1 + 2 \cdot (h_d + h_{js}) = 1,25 + 2 \cdot (0,109 + 0,1059) = 1,68 \text{ m} \quad (2.11)$$

je vnější průměr statoru

ztráty v jádře induktu (statoru):

$$\Delta P_{Fej} = 1,8 \cdot \Delta P_{Fe} \cdot B_{js}^2 \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} \cdot m_{Fej} = 1,8 \cdot 1,8 \cdot 1,3^2 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1,3} \cdot 1\,744$$

$$\Delta P_{Fej} = 9\,549\,W \quad (2.112)$$

v zubech statoru:

hmotnost zubů statoru:

$$m_{Fez} = Q \cdot z_2 \cdot h_d \cdot l_e \cdot k_{Fe} \cdot \rho_{Fe} = 108 \cdot 0,021 \cdot 0,109 \cdot 0,4678 \cdot 0,92 \cdot 7800$$

$$m_{Fez} = 830\,kg \quad (2.113)$$

Kde z_2 je střední šířka zubu (viz výpočet zubové vrstvy charakteristiky naprázdno)

h_d hloubka drážky

ztráty v zubech statoru:

$$\Delta P_{Fez} = 2 \cdot \Delta p_{Fe} \cdot B_{z2}^2 \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} \cdot m_{Fez} = 2 \cdot 1,8 \cdot 1,6^2 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1,3} \cdot 830$$

$$\Delta P_{Fez} = 7\,649\,W \quad (2.114)$$

Kde B_{z2} je mg. indukce ve středu zubu (viz výpočet zubové vrstvy charakteristiky naprázdno)

Povrchové ztráty:

$$\Delta P_p = \frac{\pi}{2} \cdot D_1 \cdot \alpha \cdot L_p \cdot k_0 \cdot \left(\frac{Q \cdot n}{10000}\right)^{1,5} \cdot (t_{d1} \cdot \beta \cdot 1000 \cdot B_\delta \cdot k_c)^2 \quad (2.115)$$

$$\Delta P_p = \frac{\pi}{2} \cdot 1,25 \cdot 0,65 \cdot 0,548 \cdot 2,8 \cdot \left(\frac{108 \cdot 750}{10000}\right)^{1,5} \cdot (0,0364 \cdot 0,125 \cdot 1000 \cdot 0,81 \cdot 0,97)^2$$

$$\Delta P_p = 577\,W$$

kde k_0, β jsou činitele povrchových ztrát (Příloha č.8) a k_c Carterův činitel.

Mechanické ztráty:

$$\Delta P_m = v^{2,5} \cdot D_1 \cdot \sqrt{l_e} = 49,1^{2,5} \cdot 1,25 \cdot \sqrt{0,4678} = 14\,443\,W \quad (2.116)$$

kde v je obvodová rychlost rotoru

$$v = \frac{\pi \cdot D_1 \cdot n}{60} = \frac{\pi \cdot 1,25 \cdot 750}{60} = 49,1\,m/s \quad (2.117)$$

Přídavné ztráty:

$$\Delta P_{\text{příd}} = 0,003 \cdot S = 0,003 \cdot 2500 \cdot 10^3 = 7\,500\text{W} \quad (2.118)$$

Celkové ztráty:

$$\Delta P = \Delta P_{Cu1} + \Delta P_{Cu2} + \Delta P_{Fej} + \Delta P_{Fez} + \Delta P_P + \Delta P_m + \Delta P_{\text{příd}} \quad (2.119)$$

$$\Delta P = (26\,132,13 + 12\,401,7 + 9\,549 + 7\,649 + 577 + 14\,443 + 7\,500)$$

$$\Delta P = 78\,252\text{W} = 78,3\text{ kW}$$

Účinnost:

$$\eta = 100 \cdot \left(1 - \frac{\Delta P}{P + \Delta P}\right) \quad (2.120)$$

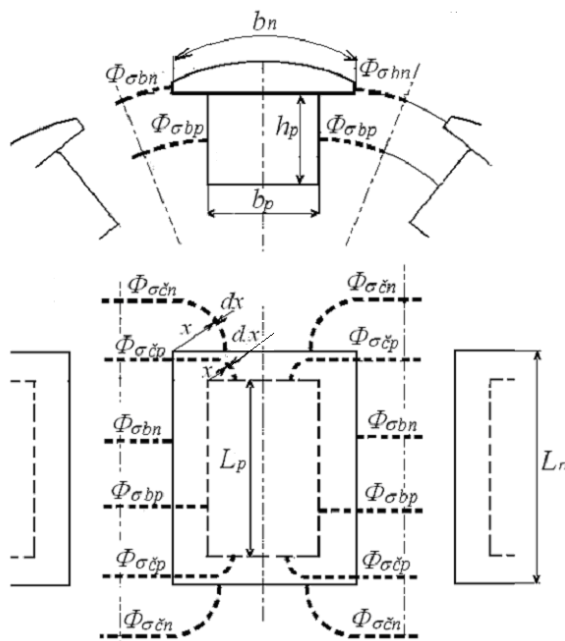
$$\eta = 100 \cdot \left(1 - \frac{78,3}{2\,000 + 78,3}\right)$$

$$\eta = 96,23\%$$

[2] [3]

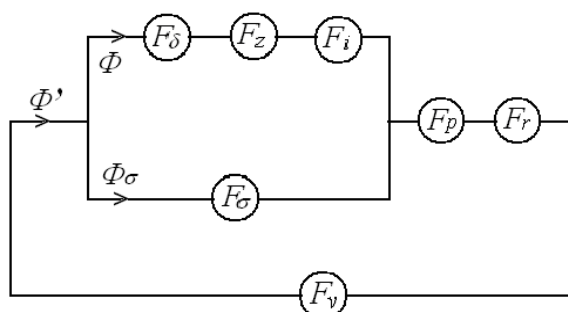
2.8 Mezipólový rozptyl

Kromě hlavního toku Φ , který prochází z pólu přes vzduchovou mezeru do zubu statoru a podílí se na indukovaném napětí, se vyskytuje i tzv. rozptylový tok Φ_σ , který se uzavírá mezi boky a čely sousedních pólů, včetně jejich nástavců, jak je znázorněno na obr. 2.7.



Obrázek 2.7: Mezipólový rozptyl mezi budícími cívkami [3]

Na obr. 2.8 je znázorněno uspořádání magnetického toku synchronního stroje, kde F_p a F_r jsou úbytky magnetického napětí na pólu a jhu rotoru, kudy protéká celkový magnetický tok Φ' .



Obrázek 2.8: Náhradní schéma magnetického toku synchronního stroje [3]

Rozptylový tok Φ_σ prochází paralelně s hlavním magnetickým tokem uzavírajícím se přes vzduchovou mezeru, zuby a jádrem induktu. Z tohoto schématu vyplývají vztahy:

$$\Phi' = \Phi_\sigma + \Phi = (1 + \nu) \cdot \Phi \quad (2.121)$$

kde $\Phi_\sigma = F_\sigma \cdot \Lambda_\sigma$

když magnetickém napětí na rozptylové vodivosti $F_\sigma = F_\delta + F_z + F_i$ (2.122)

a činitel rozptylu $\nu = \frac{\Phi_\sigma}{\Phi}$ (2.123)

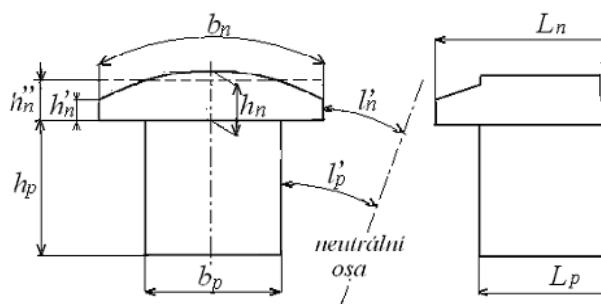
Nyní zbývá určit magnetickou vodivost mezipólového prostoru. Podle obr. 2.7 v indexu u jednotlivých rozptylových toků „ c “ odpovídá čelům a „ b “ bokům pólu. Celková rozptylová magnetická vodivost je dána součtem dílčích vodivostí:

$$\Lambda_\sigma = 2\Lambda_{\sigma bn} + 2\Lambda_{\sigma bp} + 4\Lambda_{\sigma cn} + 4\Lambda_{\sigma cp} \quad (2.124)$$

[2] [3]

2.8.1 Analytická metoda

Během řešení se využívají rozměrová označení, která se v předchozích početních úkonech nepoužívala, z tohoto důvodu přikládám názorný obrázek:



Obrázek 2.9: Rozměry mezipólového prostoru [3]

- l'_p vzdálenost od neutrální osy k boku pólu měřené na jeho střední výšce
- l'_n vzdálenost od neutrální osy k okraji pólového nástavce
- h'_n výška okraje pólového nástavce
- h''_n střední výšku pólového nástavce, která je rovna výšce obdélníka o stejné šířce ploše pólového nástavce

Výše uvedené rozměry jsem určil pomocí grafického odečtení z nákresu mezipólového prostoru, který je uveden na obr. 2.6.

Určené rozměry:

$$\begin{aligned}h'_n &= 0,018 \text{ m} \\h''_n &= 0,04025 \text{ m} \\l'_n &= 0,067 \text{ m} \\l'_p &= 0,108 \text{ m}\end{aligned}$$

Další rozměry:

$$\begin{aligned}L_p &= 0,5478 \text{ m} \\L_n &= 0,679 \text{ m} \\b_p &= 0,175 \text{ m} \\b_n &= 0,325 \text{ m} \\h_p &= 0,151 \text{ m}\end{aligned}$$

Rozptylová vodivost mezi boky pólových nástavců:

$$\Lambda_{\sigma bn} = \mu_0 \cdot \frac{h'_n \cdot L_n}{l'_n} = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{0,018 \cdot 0,679}{0,067} = 2,29 \cdot 10^{-7} \text{ H} \quad (2.125)$$

Rozptylová vodivost mezi boky pólů:

$$\Lambda_{\sigma bp} = \mu_0 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{h_p \cdot L_p}{l'_p} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}}{2} \cdot \frac{0,151 \cdot 0,5478}{0,108} = 4,81 \cdot 10^{-7} \text{ H} \quad (2.126)$$

Rozptylová vodivost mezi čely pólových nástavců:

$$\begin{aligned}\Lambda_{\sigma čn} &= \mu_0 \cdot \frac{2}{\pi} \cdot h''_n \cdot l_n \left(\frac{\pi \cdot b_n}{4 \cdot l'_n} + 1 \right) = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{2}{\pi} \cdot 0,041 \cdot l_n \left(\frac{\pi \cdot 0,325}{4 \cdot 0,067} + 1 \right) \\ \Lambda_{\sigma čn} &= 5,1 \cdot 10^{-8} \text{ H}\end{aligned} \quad (2.127)$$

Rozptylová vodivost mezi čely pólů:

$$\begin{aligned}\Lambda_{\sigma čp} &= \frac{\mu_0}{\pi} \cdot h_p \cdot l_n \left(\frac{\pi \cdot b_p}{4 \cdot l'_p} + 1 \right) = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}}{\pi} \cdot 0,151 \cdot l_n \left(\frac{\pi \cdot 0,175}{4 \cdot 0,108} + 1 \right) \\ \Lambda_{\sigma čp} &= 4,9 \cdot 10^{-8} \text{ H}\end{aligned} \quad (2.128)$$

Výsledná magnetická vodivost rozptylového toku:

$$\begin{aligned}\Lambda_{\sigma} &= 2 \cdot (\Lambda_{\sigma bn} + \Lambda_{\sigma bp} + 2 \cdot \Lambda_{\sigma čn} + 2 \cdot \Lambda_{\sigma čp}) \\ \Lambda_{\sigma} &= 2 \cdot (2,29 \cdot 10^{-7} + 4,81 \cdot 10^{-7} + 2 \cdot 5,1 \cdot 10^{-8} + 2 \cdot 4,9 \cdot 10^{-8}) \\ \Lambda_{\sigma} &= 1,82 \cdot 10^{-6} \text{ H}\end{aligned} \quad (2.129)$$

Magnetické napětí na rozptylové vodivosti:

$$F_{\sigma} = F_{\delta} + F_z + F_{ji} = 7\,543 + 369 + 215 = 8\,127 \text{ A}$$

Rozptylový magnetický tok:

$$\Phi_{\sigma} = F_{\sigma} \cdot \Lambda_{\sigma} = 8\,127 \cdot 1,83 \cdot 10^{-6} = 0,0148 \text{ Wb}$$

Celkový magnetický tok:

$$\Phi' = \Phi + \Phi_{\sigma} = 0,1184 + 0,0148 = 0,133 \text{ Wb}$$

Činitel rozptylu:

$$v = \frac{\Phi_{\sigma}}{\Phi} \cdot 100 = \frac{0,0148}{0,1184} \cdot 100 = 12,5 \text{ \%}$$

[2] [3]

2.8.2 Metoda konečných prvků

Pro metodu konečných prvků se používají výpočetní programy. Pro řešení tohoto problému byl zvolen program FEMM. Samotný výpočet předchází vytvoření mezipólového prostoru s danými rozměry a zvolení typu problému. Zde byl vybrán "magnetický problém". Pro moje potřeby jsem vybral řešení v rovině, za hlavní rozměr jsem zvolil milimetry a hloubku úlohy odpovídající délce induktu. Po vytvoření požadované geometrie jsem nadefinoval okrajové podmínky, v mém případě jsem zvolil nulový magnetické potenciál.

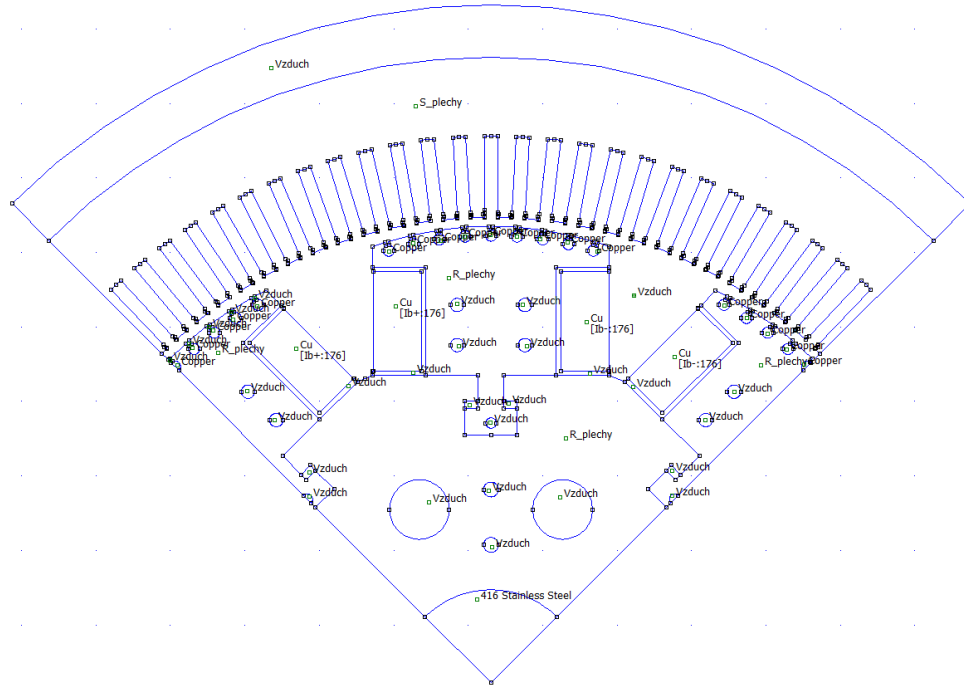
Dále jsem nastavil materiály. Byly zvoleny čtyři materiály - měď na vinutí cívky a tlumiče, ocel pro hřídel, ocel pro jha rotoru i statoru a vzduch. Mědi byla přiřazena elektrická vodivost $\sigma = 57 \text{ S/m}$. Typ oceli je uvažován M350-50A s patřičnou B-H závislostí (Příloha č. 10), včetně toho, aby se jednalo o plech s tloušťkou $0,5 \text{ mm}$ s daným činitelem plnění železa k_{Fe} pro stator a rotor.

Nastavený budící proud naprázdno procházející cívkou:

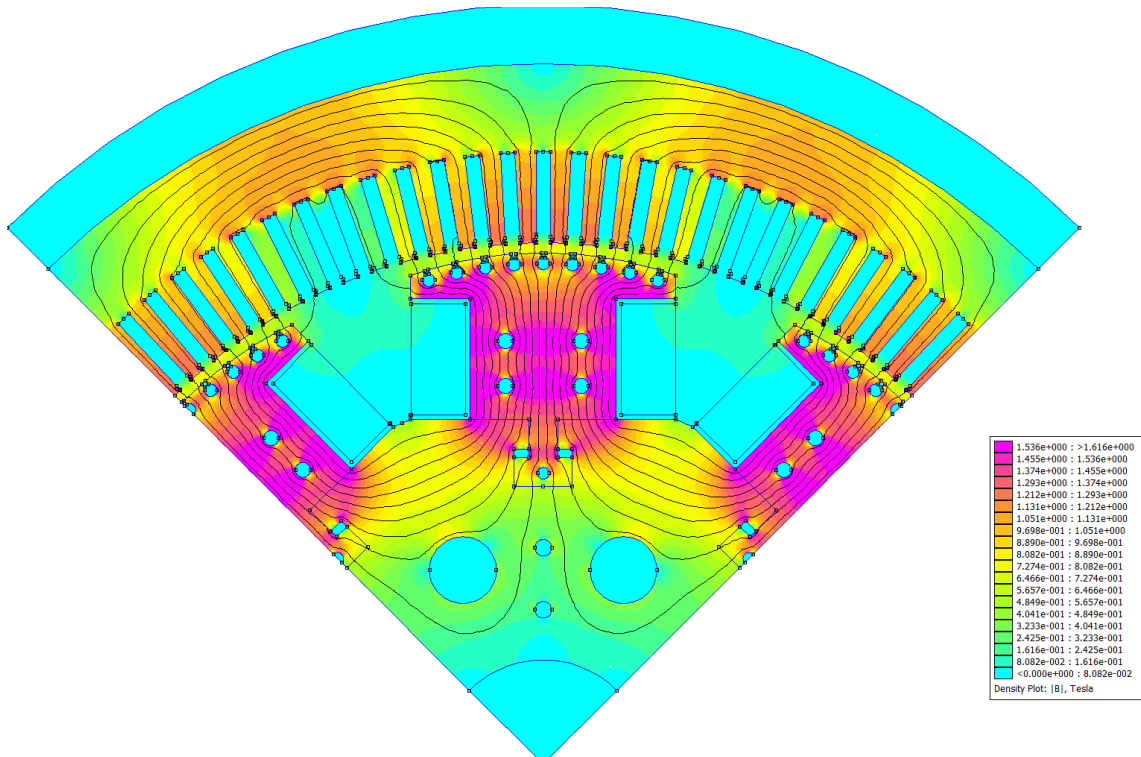
$$I_{bo} = \frac{F_n}{F_b} \cdot I_b = \frac{8\,506}{18\,000} \cdot 101,6 = 48 \text{ A} \quad (2.130)$$

Nastavený počet závitů budící cívky:

$$N_b = 176$$



Obrázek 2.10: Geometrie s přiřazenými materiály



Obrázek 2.11: Průběh magnetické indukce

Odečtené hodnoty:

Hlavní magnetický tok: $\Phi = 0,04952448 \text{ Wb}$

Rozptylový magnetický tok: $\Phi_{\sigma} = 0,00482874 \text{ Wb}$

Činitel rozptylu:

$$v = \frac{\phi_{\sigma}}{\phi} = \frac{0,00482874}{0,04952448} = 0,0975 \Rightarrow \mathbf{9,75 \%}$$

[3]

2.8.3 Analytická verze upravená pro potřeby porovnání s MKP

Abychom mohli porovnat výsledky rozptylu, musíme upravit rovnici pro celkovou magnetickou vodivost. Metoda MKP je kreslena v rámci zjednodušení rovinnými souřadnicemi, nebudou se moci zohledňovat čela pólů i pólových nástavců. Řešením je rovnici jednoduše zbavit magnetických rozptylových vodivostí týkající se čel.

Upravená rovnice má tvar:

$$\Lambda_{\sigma} = 2\Lambda_{\sigma bn} + 2\Lambda_{\sigma bp} \quad (2.131)$$

po dosazení dostaneme:

$$\Lambda_{\sigma} = 2 \cdot (2,29 \cdot 10^{-7} + 4,81 \cdot 10^{-7}) = 14,2 \cdot 10^{-7} \text{ H}$$

Magnetické napětí na rozptylové reaktanci zůstává stejné, přepočtený rozptylový magnetický tok nyní vychází:

$$\Phi_{\sigma} = F_{\sigma} \cdot \Lambda_{\sigma} = 8127 \cdot 14,2 \cdot 10^{-7} = 11,5 \cdot 10^{-3} \text{ Wb} \quad (2.131)$$

Upravený činitel rozptylu:

$$v = \frac{\phi_{\sigma}}{\phi} = \frac{5,77 \cdot 10^{-3}}{0,1184} = 0,09747 \Rightarrow \mathbf{9,747 \%}$$

Výsledné hodnoty vypočtené pomocí MKP se liší od analytického řešení upraveného pro potřeby MKP velmi nepatrně, a to o **0,003 %**.

[2] [3]

2.9 Výpočet tlumícího (rozběhového) vinutí

Tlumící vinutí se používá v synchronních alternátorech k zeslabení zpětné točivé složky pole při nesouměrném zatížení k tlumení kývání rotoru, k zamezení dynamických přetížení při nesouměrném zkratu a ke zvýšení dynamické stability stroje. V synchronních motorech je rozběhové vinutí nezbytné pro asynchronní spouštění a k tlumení kývání rotoru. Toto vinutí se ukládá do drážek v pólových nástavcích rotoru a je vyrobeno z mědi nebo mosazi. Tyče mají kruhový průřez. [4]

Průřez tyče:

$$S_t = \frac{(0,15 \text{ až } 0,35) t_p A}{N_t J_1} = \frac{0,2 \cdot 0,49 \cdot 52 \cdot 925,9}{9 \cdot 4 \cdot 10^6} = 1,44 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \quad (2.133)$$

Průměr tyče tlumícího vinutí:

$$d_t = 1,13 \cdot \sqrt{S_t} = 1,13 \cdot \sqrt{1,44 \cdot 10^{-4}} = 0,014 \text{ m} \quad (2.134)$$

Drážková rozteč na rotoru:

$$t_{d2} = \frac{b_{pn} - d_t - 2z}{N_t - 1} = \frac{0,319 - 0,014 - 2 \cdot 0,005}{9 - 1} = 0,037 \text{ m} \quad (2.135)$$

kde N_t je počet tyčí na pólu stroje a volí se v rozmezí 5 až 10, z je vzdálenost mezi krajní tyčí, resp. drážkou a okrajem pólového nástavce. Obvykle bývá $z \geq (0,3 \text{ až } 0,7) \cdot 10^{-2} \text{ m}$.

Tlumící vinutí kromě své hlavní funkce snižuje amplitudy vyšších harmonických magnetického pole, vyvolaných drážkováním statoru.

V alternátorech je pro zmenšení přídavných ztrát a deformace křivky elektromotorického napětí žádoucí volit drážkovou rozteč na rotoru t_{d2} pokud možno blízkou k drážkové rozteči statoru t_{d1} . [4]

Jestliže počet drážek na pól a fázi statoru $q \leq 9$, pak musí být splněna podmínka:

$$0,8t_{d1} < t_{d2} < t_{d1}$$

$$0,032 < 0,037 < 0,04$$

Výše uvedená podmínka je splněna.

Drážky na rotoru se volí podle tvaru tyčí kruhové, tvaru K .

Průměr drážky:

$$d_d = d_t + (0,1 \text{ až } 0,2) = 14 + 0,2 = 14,2 \text{ mm} \quad (2.136)$$

Šířka otevření drážky:

$$b_0 = 3 \text{ mm}$$

Výška krčku:

$$h_0 = 2 \text{ mm}$$

Délka tyče:

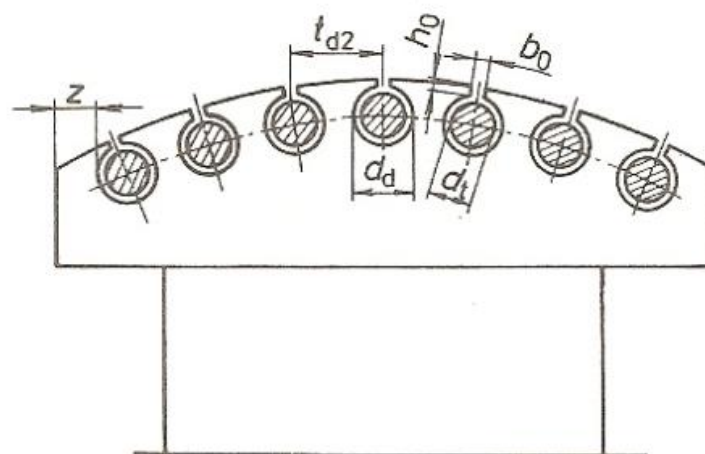
$$l_t = l_{pn} + (0,2 \text{ až } 0,4)t_p = 0,686 + 0,3 \cdot 0,49 = 0,83 \text{ m} \quad (2.137)$$

Průřez segmentu nakrátko:

$$S_{sek} = b_{sek} \cdot h_{sek} = (0,85 \text{ až } 1,15)0,5N_t S_t = 1 \cdot 0,5 \cdot 9 \cdot 1,44 \cdot 10^{-4}$$

$$S_{sek} = 648 \text{ mm}^2 \quad (2.138)$$

Z vypočteného průřezu volím normalizovaný pás 65x10 mm. (Příloha č. 12)



Obrázek 2.12: Uložení vinutí na pólu [4]

[2][3][4]

3 Návrh přípevnění pólů stroje

U standardního uspořádání synchronních strojů jsou umístěny póly na rotoru a působí na ně především odstředivé síly. S ohledem na velikost těchto sil musí být zvolen vhodný způsob jejich přípevnění. Nejjednodušším provedením je přípevnění pomocí šroubů. To je možné při menších velikostech odstředivých sil, tedy u strojů s malými rozměry nebo u pomaluběžných strojů i strojů značných průměrů. Při větším namáhání už by se připevňovací šrouby s ohledem na rozměry jejich hlav nemusely na délku pólů vejít a je pak třeba zvolit jiný způsob přípevnění. Např. na rybinové drážky, nebo pomocí kladiv, což je výrobně jednodušší a používanější. Vyžaduje to ovšem dostatečně vysoké jho rotoru. Při velkých rozměrech kladiva a i s ohledem na výšku rotorového jha se provádí dvě nebo i tři kladiva na jednom pólu, umístěná vedle sebe. [3]

Připevňovací elementy pólu jsou namáhány především odstředivou silou těla pólu, pólového nástavce a budící cívky. S ohledem na velikost odstředivé síly lze zanedbat tíhu pólu a tečné síly působící na pól. [3]

Velikost celkové odstředivé síly je:

$$\begin{aligned} F_p &= \omega_m^2 \cdot (m_p \cdot r_p + m_n \cdot r_n + m_c \cdot r_c) & (3.1) \\ F_p &= 94,24^2 \cdot (109,2 \cdot 0,488 + 82,6 \cdot 0,588 + 119,8 \cdot 0,529) \\ F_p &= 1\,467\,460 \text{ N} \rightarrow 1,47 \text{ MN} \end{aligned}$$

kde r_p , r_c , r_n jsou vzdálenosti od středu rotoru k těžišti jednotlivých částí.
maximální hodnota úhlové rychlosti:

$$\omega_m = \frac{\pi}{30} \cdot n_m = \frac{\pi}{30} \cdot 900 = 94,24 \text{ rad/s} \quad (3.2)$$

$$n_{max} = 1,2 \cdot 750 = 900 \text{ ot/min}$$

hmotnost cívky:

$$\begin{aligned} m_c &= \rho_{cu} \cdot l_{bs} \cdot S_{cub} \cdot N_b = 8900 \cdot 1,73 \cdot 44,2 \cdot 10^{-6} \cdot 176 & (3.3) \\ m_c &= 119,8 \text{ kg} \end{aligned}$$

hmotnost pólu:

$$m_p = \rho_{Fe} \cdot V_p = 7800 \cdot 0,014 = 109,2 \text{ kg} \quad (3.4)$$

kde V_p je objem pólu:

$$V_p = b_p \cdot l_p \cdot h_p = 0,175 \cdot 0,5478 \cdot 0,147 = 0,014 \text{ m}^3 \quad (3.5)$$

hmotnost pólového nástavce:

$$m_n = \rho_{Fe} \cdot V_n = 7800 \cdot 10,59 \cdot 10^{-3} = 82,6 \text{ kg} \quad (3.6)$$

kde V_n je objem pólového nástavce:

$$\begin{aligned} V_n &= b_n \cdot l_n \cdot h_n = 0,3185 \cdot 0,679 \cdot 0,049 = 10,59 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \\ l_n &= L_p + 2a = 0,5478 + 2 \cdot 0,07165 = 0,679 \text{ m} \end{aligned} \quad (3.7)$$

Výpočet namáhání kladiva je proveden na jednotku délky pólu, a tak i síla F_l na je vztažena na jednotkovou délku, tedy:

$$F_1 = \frac{F_p}{L_p} > 2 \text{ až } 2,5 \cdot 10^6 \text{ N/m}$$

kde L_p je délka pólu.

$$F_1 = \frac{1\,467\,460}{0,5478} = 2,7 \cdot 10^6 \text{ N/m}$$

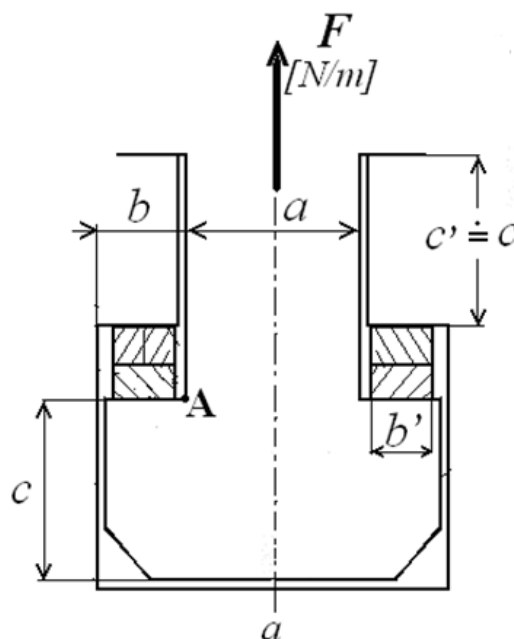
[2] [3]

3.1 Připevnění pomocí kladiva

Pokud je namáhání od odstředivých sil příliš veliké, zpravidla $F > (2 \div 2,5) 10^6 \text{ N/m}$, použije se připevnění pólů pomocí kladiv. Při použití kladiva se vychází z určení šířky krčku a , který je namáhán na tah a použije se vztahu:

$$a = \frac{F}{\sigma_{dov}} \quad (3.9)$$

Od rozměru šířky krčku a se určí další rozměry, jak je patrné z přiloženého obrázku.



Obrázek 3.1: Rozměry kladiva [2]

Kontrola kombinovaného namáhání se provede s použitím vztahu:

$$\sigma_{c \max} = \frac{F}{c} \left[\frac{3b}{4c} + \sqrt{1 + \left(\frac{3b}{4c} \right)^2} \right] \quad (3.10)$$

$$a = 0,035 \text{ m}$$

$$b \sim 0,5 \cdot a = 0,0175 \text{ m}$$

$$c \doteq 0,035 \text{ m}$$

$$\sigma_{c \max} = \frac{2,7 \cdot 10^6}{0,035} \left[\frac{3 \cdot 0,0175}{4 \cdot 0,035} + \sqrt{1 + \left(\frac{3 \cdot 0,0175}{4 \cdot 0,035} \right)^2} \right]$$

$$\sigma_{c \max} = 113 \text{ MPa}$$

Pro výsledné namáhání $\sigma_{c \max}$ musí být splněna podmínka:

$$\sigma_{c \max} \leq \sigma_{dov}$$

Velikost dovoleného namáhání se volí podle použitého materiálu pólu:

$$\sigma_{dov} = (100 \div 130) \text{ MPa} \quad (3.11)$$

$$113 \leq 120 \text{ MPa}$$

Pro výše zvolené rozměry kladiva je podmínka namáhání splněna.

[2] [3]

4 Výpočet oteplení statoru a pólové cívky

4.1 Tepelné obvody

Účelem tepelných výpočtů je zjistit střední, resp. i maximální oteplení vybraných částí stroje. Nejvíce nás zajímají ty části, které jsou v bezprostředním styku s izolací. Toto oteplení nesmí přesáhnout hodnotu, která odpovídá tepelné odolnosti použité izolace. V případě jejího překročení je třeba upravit ventilační systém, nebo snížit ztráty v příslušné části. To ovšem vede k menšímu využití stroje a znamená to například větší rozměry a tedy i vyšší cenu. [2]

Podle tepelné odolnosti jsou izolační materiály zařazeny do jednotlivých tříd, jak je uvedeno v tabulce níže.

Teplota - je stav daného místa nebo objektu, který zjistíme pomocí čidla, jako je dotykový teploměr, termočlánek, termistor, apod. [2]

Oteplení - je rozdíl teplot, nejčastěji se tím rozumí teplota nad teplotou okolí. Teplota vinutí se ve většině případů zjišťuje z přírůstku elektrického odporu a tím se určí střední hodnota teploty vodičů, která se může lišit od maximální, respektive minimální teploty o $5 \div 10^\circ\text{C}$. Když se zjišťuje nebo počítá oteplení nějaké části stroje, udává se teplota okolí $\vartheta_0 = 0$. Získaná hodnota oteplení $\Delta\vartheta$ se porovnává s doporučenou hodnotou použité izolace. Teplota se udává ve $^\circ\text{C}$ nebo v K, zatímco u oteplení na této volbě nezáleží, jelikož se jedná o rozdíl teplot. [2]

Třída	Max. teplota [$^\circ\text{C}$]	Max. oteplení [$^\circ\text{C}$]	Materiál
Y	90	45	Organické látky neimpregnované (papír, bavlna, hedvábí, apod.)
A	105	60	Organické látky třídy A, impregnované (ponořené v oleji nebo napuštěné podobnou, nejčastěji organickou látkou)
E	120	75	Folie na bázi polyetyléntereftalátu
B	130	80	Anorganické látky (slída, skelné tkaniny) spojované laky ba bázi většinou přírodních pryskyřic (šelak, asfalt,...)
F	155	105	Anorganické látky spojované většinou syntetickými laky a pryskyřicemi
H	180	130	Anorganické látky s pojivy na bázi silikonových laků a pryskyřic
C	Nad 180	Nad 130	Anorganické látky (slída, sklo, porcelán, ...)

Tabulka 4.1: Maximální teplota a oteplení pro jednotlivé druhy izolací [2]

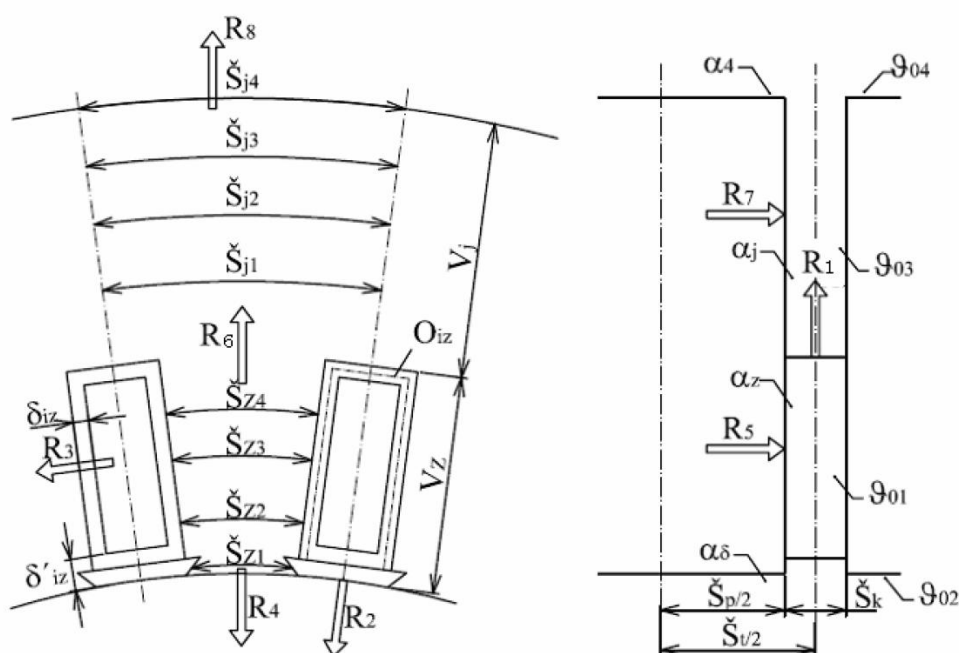
Při použití elektroanalogie jsou náhradní tepelné obvody ekvivalentní s elektrickými obvody se soustřednými parametry, a lze pro ně proto aplikovat obdobné zákony, především Ohmův zákon a oba Kirchhoffovy zákony. [2]

[2] [5]

4.2 Výpočet oteplení induktu

4.2.1 Výpočet oteplení v drážkové části vinutí

Následující výpočet je proveden pro indukt na statoru. Z celého induktu jsem si vymezil co nejmenší úsek tak, aby u všech ostatních byly stejné tepelné a chladicí podmínky. Jedná se o úsek příslušný jedné drážkové rozteči a polovině rozteče radiálního kanálu. Při tomto výběru musím určit ztráty, které ve vymezeném úseku vznikají. V tomto výpočtu neuvažuji tepelné spojení mezi drážkovou částí a čely vinutí. Výpočet oteplení čel vinutí jsem provedl samostatně. [2]



Obrázek 4.1: Vymezený úsek induktu stroje [2]

Ztráty v drážkové části vinutí:

$$\Delta P_{Cud} = \Delta P_{Cu1} \frac{l_d}{l_{celk}} = 26\,132,13 \cdot \frac{0,548}{1,4} = 10\,229 \text{ W} \quad (4.1)$$

$$l_d = 0,5478 \text{ m}$$

$$l_{\xi} = 0,857 \text{ m}$$

$$l_{celk} = l_d + l_{\xi} = 0,5478 + 0,857 = 1,4 \text{ m} \quad (4.2)$$

Ztráty v čelech vinutí:

$$\Delta P_{Cu\check{c}} = \Delta P_{Cu1} \frac{l_{\xi}}{l_{celk}} = 26\,132,13 \cdot \frac{0,857}{1,4} = 15\,997 \text{ W} \quad (4.3)$$

kde ΔP_{Cu1} jsou Jouleovy ztráty ve vinutí induktu
 $l_{celk} = l_d + l_{\xi}$ je délka půlzávitu vodiče cívky induktu

Ztráty ve vymezeném úseku:

Ztráty v mědi v jedné drážce statorového vinutí:

$$\Delta P_{Cud1} = \frac{\Delta P_{Cud} + \Delta P_{př}}{2Q_c(i+1)} = \frac{10\,229 + 7500}{2 \cdot 108 \cdot (8+1)} = 9,12 \text{ W} \quad (4.4)$$

Ztráty v jednom zubu statorového svazku:

$$\Delta P_{Fez1} = \frac{\Delta P_{Fez}}{2Q_c(i+1)} = \frac{7\,649}{2 \cdot 108 \cdot (8+1)} = 3,94 \text{ W} \quad (4.5)$$

Ztráty ve jhu statoru mezi dvěma následujícími zuby:

$$\Delta P_{Fej1} = \frac{\Delta P_{Fej}}{2Q_c(i+1)} = \frac{9\,549}{2 \cdot 108 \cdot (8+1)} = 4,9 \text{ W} \quad (4.5)$$

Kde:

$\Delta P_{př}$ jsou přídavné ztráty v drážkové části vinutí způsobené skinefektom

Q_c je počet čel, který je zpravidla stejný jako počet drážek induktu

i je počet radiálních ventilačních kanálů - počet paketů je $(i+1)$

Určení rozměrů úseků oteplení

Šířka izolace mezi vodičem a stěnou drážky

$$\delta_{iz} = \frac{b_d - b_v}{2} = \frac{17,5 - 9}{2} = 4,25 \text{ mm} \rightarrow 0,00425 \text{ m} \quad (4.6)$$

Šířka vzduchové mezery v dané izolaci

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

Šířka izolace mezi vzduchovou mezerou a vodičem

$$\delta'_{iz} = \delta_{iz} + klín + vložka = 0,00425 + 0,006 + 0,0005 = 0,011 \text{ m} \quad (4.7)$$

Obvod izolace v drážce

$$O_{iz} = (2 \cdot h_2 + b_d) \cdot 0,8 = (2 \cdot 102 + 17,5) \cdot 0,8 = 177 \text{ mm} \rightarrow 0,177 \text{ m} \quad (4.8)$$

Drážková rozteč v jednotlivých hladinách

$$\check{S}_{z1} = \frac{\pi \cdot D_1}{Q} - b_d = \frac{\pi \cdot 1,25}{108} - 0,0175 = 0,018861 \text{ m} \quad (4.9)$$

$$\check{S}_{z2} = \frac{\pi \cdot \left(D_1 + 2 \cdot \frac{h_d}{4} \right)}{Q} - b_d = \frac{\pi \cdot \left(1,25 + 2 \cdot \frac{0,109}{4} \right)}{108} - 0,0175 =$$

$$\check{S}_{z2} = 0,02 \text{ m} \quad (4.10)$$

$$\check{S}_{z3} = \frac{\pi \cdot \left(D_1 + 2 \cdot \frac{h_d}{2} \right)}{Q} - b_d = \frac{\pi \cdot \left(1,25 + 2 \cdot \frac{0,109}{2} \right)}{108} - 0,0175 =$$

$$\check{S}_{z3} = 0,022 \text{ m} \quad (4.11)$$

$$\check{S}_{z4} = \frac{\pi \cdot \left(D_1 + 2 \cdot \frac{3}{4} \cdot h_d \right)}{Q} - b_d = \frac{\pi \cdot \left(1,25 + 2 \cdot \frac{3}{4} \cdot 0,109 \right)}{108} - 0,0175 =$$

$$\check{S}_{z4} = 0,024 \text{ m} \quad (4.12)$$

$$\check{S}_{j1} = \frac{\pi \cdot \left(D_1 + 2 \cdot \frac{1}{4} \cdot h_{js} + 2 \cdot h_d \right)}{Q} = \frac{\pi \cdot \left(1,25 + 2 \cdot \frac{1}{4} \cdot 0,1059 + 2 \cdot 0,109 \right)}{108}$$

$$\check{S}_{j1} = 0,044 \text{ m} \quad (4.13)$$

$$\check{S}_{j2} = \frac{\pi \cdot \left(D_1 + 2 \cdot \frac{1}{2} \cdot h_{js} + 2 \cdot h_d \right)}{Q} = \frac{\pi \cdot \left(1,25 + 2 \cdot \frac{1}{2} \cdot 0,1059 + 2 \cdot 0,109 \right)}{108}$$

$$\check{S}_{j2} = 0,046 \text{ m} \quad (4.14)$$

$$\check{S}_{j3} = \frac{\pi \cdot \left(D_1 + 2 \cdot \frac{3}{4} \cdot h_{js} + 2 \cdot h_d \right)}{Q} = \frac{\pi \cdot \left(1,25 + 2 \cdot \frac{3}{4} \cdot 0,1059 + 2 \cdot 0,109 \right)}{108} =$$

$$\check{S}_{j3} = 0,04732 \text{ m} \quad (4.15)$$

$$\check{S}_{j4} = \frac{\pi \cdot (D_{je})}{Q} = \frac{\pi \cdot (1,68)}{108} = 0,049 \text{ m} \quad (4.16)$$

Měrná tepelná vodivost λ

Suchý vzduch při 20 °C

$$\lambda_{vzd} = 0,026 \text{ W/}^\circ\text{Cm}$$

Izolace třídy B (mikanit)

$$\lambda_{iz} = 0,3 \text{ W/}^\circ\text{Cm}$$

Plechový svazek v příčném směru

$$\lambda_{Feq} = 1 \text{ W/}^\circ\text{Cm}$$

Plechový svazek v podélném směru

$$\lambda_{Fed} = 40 \text{ W/}^\circ\text{Cm}$$

Součinitel přestupu tepla α

Ve vzduchové mezeře

$$\alpha_\delta = 120 \text{ W/}^\circ\text{Cm}^2$$

V zubové vrstvě radiálního ventilačního kanálu

$$\alpha_z = 100 \text{ W/}^\circ\text{Cm}^2$$

Ve jhu radiálního ventilačního kanálu

$$\alpha_j = 80 \text{ W/}^\circ\text{Cm}^2$$

Hřbet statorového svazku

$$\alpha_h = 60 \text{ W/}^\circ\text{Cm}^2$$

Čela statorového vinutí

$$\alpha_\xi = 90 \text{ W/}^\circ\text{Cm}^2$$

Výpočet tepelných odporů:

z vinutí do ventilačního kanálu:

$$R_1 = \frac{\delta_{iz}}{\lambda_{iz} O_{iz} \frac{\check{s}_k}{2}} + \frac{\delta_{vzd}}{\lambda_{vzd} O_{iz} \frac{\check{s}_k}{2}} + \frac{1}{\alpha_z O_{iz} \frac{\check{s}_k}{2}}$$

$$R_1 = \frac{0,00425}{0,3 \cdot 0,177 \cdot \frac{0,01}{2}} + \frac{0,0001}{0,026 \cdot 0,177 \cdot \frac{0,01}{2}} + \frac{1}{100 \cdot 0,177 \cdot \frac{0,01}{2}}$$

$$R_1 = 31,65 \text{ }^\circ\text{C/W} \quad (4.17)$$

z vinutí do vzduchové mezery:

$$R_2 = \frac{\delta_{iz}}{\lambda_{iz} \check{s}_d \frac{\check{s}_t}{2}} + \frac{\delta_{vzd}}{\lambda_{vzd} \check{s}_d \frac{\check{s}_t}{2}} + \frac{1}{\alpha_\delta \check{s}_d \frac{\check{s}_t}{2}}$$

$$R_2 = \frac{0,011}{0,3 \cdot 0,0175 \cdot \frac{0,06}{2}} + \frac{0,0001}{0,026 \cdot 0,0175 \cdot \frac{0,06}{2}} + \frac{1}{120 \cdot 0,0175 \cdot \frac{0,06}{2}}$$

$$R_2 = 89,37 \text{ } ^\circ\text{C/W} \quad (4.18)$$

z vinutí do zubu:

$$R_3 = \frac{\delta_{iz}}{\lambda_{iz} O_{iz} \frac{\check{s}_p}{2}} + \frac{\delta_{vzd}}{\lambda_{vzd} O_{iz} \frac{\check{s}_p}{2}} + \frac{\frac{\check{s}_{z3}}{2}}{3 \lambda_{Fel} O_{iz} \frac{\check{s}_p}{2}}$$

$$R_3 = \frac{0,00425}{0,3 \cdot 0,177 \cdot \frac{0,05}{2}} + \frac{0,0001}{0,026 \cdot 0,177 \cdot \frac{0,050}{2}} + \frac{\frac{0,022}{2}}{3 \cdot 40 \cdot 0,177 \cdot \frac{0,050}{2}}$$

$$R_3 = 4,1 \text{ } ^\circ\text{C/W} \quad (4.19)$$

ze zubu do vzduchové mezery:

$$R_4 = \frac{\frac{v_z}{2}}{3 \lambda_{Fel} \check{s}_{z2} \frac{\check{s}_p}{2}} + \frac{1}{\alpha_z \check{s}_{z1} \frac{\check{s}_p}{2}}$$

$$R_4 = \frac{\frac{0,109}{2}}{3 \cdot 40 \cdot 0,02 \cdot \frac{0,05}{2}} + \frac{1}{120 \cdot 0,019 \cdot \frac{0,05}{2}}$$

$$R_4 = 18,45 \text{ } ^\circ\text{C/W} \quad (4.20)$$

ze zubu do ventilačního kanálu:

$$R_5 = \frac{\frac{\check{s}_p}{2}}{3 \lambda_{Feq} \check{s}_{z3} v_z} + \frac{1}{\alpha_z \check{s}_{z3} v_z}$$

$$R_5 = \frac{\frac{0,05}{2}}{3 \cdot 1 \cdot 0,022 \cdot 0,109} + \frac{1}{100 \cdot 0,022 \cdot 0,109}$$

$$R_5 = 7,65 \text{ } ^\circ\text{C/W} \quad (4.21)$$

z plechů zubu do plechů jádra:

$$R_6 = \frac{\frac{v_z}{2}}{3\lambda_{Fel}\check{s}_{z4}\frac{\check{s}_p}{2}} + \frac{\frac{v_j}{2}}{3\lambda_{Fel}\check{s}_{j1}\frac{\check{s}_p}{2}}$$

$$R_6 = \frac{\frac{0,109}{2}}{3 \cdot 40 \cdot 0,024 \cdot \frac{0,05}{2}} + \frac{\frac{0,1059}{2}}{3 \cdot 40 \cdot 0,044 \cdot \frac{0,05}{2}}$$

$$R_6 = 1,158 \text{ } ^\circ\text{C/W} \quad (4.22)$$

z plechů jádra do ventilačního kanálu:

$$R_7 = \frac{\frac{\check{s}_p}{2}}{3\lambda_{Feq}\check{s}_{j2}v_j} + \frac{1}{\alpha_j\check{s}_{j2}v_j}$$

$$R_7 = \frac{\frac{0,05}{2}}{3 \cdot 1 \cdot 0,046 \cdot 0,1059} + \frac{1}{80 \cdot 0,046 \cdot 0,1059}$$

$$R_7 = 4,28 \text{ } ^\circ\text{C/W} \quad (4.23)$$

z plechů jádra na vnější obvod statoru

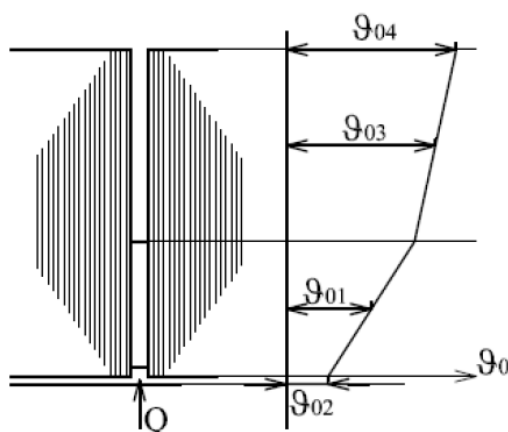
$$R_8 = \frac{\frac{v_j}{2}}{3\lambda_{Fel}\check{s}_{j3}\frac{\check{s}_p}{2}} + \frac{1}{\alpha_4\check{s}_{j4}\frac{\check{s}_p}{2}}$$

$$R_8 = \frac{\frac{0,1059}{2}}{3 \cdot 40 \cdot 0,04732 \cdot \frac{0,05}{2}} + \frac{1}{60 \cdot 0,049 \cdot \frac{0,05}{2}}$$

$$R_8 = 13,98 \text{ } ^\circ\text{C/W} \quad (4.24)$$

Určení okolních teplot vymezeného úseku:

V uvažovaném uspořádání ventilačního obvodu stroje vstupuje do statoru vzduch ze vzduchové mezery, který je ohřátý od ztrát vzniklých v rotoru stroje. Jeho množství je v následujícím výpočtu označeno Q a udáno v m^3/s . Při průchodu vzduchu radiálním kanálem bude jeho teplota v důsledku přibíraných ztrát z induktu narůstat. [2]



Obrázek 4.2: Průběh teploty chladiva v radiálním kanálu [2]

Množství chladicího média, které musí projít státorem stroje, se určí z kalorimetrické rovnice:

$$Q = \frac{\sum \Delta P}{\rho \cdot c_p \cdot \Delta \vartheta} = \frac{\sum \Delta P}{c_v \cdot \Delta \vartheta} = \frac{\Delta P - \Delta P_{Cuč}}{c_v \cdot \Delta \vartheta} = \frac{78\,252 - 15\,997}{1250 \cdot 20} = 2,49 \text{ m}^3/s \quad (4.25)$$

Kde:

- Q je množství chladiva, které má projít strojem [$m^3 \cdot s^{-1}$]
- $\sum \Delta P$ součet všech ztrát, které se budou chladicím médiem odvádět [W]
- ρ hustota chladicího média [$kg \cdot m^{-3}$]
- c_p hmotnostní měrné teplo chladicího média [$W \cdot s \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]
- $\Delta \vartheta$ oteplení chladicího média, které prošlo strojem [K]

oteplení chladiva ve vzduchové mezeře:

$$\vartheta_{02} = \vartheta_0 + \frac{\Delta P_{rot}}{c_v Q} = 0 + \frac{12\,978}{1250 \cdot 2,49} = 4,2 \text{ } ^\circ C \quad (4.26)$$

ztráty v rotoru (v budícím vinutí+ povrchové)

$$\Delta P_{rot} = \Delta P_{Cub} + \Delta P_p = 12\,401 + 577 = 12\,978 \text{ W}$$

oteplení chladiva v okolí zubu kanálu:

$$\vartheta_{01} = \vartheta_{02} + \frac{\Delta P_{Fez} + \Delta P_{Cud}}{2c_v Q} = 4,2 + \frac{7\,649 + 10\,229}{2 \cdot 1250 \cdot 2,49} = 7,07 \text{ } ^\circ C \quad (4.27)$$

oteplení chladiva v okolí jádra induktu kanálu:

$$\vartheta_{03} = \vartheta_{02} + \frac{\Delta P_{Fez} + \Delta P_{Cud} + \frac{1}{2} \Delta P_{Fej}}{c_v Q} = 4,2 + \frac{7\,649 + 10\,229 + \frac{1}{2} \cdot 9\,549}{1250 \cdot 2,49}$$

$$\vartheta_{03} = 11,48 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4.28)$$

oteplení chladiva vystupujícího z kanálu:

$$\vartheta_{04} = \vartheta_{02} + \frac{\Delta P_{Fez} + \Delta P_{Cud} + \Delta P_{Fej}}{c_v Q} = 4,2 + \frac{7\,649 + 10\,229 + 9\,549}{1250 \cdot 2,49}$$

$$\vartheta_{04} = 13 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4.29)$$

Kde:

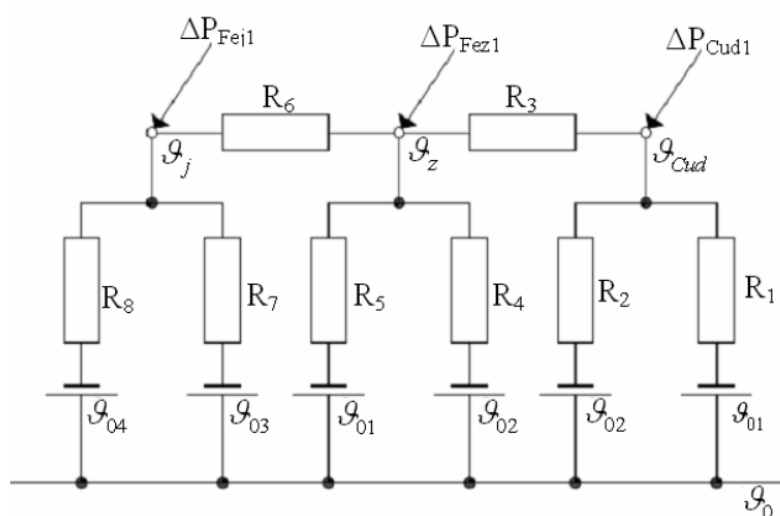
ϑ_0 je teplota chladiva vstupující do stroje

ΔP_{rot} ztráty v rotoru (v budícím vinutí + povrchové)

c_v objemové měrné teplo chladiva (pro vzduch je $c_v = 1\,250 \text{ W/}^\circ\text{Cm}^3$)

Sestavení a řešení náhradního tepelného obvodu oblasti:

Na níže uvedeném obrázku je uvedeno schéma náhradního tepelného obvodu uvažovaného úseku. Mým úkolem je určit teploty uzlů ϑ_{cud} , ϑ_z , ϑ_j , když všechny ostatní hodnoty jsou již známy. Za tím účelem musím sestavit tři navzájem nezávislé rovnice.



Obrázek 4.3: Náhradní schéma tepelného obvodu vymezeného úseku [2]

$$\frac{\vartheta_{Cud}-\vartheta_{01}}{R_1} + \frac{\vartheta_{Cud}-\vartheta_{02}}{R_2} + \frac{\vartheta_{Cud}-\vartheta_z}{R_3} = \Delta P_{Cud1} \quad (4.30)$$

$$\frac{\vartheta_z-\vartheta_{Cud}}{R_3} + \frac{\vartheta_z-\vartheta_{02}}{R_4} + \frac{\vartheta_z-\vartheta_{01}}{R_5} + \frac{\vartheta_z-\vartheta_j}{R_6} = \Delta P_{Fez1} \quad (4.31)$$

$$\frac{\vartheta_j-\vartheta_z}{R_6} + \frac{\vartheta_j-\vartheta_{03}}{R_7} + \frac{\vartheta_j-\vartheta_{04}}{R_8} = \Delta P_{Fej1} \quad (4.32)$$

Soustava rovnic po dosazení:

$$\frac{\vartheta_{Cud}-7,07}{31,65} + \frac{\vartheta_{Cud}-4,2}{89,37} + \frac{\vartheta_{Cud}-\vartheta_z}{4,1} = 9,12 \quad (4.30)$$

$$\frac{\vartheta_z-\vartheta_{Cud}}{13,98} + \frac{\vartheta_z-4,2}{18,45} + \frac{\vartheta_z-7,07}{7,65} + \frac{\vartheta_z-\vartheta_j}{1,158} = 3,94 \quad (4.31)$$

$$\frac{\vartheta_j-\vartheta_z}{1,158} + \frac{\vartheta_j-11,48}{4,28} + \frac{\vartheta_j-13}{13,98} = 4,9 \quad (4.32)$$

Řešením výše uvedené soustavy rovnic jsem určil teploty uzlů: ϑ_{cud} , ϑ_z , ϑ_j .

Jelikož jsem dosadil za teplotu okolí $\vartheta_0 = 0$ °C, získal jsem oteplení uzlů nad okolní teplotu a toto oteplení se značí $\Delta\vartheta_{cud}$, $\Delta\vartheta_z$, $\Delta\vartheta_j$.

Výsledné hodnoty oteplení:

$$\text{vinutí v drážce induktu: } \Delta\vartheta_{cud} = 76,4 \text{ °C}$$

$$\text{zub induktu: } \Delta\vartheta_z = 44,17 \text{ °C}$$

$$\text{jho induktu: } \Delta\vartheta_j = 39,8 \text{ °C}$$

[2] [3] [5]

4.2.2 Výpočet oteplení čel vinutí

Při výpočtu vycházím z předpokladu, že všechna čela budou mít stejné chladicí podmínky, takže si zvolím jako element jedno čelo o délce l_{ζ} a vnějším obvodu O_{ζ} .

Ztráty vzniklé v jednom čele:

$$\Delta P_{Cu\zeta 1} = \frac{\Delta P_{Cu\zeta}}{Q_{\zeta}} = \frac{15\,997}{108} = 148 \text{ W} \quad (4.33)$$

kde Q_{ζ} je počet čel a bývá zpravidla stejný jako počet drážek Q .

Tepelný odpor mezi vodičem čel a okolím je:

$$R_{\zeta} = \frac{\delta_{iz}}{\lambda_{iz} O_{\zeta e} l_{\zeta}} + \frac{\delta_{vzd}}{\lambda_{vzd} O_{\zeta e} l_{\zeta}} + \frac{1}{\alpha_{\zeta} k O_{\zeta e} l_{\zeta}}$$

$$R_{\zeta} = \frac{0,00425}{0,3 \cdot 0,105 \cdot 0,857} + \frac{0,0001}{0,026 \cdot 0,105 \cdot 0,857} + \frac{1}{90 \cdot 0,65 \cdot 0,105 \cdot 0,857}$$

$$R_{\zeta} = 0,472 \text{ } ^\circ\text{C/W} \quad (4.34)$$

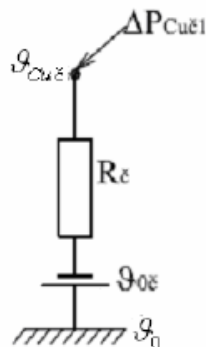
$$O_{\zeta e} = (h_{\zeta} + b_{\zeta}) \cdot 0,8 = (48 + 17,5) \cdot 2 \cdot 0,8 = 104,8 \text{ mm}$$

Kde:

$O_{\zeta e}$ obvod čela

α_{ζ} součinitel přestupu tepla v okolí čel

k činitel zakrytí čel (vložky mezi vrstvami, křížení spodní a horní vrstvy, na rotoru bandáží a podpěrným kruhem, atd.) a nabývá hodnot v rozmezí $0,5 \div 0,8$ podle konstrukčního uspořádání čel.



Obrázek 4.4: Náhradní tepelné schéma čel vinutí [2]

Oteplení čela:

$$\Delta\vartheta_{\zeta} = \Delta P_{Cu\zeta 1} \cdot R_{\zeta} + \vartheta_{o\zeta} = 148 \cdot 0,472 + 0 = 70 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (4.35)$$

Jelikož není rozdíl teplot mezi drážkovou částí a čelem příliš velký (přibližně do několika $^{\circ}\text{C}$), můžu určit střední hodnotu oteplení vinutí jako vážený průměr obou oteplení:

$$\Delta\vartheta_{SCu} = \frac{\Delta\vartheta_{Cu d} l_d + \Delta\vartheta_{Cu \zeta} l_{\zeta}}{l_d + l_{\zeta}} = \frac{76,4 \cdot 0,5478 + 70 \cdot 0,857}{0,5478 + 0,857} = 72,5 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (4.36)$$

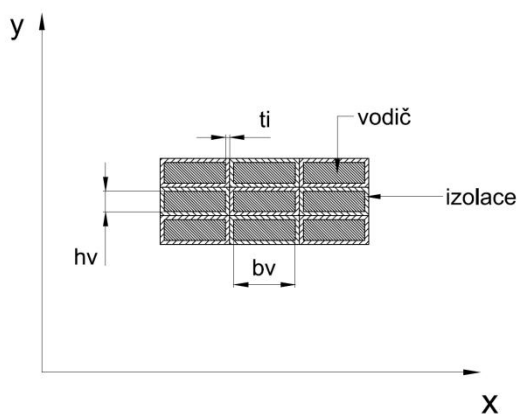
[2] [3] [4] [5]

4.3 Výpočet oteplení jádrové (pólové) cívky

4.3.1 Určení náhradních parametrů

S dostatečnou přesností můžeme uvažovat, že budou po celém obvodu a výšce jádrové cívky stejné chladicí podmínky. Za tohoto předpokladu lze vymezit z obvodu cívky úsek o jednotkové délce (lm), tím se prostorová úloha převede na rovinou a vyšetřovaná oblast je dána průřezem cívky.

Dalším problémem je nehomogenní prostředí prostoru cívky, kde se střídá vodič a jeho izolace. U cívek s obdélníkovými tvary vodičů se pak jedná navíc o prostředí anizotropní. Co se týče nehomogenity, zavedeme náhradní tepelnou vodivost cívky, která respektuje tepelnou vodivost vodiče a izolace. [2]



Obrázek 4.5: Uspořádání budící cívky z izolovaných obdélníkových vodičů

Na Obr. 4.5 je zobrazen výřez cívky s izolovaným obdélníkovým vodičem. Určíme tepelný odpor tohoto uspořádání ve směru osy x , když druhý rozměr průřezu vodiče (kolmý k nákresně) $l=l$:

$$R_x = \frac{b_v}{\lambda_v h_v l} + \frac{2t_i}{\lambda_i h_v l} = \frac{l}{h_v} \left(\frac{b_v}{\lambda_v} + \frac{2t_i}{\lambda_i} \right) = \frac{b_v + 2t_i}{h_v} \left(\frac{\frac{b_v}{\lambda_v} + \frac{2t_i}{\lambda_i}}{b_v + 2t_i} \right) \quad (4.37)$$

Jestliže pro tepelný odpor vedením platí obecně: $R = \frac{1}{\lambda S} l$, pak ve výše uvedeném vztahu odpovídá:

$$\frac{b_v + 2t_i}{h_v} \rightarrow \frac{l}{S} \quad \text{a výraz v závorce} \quad \frac{\frac{b_v}{\lambda_v} + \frac{2t_i}{\lambda_i}}{b_v + 2t_i} \rightarrow \frac{1}{\lambda}$$

Převrácená hodnota výrazu v závorce představuje náhradní měrnou tepelnou vodivost ve směru x:

$$\lambda_x = \frac{b_v + 2t_i}{\frac{b_v}{\lambda_v} + \frac{2t_i}{\lambda_i}} \quad (4.38)$$

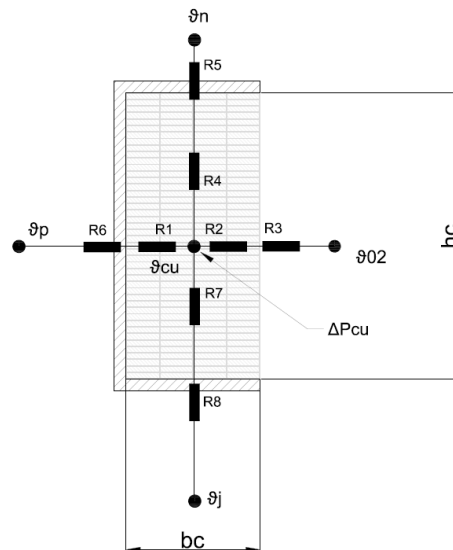
Stejně se určí i náhradní měrná tepelná vodivost ve směru y:

$$\lambda_y = \frac{h_v + 2t_i}{\frac{h_v}{\lambda_v} + \frac{2t_i}{\lambda_i}} \quad (4.39)$$

[2] [4] [5]

4.3.2 Určení polohy uzlu maximální teploty

Abychom mohli určit vnitřní tepelné odpory v cívce, je třeba znát polohu maximální teploty, tedy polohu uzlu. Za tím účelem oddělíme vedení tepla do jednotlivých souřadnicových os a pro jeden směr vypočteme polohu maxima. Vztah pro zbývající směr bude obdobný.



Obrázek 4.6: Řez pólovou cívkou

Pro určení polohy maxima budící cívky X_m je třeba znát oteplení pólu ϑ_p a pro určení Y_m je třeba znát oteplení pólového nástavce ϑ_n a jha rotoru ϑ_j . Tyto parametry získáme řešením soustavy rovnic pro oteplení budící cívky (4.78), (4.79), (4.80), (4.81), (4.82). Řešení provedeme pro více hodnot X a Y, soustavu rovnic tedy řešíme vícekrát pro jednotlivé X a Y. Hodnoty X v tepelném odporu R_1 a R_2 zvolíme v intervalu:

$$X \in \langle 0, b_c \rangle$$

a hodnoty Y v tepelném odporu R_4 a R_7 zvolíme v intervalu:

$$Y \in \langle 0, h_c \rangle$$

Řešením soustavy rovnic (4.78), (4.79), (4.80), (4.81), (4.82) získáme oteplení jednotlivých částí pólu (Obrázek 4.6) pro jednotlivé hodnoty X a Y . Z těchto hodnot určíme střední hodnoty oteplení:

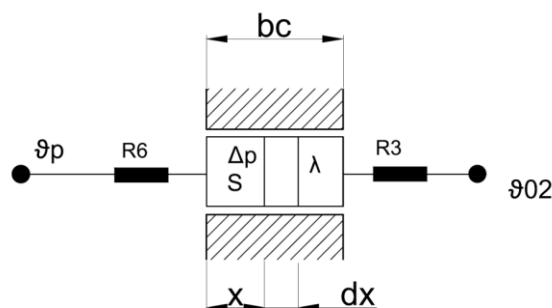
$$\text{oteplení pólového nástavce: } \Delta\vartheta_n = 27 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\text{oteplení pólu: } \Delta\vartheta_p = 29 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\text{oteplení jha rotoru: } \Delta\vartheta_j = 19 \text{ } ^\circ\text{C}$$

[2] [5]

4.3.2.1 Určení polohy uzlu maximální teploty ve směru osy x



Obrázek 4.7: Element pro jednosměrné vedení tepla - ve směru osy x

Označení parametrů (Obrázek 4.7):

ztráty v jednotce objemu:

$$\Delta p = \frac{\Delta P_{Cub}}{2p \cdot V_{Cu}} = \frac{12\,401,7}{8 \cdot 0,01346} = 115\,188,78 \text{ W/m}^3 \quad (4.40)$$

délka elementu ve směru osy x :

$$l_x = 0,06548 \text{ m}$$

průřez elementu ve směru osy x :

$$S_x = 0,14 \text{ m}^2$$

ekvivalentní tepelná vodivost ve směru x :

$$\lambda_x = 10,76 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

tepelný tok průřezem tyče:

$$Q = -\lambda_x S_x \frac{d\vartheta}{dx} \quad (4.41)$$

jeho změna:

$$dQ = -\lambda_x S_x \frac{d^2\vartheta}{dx^2} dx \quad (4.42)$$

bilance tepelných toků na elementu dx : $dx = \Delta p \cdot S_x \cdot dx$ porovnáním:

$$-\lambda_x S_x \frac{d^2\vartheta}{dx^2} dx = \Delta p \cdot S_x \cdot dx \rightarrow \frac{d^2\vartheta}{dx^2} = -\frac{\Delta p}{\lambda_x}$$

po integraci:

$$\frac{d\vartheta}{dx} = -\frac{\Delta p}{\lambda_x} x + C_1 \quad (4.43)$$

po další integraci:

$$\vartheta = -\frac{\Delta p}{2\lambda_x} x^2 + C_1 x + C_2 \quad (4.44)$$

Integrační konstanty C_1 a C_2 se určí z okrajových podmínek z rovnice (4.41):

1. pro $x = 0$

$$-\lambda_x S_x \left(\frac{d\vartheta}{dx}\right)_0 = \frac{\vartheta_p - \vartheta(0)}{R_6} \quad (4.45)$$

2. pro $x = l_x$

$$-\lambda_x S_x \left(\frac{d\vartheta}{dx}\right)_{l_x} = \frac{\vartheta(l_x) - \vartheta_{02}}{R_3} \quad (4.46)$$

Z rovnice (4.44) pro $x = 0$:

$$\vartheta(0) = C_2$$

Z rovnice (4.43) pro $x = 0$:

$$\left(\frac{d\vartheta}{dx}\right)_{x=0} = C_1$$

Po dosazení do rovnice (4.45) za $\vartheta(0)$ a $\left(\frac{d\vartheta}{dx}\right)_0$:

$$-\lambda_x S_x R_6 C_1 = \vartheta_p - C_2$$

Po dosazení do rovnice (4.46) dosadíme (4.43) a (4.44) pro $x = l_x$

$$-\lambda_x S_x \left(-\frac{\Delta p}{\lambda_x} l_x + C_1 \right) \cdot R_3 = -\frac{\Delta p}{2\lambda_x} l_x^2 + C_1 l_x + C_2 - \vartheta_{02}$$

Obdrželi jsme dvě rovnice pro dvě neznámé (C_2 , C_1), které uspořádáme:

$$-\lambda_x S_x R_6 C_1 + C_2 = \vartheta_p$$

$$-(\lambda_x S_x R_3 + l_x) C_1 - C_2 = -\frac{\Delta p}{2\lambda_x} l_x^2 - \lambda_x S_x \frac{\Delta p}{\lambda_x} l_x R_3 - \vartheta_{02}$$

Po sečtení obou rovnic:

$$(-\lambda_x S_x R_6 - \lambda_x S_x R_3 - l_x) \cdot C_1 = \vartheta_p - \frac{\Delta p}{2\lambda_x} l_x^2 - \lambda_x S_x \frac{\Delta p}{\lambda_x} l_x R_3 - \vartheta_{02}$$

$$C_{1x} = \frac{-\vartheta_p + \frac{\Delta p}{2\lambda_x} l_x^2 + S_x \Delta p l_x R_3 + \vartheta_{02}}{\lambda_x S_x (R_6 + R_3) + l_x} \quad (4.47)$$

$$C_{2x} = \vartheta_p + \lambda_x S_x R_6 C_1 \quad (4.48)$$

Poloha extrému X_m bude ležet v místě, kde je $\frac{d\vartheta}{dx} = 0$, tedy z rovnice (4.43)

$$X_m = C_{1x} \frac{\lambda_x}{\Delta p} [m] \quad (4.49)$$

Po dosazení za konkrétní hodnoty dostaneme:

$$C_{1x} = \frac{-\vartheta_p + \frac{\Delta p}{2\lambda_x} l_x^2 + S_x \Delta p l_x R_3 + \vartheta_{02}}{\lambda_x S_x (R_6 + R_3) + l_x}$$

$$C_{1x} = \frac{-29 + \frac{115\,188,78}{2 \cdot 10,76} 0,0655^2 + 0,14 \cdot 115\,188,78 \cdot 0,0655 \cdot 0,11 + 4}{10,76 \cdot 0,14 \cdot (0,3 + 0,11) + 0,0655}$$

$$C_{1x} = 231$$

Poloha extrému X_m :

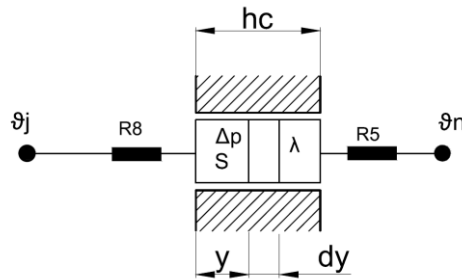
$$X_m = C_{1x} \frac{\lambda_x}{\Delta p}$$

$$X_m = 231 \cdot \frac{10,76}{115\,188,78} m$$

$$X_m = 0,0226 m$$

[2] [5]

4.3.2.2 Určení polohy uzlu maximální teploty ve směru osy y



Obrázek 4.8: Element pro jednosměrné vedení tepla - ve směru osy y

Označení parametrů (Obrázek 4.8):

ztráty v jednotce objemu:

$$\Delta p = \frac{\Delta P_{Cub}}{2p \cdot V_{Cu}} = \frac{12\,401.7}{8 \cdot 0.01346} = 115\,188.78 \quad W/m^3 \quad (4.50)$$

délka elementu ve směru osy y:

$$l_y = 0.1395 \quad [m]$$

průřez elementu ve směru osy y:

$$S_y = 0.066 \quad [m^2]$$

ekvivalentní tepelná vodivost ve směru y:

$$\lambda_y = 2.13 \quad [W/m^\circ C]$$

tepelný tok průřezem tyče:

$$Q = -\lambda_y S_y \frac{d\vartheta}{dy} \quad (4.51)$$

jeho změna:

$$dQ = -\lambda_y S_y \frac{d^2\vartheta}{dy^2} dy \quad (4.52)$$

bilance tepelných toků na elementu dy : $dy = \Delta p \cdot S_y \cdot dy$ porovnáním:

$$-\lambda_y S_y \frac{d^2\vartheta}{dy^2} dy = \Delta p \cdot S_y \cdot dy \rightarrow \frac{d^2\vartheta}{dy^2} = -\frac{\Delta p}{\lambda_y}$$

po integraci:

$$\frac{d\vartheta}{dy} = -\frac{\Delta p}{\lambda_y} y + C_1 \quad (4.53)$$

po další integraci:

$$\vartheta = -\frac{\Delta p}{2\lambda_y} y^2 + C_1 y + C_2 \quad (4.54)$$

Integrační konstanty C_1 a C_2 se určí z okrajových podmínek z rovnice (4.51):

1. pro $y = 0$

$$-\lambda_y S \left(\frac{d\vartheta}{dy} \right)_0 = \frac{\vartheta_j - \vartheta(0)}{R_8} \quad (4.55)$$

2. pro $y = l_y$

$$-\lambda_y S \left(\frac{d\vartheta}{dy} \right)_{l_y} = \frac{\vartheta(l_y) - \vartheta_n}{R_5} \quad (4.56)$$

Z rovnice (4.54) pro $y = 0$:

$$\vartheta(0) = C_2$$

Z rovnice (4.53) pro $y = 0$:

$$\left(\frac{d\vartheta}{dx} \right)_{y=0} = C_1$$

Po dosazení do rovnice (4.55) za $\vartheta(0)$ a $\left(\frac{d\vartheta}{dy} \right)_0$:

$$-\lambda_y S R_8 C_1 = \vartheta_j - C_2$$

Po dosazení do rovnice (4.56) dosadíme (4.53) a (4.54) pro $x = l$

$$-\lambda_y S_y \left(-\frac{\Delta p}{\lambda_y} l_y + C_1 \right) \cdot R_5 = -\frac{\Delta p}{2\lambda_y} l_y^2 + C_1 l_y + C_2 - \vartheta_n$$

Obdrželi jsme dvě rovnice pro dvě neznámé (C_2 , C_1), které uspořádáme:

$$-\lambda_y S R_8 C_1 + C_2 = \vartheta_j$$

$$-(\lambda_y S_y R_5 + l_y) C_1 - C_2 = -\frac{\Delta p}{2\lambda_y} l_y^2 - \lambda_y S_y \frac{\Delta p}{\lambda_y} l_y - \vartheta_n$$

Po sečtení obou rovnic:

$$(-\lambda_y S_y R_8 - \lambda_y S_y R_5 - l_y) \cdot C_1 = \vartheta_j - \frac{\Delta p}{2\lambda_y} l_y^2 - \lambda_y S_y \frac{\Delta p}{\lambda_y} l_y R_5 - \vartheta_n$$

$$C_{1y} = \frac{-\vartheta_j + \frac{\Delta p}{2\lambda_y} l_y^2 + S_y \Delta p l_y R_5 + \vartheta_n}{\lambda_y S_y (R_8 + R_5) + l_y} \quad (4.57)$$

$$C_{2y} = \vartheta_j + \lambda_y S_y R_8 C_1 \quad (4.58)$$

Poloha extrému Y_m bude ležet v místě, kde je $\frac{d\vartheta}{dy} = 0$, tedy z rovnice (4.53)

$$Y_m = C_{1y} \frac{\lambda_y}{\Delta p} [m] \quad (4.59)$$

Po dosazení za konkrétní hodnoty dostaneme:

$$C_{1y} = \frac{-\vartheta_j + \frac{\Delta p}{2\lambda_y} l_y^2 + S_y \Delta p l_y R_5 + \vartheta_n}{\lambda_y S_y (R_8 + R_5) + l_y}$$

$$C_{1y} = \frac{-19 + \frac{115\,188,78}{2 \cdot 2,13} \cdot 0,14^2 + 0,066 \cdot 115\,188,78 \cdot 0,14 \cdot 0,62 + 27}{2,13 \cdot 0,066 \cdot (0,63 + 0,62) + 0,14}$$

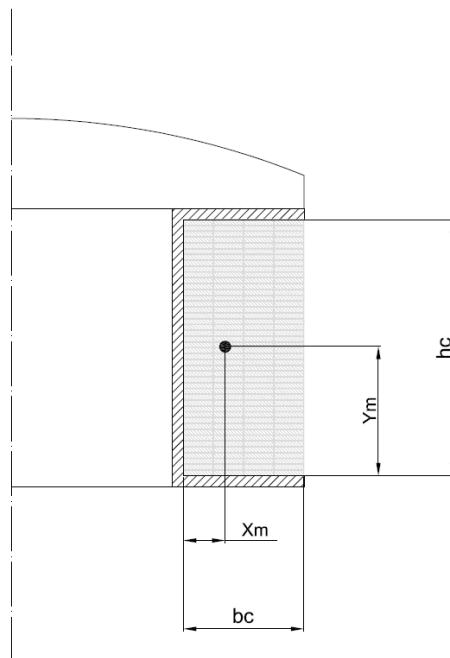
$$C_{1y} = 3\,836$$

Poloha extrému Y_m :

$$Y_m = C_{1y} \frac{\lambda_y}{\Delta p}$$

$$Y_m = 3\,836 \cdot \frac{2,13}{115\,188,78} \text{ m}$$

$$Y_m = 0,0705 \text{ m}$$

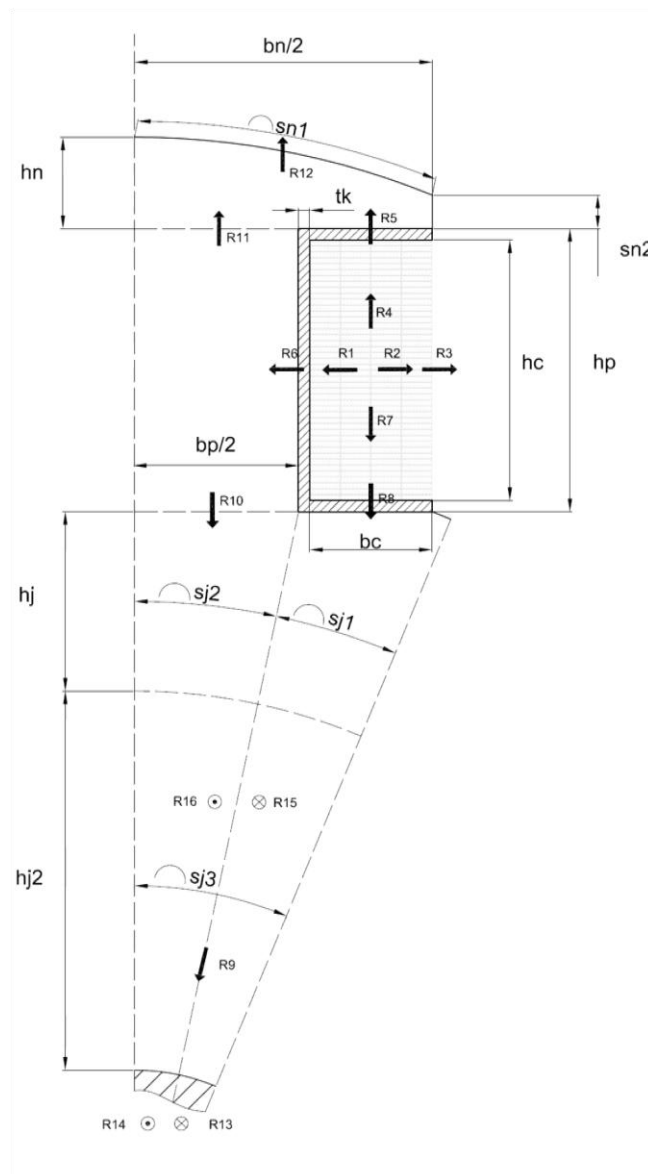


Obrázek 4.9: Zobrazení polohy maximální teploty budícího vinutí

[2][5]

4.3.3 Sestavení a řešení tepelné sítě jádrové cívky

Následující výpočet je proveden pro budící vinutí. Z celého rotoru jsem vymezil co nejmenší úsek (Obr. 4.10) tak, aby u všech ostatních byly stejné tepelné a chladicí podmínky. Jedná se o úsek příslušný polovině pólu a šestnáctině jha rotoru. Dále se musí určit ztráty vznikající ve vymezeném úseku.



Obrázek 4.10: Vymezený úsek rotoru stroje

Určení rozměrů úseků oteplení

$$h_j = 96 \text{ mm}$$

$$h_{j2} = 203 \text{ mm}$$

$$s_{n1} = 163,25 \text{ mm}$$

$$s_{n2} = 18 \text{ mm}$$

$$s_{j1} = 66,72 \text{ mm}$$

$$s_{j2} = 76,39 \text{ mm}$$

$$s_{j3} = 83,34 \text{ mm}$$

Výška budící cívky:

$$h_c = 139,48 \text{ mm}$$

Vymezený úsek z obvodu cívky o jednotkové délce:

$$l = 1 \text{ m}$$

Počet poloh budící cívky:

$$N = 4$$

Počet závitů budící cívky v jedné poloze:

$$N_z = 44$$

Šířka budící cívky:

$$b_c = 65,48 \text{ mm}$$

Šířka pólu:

$$b_p = 175 \text{ mm}$$

Tloušťka izolace vodiče:

$$t_i = 0,185 \text{ mm}$$

Výška vodiče:

$$h_v = 2,8 \text{ mm}$$

Výška pólu:

$$h_p = 147 \text{ mm}$$

Výška pólového nástavce:

$$h_n = 0.049 \text{ m}$$

Šířka vodiče:

$$b_v = 16 \text{ mm}$$

Šířka pólového nástavce:

$$b_n = 0,3185 \text{ m}$$

Šířka kostřičky:

$$t_k = 6 \text{ mm}$$

Šířka vzduchové mezery v dané izolaci:

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

Poloviční délka plechového svazku jha rotoru:

$$l_1 = 342 \text{ mm}$$

Šířka stahovacího kruhu jha rotoru:

$$l_2 = 40 \text{ mm}$$

Délka plechového svazku jha rotoru:

$$l_3 = 684 \text{ mm}$$

Poloměr hřídele v místě plechového svazku rotoru:

$$r_1 = 125 \text{ mm}$$

Měrná tepelná vodivost λ

Měrná tepelná vodivost izolace:

$$\lambda_{iz} = 0,25 \text{ W / } ^\circ\text{Cm}$$

Měrná tepelná vodivost vodiče:

$$\lambda_v = 386 \text{ W / } ^\circ\text{Cm}$$

Měrná tepelná vodivost kostřičky:

$$\lambda_{tk} = 0,20 \text{ W / } ^\circ\text{Cm}$$

Měrná tepelná vodivost plechů pólu a pólového nástavce v podélném směru:

$$\lambda_{Fep} = 40 \text{ W / } ^\circ\text{Cm}$$

Měrná tepelná vodivost plechů jha rotoru v příčném směru:

$$\lambda_{Feq} = 30 \text{ W / } ^\circ\text{Cm}$$

Měrná tepelná vodivost hřídele:

$$\lambda_{Fe} = 50 \text{ W / } ^\circ\text{Cm}$$

Náhradní měrná tepelná vodivost ve směru x:

$$\lambda_x = \frac{b_v + 2t_i}{\frac{b_v}{\lambda_v} + \frac{2t_i}{\lambda_{iz}}} = \frac{0,016 + 2 \cdot 0,000185}{\frac{0,016}{386} + \frac{2 \cdot 0,000185}{0,25}} = 10,76 \text{ W/}^\circ\text{Cm}$$

Náhradní měrná tepelná vodivost ve směru y:

$$\lambda_y = \frac{h_v + 2t_i}{\frac{h_v}{\lambda_v} + \frac{2t_i}{\lambda_{iz}}} = \frac{0,0028 + 2 \cdot 0,000185}{\frac{0,0028}{386} + \frac{2 \cdot 0,000185}{0,25}} = 2,13 \text{ W/}^\circ\text{Cm}$$

Suchý vzduch při 20 °C

$$\lambda_{vzd} = 0,026 \text{ W/}^\circ\text{Cm}$$

Součinitel přestupu tepla α

Součinitel přestupu tepla do prostoru mezi póly:

$$\alpha_3 = 65 \text{ W/}^\circ\text{Cm}^2$$

Součinitel přestupu tepla do vzduchové mezery:

$$\alpha_4 = 120 \text{ W/}^\circ\text{Cm}^2$$

Součinitel přestupu tepla ze stahovacího kruhu jha rotoru:

$$\alpha_5 = 90 \text{ W/}^\circ\text{Cm}^2$$

Součinitel přestupu tepla z hřídele:

$$\alpha_6 = 20 \text{ W/}^\circ\text{Cm}^2$$

Ztráty ve vymezeném úseku:

Ztráty v budícím vinutí (v jednom pólu na 1m délky):

$$\Delta P_{Cu} = \frac{\Delta P_{Cub}}{2p \cdot l_{bs}} = \frac{12\,401,7}{8 \cdot 1,76} = 881 \text{ W} \quad (4.60)$$

Ztráty, které vznikají v pólu (jsou velmi malé, můžeme je zanedbat):

$$\Delta P_{po} = 0 \text{ W}$$

Ztráty v jednom pólovém nástavci na 1 m délky:

$$\Delta P_N = \frac{\Delta P_p}{2p \cdot l_n} = \frac{577}{8 \cdot 0,679} = 106,22 \text{ W} \quad (4.61)$$

Ztráty ve jhu rotoru (jsou velmi malé, můžeme je zanedbat):

$$\Delta P_j = 0 \text{ W}$$

Ztráty v hřídeli:

$$\Delta P_r = 0 \text{ W}$$

Oteplení chladiva ve vymezených úsecích:

Oteplení chladiva ve vzduchové mezeře:

$$\vartheta_{01} = 4,2 \text{ °C}$$

Množství celkového chladicího média procházející strojem:

$$Q_1 = \frac{\Delta P}{c_v \cdot \Delta \vartheta} = \frac{78\,252}{1250 \cdot 20} = 3,1 \text{ m}^3/\text{s}$$

Kde:

Q_1 je celkové množství chladiva, které má projít strojem [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]
 $\sum \Delta P$ součet všech ztrát, které se budou chladicím médiem odvádět [W]

Oteplení chladiva mezi póly:

$$\vartheta_{02} = \vartheta_{12} + \frac{\Delta P_{cub2}}{c_v Q} = 1 + \frac{9\,300}{1250 \cdot 2,49} = 4 \text{ °C}$$

Oteplení chladiva v přední části budicího vinutí:

$$\vartheta_{12} = \frac{\Delta P_{cub1}}{c_v Q_1} = \frac{3\,100}{1250 \cdot 3,1} = 1 \text{ °C}$$

Oteplení chladiva od jha rotoru (teplotní spád je velmi malý):

$$\vartheta_{03} = \vartheta_{06} = 0 \text{ °C}$$

Oteplení chladiva od hřídele (teplotní spád je velmi malý):

$$\vartheta_{04} = \vartheta_{05} = 0 \text{ °C}$$

Výpočet tepelných odporů pro určení střední teploty:

Tepelný odpor budicí cívky ve směru osy x:

$$R_1 = \frac{X}{3 \cdot \lambda_x \cdot h_c \cdot l}$$

$$R_1 = \frac{X_m}{3 \cdot \lambda_x \cdot h_c \cdot l}$$

$$R_1 = \frac{0,0226}{3 \cdot 10,76 \cdot 0,14 \cdot 1}$$

$$R_1 = 0,0048 \text{ } ^\circ\text{C/W} \quad (4.62)$$

Tepelný odpor budící cívky ve směru osy x:

$$R_2 = \frac{b_c - X}{3 \cdot \lambda_x \cdot h_c \cdot l}$$

$$R_2 = \frac{b_c - X_m}{3 \cdot \lambda_x \cdot h_c \cdot l}$$

$$R_2 = \frac{0,065 - 0,0226}{3 \cdot 10,76 \cdot 0,14 \cdot 1}$$

$$R_2 = 0,0097 \text{ } ^\circ\text{C/W} \quad (4.63)$$

Tepelný odpor z budící cívky do prostoru mezi póly:

$$R_3 = \frac{1}{\alpha_3 \cdot h_c \cdot l}$$

$$R_3 = \frac{1}{65 \cdot 0,14 \cdot 1}$$

$$R_3 = 0,11 \text{ } ^\circ\text{C/W} \quad (4.64)$$

Tepelný odpor budící cívky ve směru osy y:

$$R_4 = \frac{h_c - Y}{3 \cdot \lambda_y \cdot b_c \cdot l}$$

$$R_4 = \frac{h_c - Y_m}{3 \cdot \lambda_y \cdot b_c \cdot l}$$

$$R_4 = \frac{0,14 - 0,0705}{3 \cdot 2,13 \cdot 0,065 \cdot 1}$$

$$R_4 = 0,163 \text{ } ^\circ\text{C/W} \quad (4.65)$$

Tepelný odpor z budící cívky do pólového nástavce:

$$R_5 = \frac{t_k}{\lambda_{tk} \cdot (b_c + t_k) \cdot l} + \frac{\delta_{vzd}}{\lambda_{vzd} \cdot (b_c + t_k) \cdot l} + \frac{S_{n2}}{3 \cdot \lambda_{Fep} \cdot (b_c + t_k) \cdot l}$$

$$R_5 = \frac{0,006}{0,2 \cdot (0,065 + 0,006)} + \frac{0,0001}{0,026 \cdot (0,065 + 0,006)} + \frac{0,018}{3 \cdot 40 \cdot (0,065 + 0,006)}$$

$$R_5 = 0,62 \text{ } ^\circ\text{C/W} \quad (4.66)$$

Tepelný odpor z budící cívky do pólu:

$$R_6 = \frac{t_k}{\lambda_{tk} \cdot (h_c + 2 \cdot t_k) \cdot l} + \frac{\delta_{vzd}}{\lambda_{vzd} \cdot (h_c + 2 \cdot t_k) \cdot l} + \frac{\frac{b_p}{2}}{\lambda_{Fep} \cdot h_p \cdot l}$$

$$R_6 = \frac{0,006}{0,2 \cdot (0,14 + 2 \cdot 0,006)} + \frac{0,0001}{0,026 \cdot (0,14 + 2 \cdot 0,006)} + \frac{\frac{0,175}{2}}{40 \cdot 0,15}$$

$$R_6 = 0,3 \text{ } ^\circ\text{C/W} \quad (4.67)$$

Tepelný odpor budící cívky ve směru osy y:

$$R_7 = \frac{Y}{3 \cdot \lambda_y \cdot b_c \cdot l}$$

$$R_7 = \frac{Y_m}{3 \cdot \lambda_y \cdot b_c \cdot l}$$

$$R_7 = \frac{0,071}{3 \cdot 2,13 \cdot 0,065 \cdot 1}$$

$$R_7 = 0,17 \text{ } ^\circ\text{C/W} \quad (4.68)$$

Tepelný odpor z budící cívky do jha rotoru:

$$R_8 = \frac{t_k}{\lambda_{tk} \cdot (b_c + t_k) \cdot l} + \frac{\delta_{vzd}}{\lambda_{vzd} \cdot (b_c + t_k) \cdot l} + \frac{h_j}{\lambda_{Fep} \cdot s_{j1} \cdot l}$$

$$R_8 = \frac{0,006}{0,2 \cdot (0,065 + 0,006)} + \frac{0,0001}{0,026 \cdot (0,065 + 0,006)} + \frac{0,096}{40 \cdot 0,068}$$

$$R_8 = 0,63 \text{ } ^\circ\text{C/W} \quad (4.69)$$

Tepelný odpor ze jha rotoru do hřídele:

$$R_9 = \frac{h_{j2}}{\lambda_{Fep} \cdot s_{j3} \cdot l_3} + \frac{\delta_{vzd}}{\lambda_{vzd} \cdot (2 \cdot \pi \cdot r_1) \cdot l_3} + \frac{r_1}{\lambda_{Fe} \cdot \left(2 \cdot \pi \cdot \frac{r_1}{2}\right) \cdot l_3}$$

$$R_9 = \frac{0,203}{40 \cdot 0,083 \cdot 0,683} + \frac{0,0001}{0,026 \cdot (2 \cdot \pi \cdot 0,125) \cdot 0,683} + \frac{0,125}{50 \cdot \left(2 \cdot \pi \cdot \frac{0,125}{2}\right) \cdot 0,683}$$

$$R_9 = 0,1057 \text{ } ^\circ\text{C/W} \quad (4.70)$$

Tepelný odpor z pólu do jha rotoru:

$$R_{10} = \frac{(h_c/2) + t_k}{\lambda_{Fep} \cdot \frac{b_p}{2} \cdot l} + \frac{\delta_{vzd}}{\lambda_{vzd} \cdot \frac{b_p}{2} \cdot l} + \frac{h_j}{\lambda_{Fep} \cdot s_{j2} \cdot l}$$

$$R_{10} = \frac{(0,142) + 0,006}{40 \cdot \frac{0,175}{2} \cdot 1} + \frac{0,001}{0,026 \cdot \frac{0,175}{2} \cdot 1} + \frac{0,096}{40 \cdot 0,076 \cdot 1}$$

$$R_{10} = 0,15 \text{ } ^\circ\text{C/W} \quad (4.71)$$

Tepelný odpor z pólu do pólového nástavce:

$$R_{11} = \frac{h_c/2}{\lambda_{Fep} \cdot \frac{b_p}{2} \cdot l} + \frac{t_k}{\lambda_{Fep} \cdot \frac{b_p}{2} \cdot l} + \frac{S_{n2}}{3 \cdot \lambda_{Fep} \cdot \frac{b_p}{2} \cdot l}$$

$$R_{11} = \frac{0,14/2}{40 \cdot \frac{0,175}{2} \cdot 1} + \frac{0,006}{40 \cdot \frac{0,175}{2} \cdot 1} + \frac{0,018}{3 \cdot 40 \cdot \frac{0,175}{2} \cdot 1}$$

$$R_{11} = 0,035 \text{ } ^\circ\text{C/W} \quad (4.72)$$

Tepelný odpor z pólového nástavce do vzduchové mezery:

$$R_{12} = \frac{\frac{1}{3} h_n}{3 \lambda_{Fep} \cdot \frac{b_n}{2} \cdot l} + \frac{1}{\alpha_4 \cdot \frac{S_{n1} + S_{n2}}{2} \cdot l}$$

$$R_{12} = \frac{\frac{1}{3} \cdot 0,049}{3 \cdot 40 \cdot \frac{0,32}{2} \cdot 1} + \frac{1}{120 \cdot \frac{0,16 + 0,18}{2} \cdot 1}$$

$$R_{12} = 0,093 \text{ } ^\circ\text{C/W} \quad (4.73)$$

Tepelný odpor z hřídele do prostředí stroje:

$$R_{13} = \frac{l_4}{\lambda_{Fe} \cdot \pi \cdot r_2^2} + \frac{r_2}{\lambda_{Fe} \cdot \left(2 \cdot \pi \cdot \frac{r_2}{2}\right) \cdot l_5} + \frac{1}{\alpha_6 \cdot (2 \cdot \pi \cdot r_2) \cdot l_5}$$

$$R_{13} = \frac{0,5}{50 \cdot \pi \cdot 0,122^2} + \frac{0,122}{50 \cdot \left(2 \cdot \pi \cdot \frac{0,122}{2}\right) \cdot 0,3} + \frac{1}{20 \cdot (2 \cdot \pi \cdot 0,122) \cdot 0,3}$$

$$R_{13} = 0,427 \text{ } ^\circ\text{C/W} \quad (4.74)$$

Tepelný odpor z hřídele do prostředí stroje:

$$R_{14} = \frac{l_4}{\lambda_{Fe} \cdot \pi \cdot r_2^2} + \frac{r_2}{\lambda_{Fe} \cdot \left(2 \cdot \pi \cdot \frac{r_2}{2}\right) \cdot l_5} + \frac{1}{\alpha_6 \cdot (2 \cdot \pi \cdot r_2) \cdot l_5}$$

$$R_{14} = \frac{0,5}{50 \cdot \pi \cdot 0,122^2} + \frac{0,122}{50 \cdot \left(2 \cdot \pi \cdot \frac{0,122}{2}\right) \cdot 0,3} + \frac{1}{20 \cdot (2 \cdot \pi \cdot 0,122) \cdot 0,3}$$

$$R_{14} = 0,427 \text{ } ^\circ\text{C/W} \quad (4.75)$$

Tepelný odpor ze jha rotoru:

$$R_{15} = \frac{l_1}{\lambda_{Feq} \cdot s_x} + \frac{l_2}{\lambda_{Fe} \cdot s_x} + \frac{dvzd}{\lambda_{vzd} \cdot s_x} + \frac{1}{\alpha_5 \cdot s_x}$$

$$R_{15} = \frac{0,330}{30 \cdot 0,032} + \frac{0,40}{50 \cdot 0,032} + \frac{0,0001}{0,026 \cdot 0,032} + \frac{1}{90 \cdot 0,032}$$

$$R_{15} = 1,05 \text{ } ^\circ\text{C/W} \quad (4.76)$$

kde

$$s_x = \left[(h_j + h_{j2} + r_1)^2 \cdot \pi - \pi \cdot r_1^2 \right] \cdot \frac{1}{8}$$

$$s_x = [(0,96 + 0,203 + 0,125)^2 \cdot \pi - \pi \cdot 0,125^2] \cdot \frac{1}{16}$$

$$s_x = 0,0322 \text{ m}^2$$

Tepelný odpor ze jha rotoru:

$$R_{16} = \frac{l_1}{\lambda_{Feq} \cdot s_x} + \frac{l_2}{\lambda_{Fe} \cdot s_x} + \frac{dvzd}{\lambda_{vzd} \cdot s_x} + \frac{1}{\alpha_5 \cdot s_x}$$

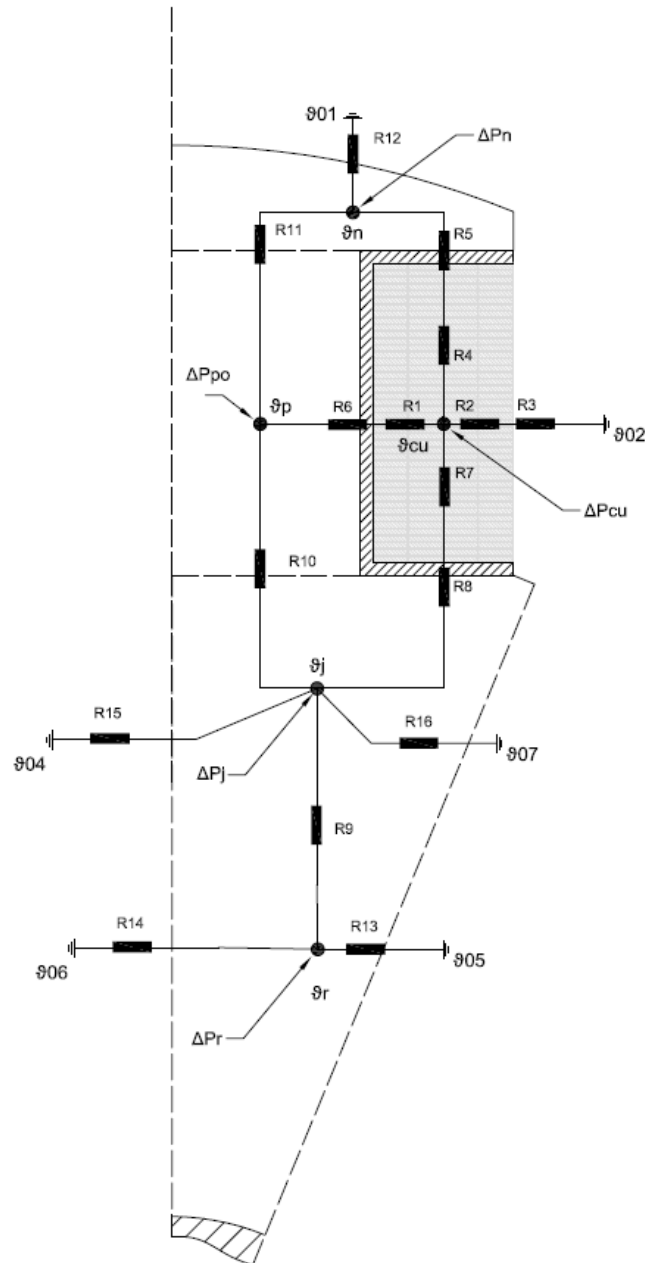
$$R_{16} = \frac{0,330}{30 \cdot 0,032} + \frac{0,40}{50 \cdot 0,032} + \frac{0,0001}{0,026 \cdot 0,032} + \frac{1}{90 \cdot 0,032}$$

$$R_{16} = 1,05 \text{ } ^\circ\text{C/W} \quad (4.77)$$

Odpory R15 a R16 respektují šíření tepla ve jhu rotoru v příčném směru a odpory R13 a R14 respektují šíření tepla podél hřídele.

Sestavení a řešení náhradního tepelného obvodu oblasti:

Na níže uvedeném obrázku (Obr. 4.11) je uvedeno schéma náhradního tepelného obvodu uvažovaného úseku. Mým úkolem je určit teploty uzlů ϑ_{Cub} , ϑ_p , ϑ_j , ϑ_n , ϑ_r , když všechny ostatní hodnoty jsou již známy. Za tím účelem musím sestavit čtyři navzájem nezávislé rovnice.



Obrázek 4.11: Náhradní schéma tepelného obvodu vymezeného úseku

Soustava rovnic pro oteplení budící cívky:

$$\frac{\vartheta_{Cu} - \vartheta_{02}}{R_2 + R_3} + \frac{\vartheta_{Cu} - \vartheta_p}{R_6 + R_1} + \frac{\vartheta_{Cu} - \vartheta_n}{R_4 + R_5} + \frac{\vartheta_{Cu} - \vartheta_j}{R_7 + R_8} = \Delta P_{Cu} \quad (4.78)$$

$$\frac{\vartheta_n - \vartheta_{Cu}}{R_5 + R_4} + \frac{\vartheta_n - \vartheta_{01}}{R_{12}} + \frac{\vartheta_n - \vartheta_p}{R_{11}} = \Delta P_n \quad (4.79)$$

$$\frac{\vartheta_p - \vartheta_{Cu}}{R_6 + R_1} + \frac{\vartheta_p - \vartheta_n}{R_{11}} + \frac{\vartheta_p - \vartheta_j}{R_{10}} = \Delta P_{po} \quad (4.80)$$

$$\frac{\vartheta_j - \vartheta_p}{R_{10}} + \frac{\vartheta_j - \vartheta_{Cu}}{R_7 + R_8} + \frac{\vartheta_j - \vartheta_{07}}{R_{16}} + \frac{\vartheta_j - \vartheta_{04}}{R_{15}} + \frac{\vartheta_j - \vartheta_r}{R_9} = \Delta P_j \quad (4.81)$$

$$\frac{\vartheta_r - \vartheta_j}{R_9} + \frac{\vartheta_r - \vartheta_{06}}{R_{14}} + \frac{\vartheta_r - \vartheta_{05}}{R_{13}} = \Delta P_r \quad (4.82)$$

Soustava rovnic po dosazení:

$$\frac{\vartheta_{Cu} - 4}{0,01 + 0,11} + \frac{\vartheta_{Cu} - \vartheta_p}{0,3 + 0,0048} + \frac{\vartheta_{Cu} - \vartheta_n}{0,163 + 0,62} + \frac{\vartheta_{Cu} - \vartheta_j}{0,17 + 0,63} = 881 \quad (4.78)$$

$$\frac{\vartheta_n - \vartheta_{Cu}}{0,62 + 0,16} + \frac{\vartheta_n - 4,2}{0,093} + \frac{\vartheta_n - \vartheta_p}{0,035} = 106,22 \quad (4.79)$$

$$\frac{\vartheta_p - \vartheta_{Cu}}{0,3 + 0,0048} + \frac{\vartheta_p - \vartheta_n}{0,035} + \frac{\vartheta_p - \vartheta_j}{0,15} = 0 \quad (4.80)$$

$$\frac{\vartheta_j - \vartheta_p}{0,15} + \frac{\vartheta_j - \vartheta_{Cu}}{0,17 + 0,63} + \frac{\vartheta_j - 0}{1,05} + \frac{\vartheta_j - 0}{1,05} + \frac{\vartheta_j - \vartheta_r}{0,1} = 0 \quad (4.81)$$

$$\frac{\vartheta_r - \vartheta_j}{0,1} + \frac{\vartheta_r - 0}{0,43} + \frac{\vartheta_r - 0}{0,43} = 0 \quad (4.82)$$

Řešením výše uvedené soustavy rovnic jsem určil teploty uzlů: $\vartheta_{Cu}, \vartheta_p, \vartheta_j, \vartheta_n, \Delta\vartheta_r$.

Dosadíme-li za teplotu okolí nula stupňů ($\vartheta_0 = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$), v tepelných odporech R_1 a R_2 za X polohu maximální teploty X_m , v odporech R_4 a R_7 za Y dosadíme hodnotu Y_m a do jmenovatele tepelných odporů dosadíme koeficient 3, pak získáme po vyřešení soustavy rovnic (4.78 až 4.82) střední hodnotu oteplení uzlů nad okolní teplotu a toto oteplení se značí $\Delta\vartheta_{Cub}$, $\Delta\vartheta_p$, $\Delta\vartheta_j$, $\Delta\vartheta_n$, $\Delta\vartheta_r$.

Výsledné střední hodnoty oteplení:

oteplení pólového nástavce: $\Delta\vartheta_n = 27 \text{ } ^\circ\text{C}$

oteplení pólu: $\Delta\vartheta_p = 29 \text{ } ^\circ\text{C}$

oteplení jha rotoru: $\Delta\vartheta_j = 19 \text{ } ^\circ\text{C}$

oteplení budící cívky: $\Delta\vartheta_{Cub} = 74 \text{ } ^\circ\text{C}$

oteplení hřídele: $\Delta\vartheta_r = 11 \text{ } ^\circ\text{C}$

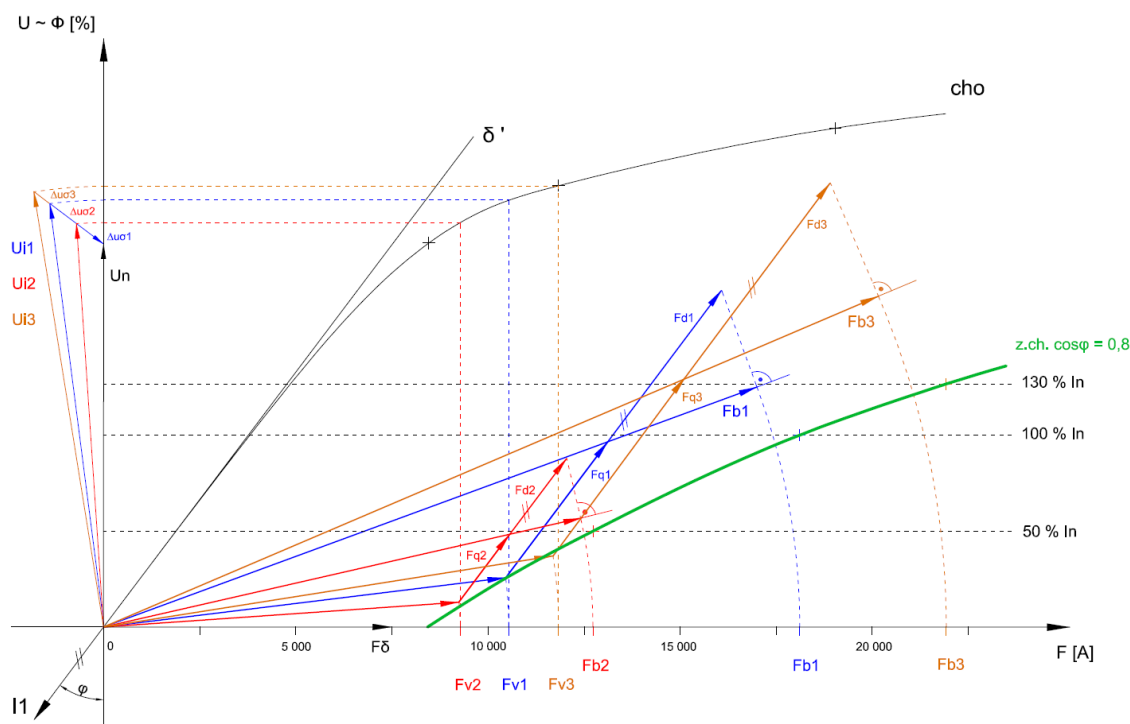
Střední hodnota oteplení budícího vinutí je rovna $\Delta\vartheta_{Cub} = 74 \text{ } ^\circ\text{C}$.

[2] [3] [5]

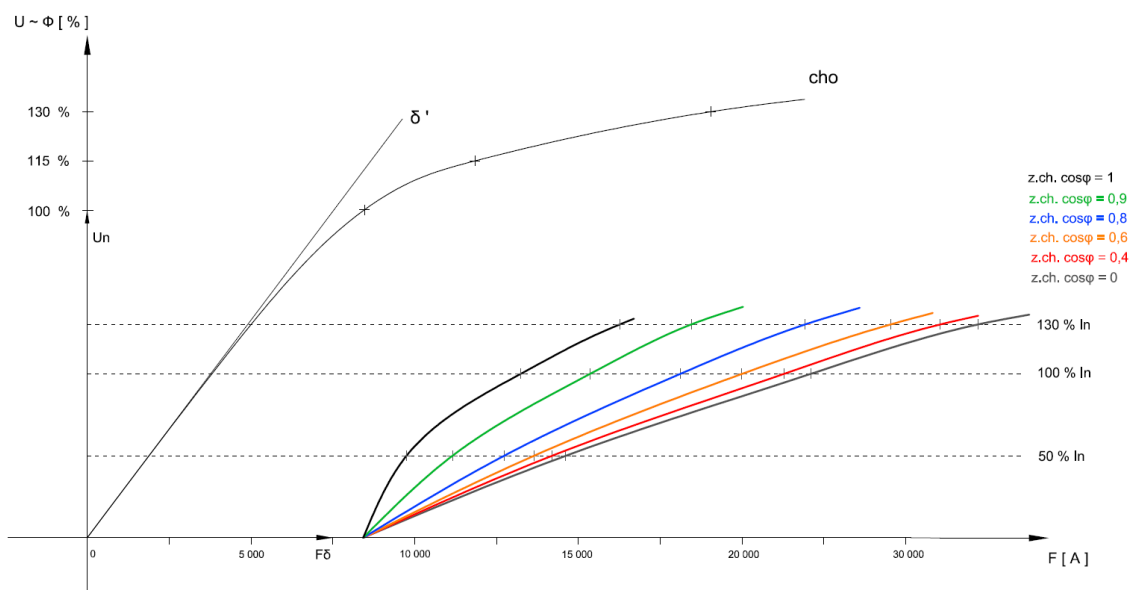
5 Zatěžovací charakteristika stroje

Při sestrovování zatěžovací charakteristiky jsem vycházel z charakteristiky naprázdno (Obr. 2.4) a o zatěžovací charakteristiku ji pouze doplnil. Abych dosáhl dostatečné přesnosti, musím znát minimálně tři body, kterými křivku proložím. Jeden bod bude ležet na hladině proudu ($130\% I_n$), druhý na jmenovité hladině proudu ($100\% I_n$), třetí na hladině proudu ($50\% I_n$) a čtvrtý na hladině proudu ($25\% I_n$). Tomu budou odpovídat i velikosti rozptylových reaktancí ($130\%, 100\%, 50\%, 25\%$), přičemž se s nimi bude měnit i velikost a sklon indukovaného napětí. Velikost amplitudy základní harmonické magnetického napětí v podélném (F_{d1}) a příčném (F_{q1}) směru se rovněž bude měnit v závislosti na dané hladině I_n . Výsledná zatěžovací charakteristika má označení "z. ch. $\cos \varphi = 0,8$ " (Zatěžovací charakteristika pro $\cos \varphi = 0,8$) a je znázorněná na Obr. 5.1 a v příloze č. 25 je umístěna zatěžovací charakteristika v plné velikosti. Ve výsledné charakteristice jsou uvedeny body pro $130\% I_n, 100\% I_n, 50\% I_n$, hodnota $25\% I_n$ v charakteristice není uvedena z hlediska přehlednosti.

Zatěžovací charakteristiky pro účinnky: $\cos \varphi = 0,4$, $\cos \varphi = 0,6$ a $\cos \varphi = 0,9$ se určí obdobným způsobem. Porovnání jednotlivých zatěžovacích charakteristik pro různé účinnky je uvedeno na Obr. 5.2 a v plné velikosti v příloze č. 24. Zatěžovací charakteristiky pro $\cos \varphi = 0$ a $\cos \varphi = 1$ jsou uvedeny v přílohách č. 26 a č. 27.



Obrázek 5.1: Zatěžovací charakteristika pro $\cos \varphi = 0,8$



Obrázek 5.2: Porovnání zatěžovacích charakteristik pro jednotlivé $\cos \varphi$

6 Závislost ztrát a účinnosti stroje na zatížení a účinníku

6.1 Závislost účinnosti na zatížení

Cílem je graficky určit závislost účinnosti stroje na jeho zatížení s respektováním účinníku, se kterým stroj pracuje. Závislost účinnosti na zatížení je možno získat spočítáním ztrát pro každou hodnotu daného zatížení a následně pro tuto hodnotu spočítat účinnost.

Aby bylo možné spočítat ztráty v daném stroji v závislosti na jeho zatížení, musíme rozdělit ztráty na závislé a nezávislé na zatížení. Ztráty nezávislé na zatížení jsou stále konstantní, tedy neměnné a označím je jako ztráty naprázdno P_o .

Ztráty naprázdno se skládají ze ztrát mechanických P_m , ztrát povrchových P_p , ztrát ve jhu induktu P_{Fej} a ztrát v zubech P_{Fez} .

$$P_o = P_m + P_p + P_{Fej} + P_{Fez} = 32\,218\text{ W} \quad (6.1)$$

Druhou kategorií jsou ztráty závislé na zatížení. Jedná se o ztráty Jouleovy ve vinutí statoru P_{Cu1} , v budícím vinutí P_{Cub} a dále pak o ztráty přídatné $P_{přid}$.

Jouleovy ztráty ve vinutí statoru:

$$P_{Cu1} = m \cdot R_{\frac{1}{75}} \cdot I_1^2 \quad (6.2)$$

kde I_1 je proud statoru měnící se v závislosti na zatížení a $R_{1/75}$ je odpor vinutí induktu při 75°C.

Jouleovy ztráty v budícím vinutí:

$$P_{Cub} = R_{Cub} \cdot I_b^2 \quad (6.3)$$

kde R_{Cub} je odpor budícího vinutí při 75°C a I_b je proud budícího vinutí. Při určování budícího proudu vycházím ze zatěžovacích charakteristik (Obr. 5.2), kde pro danou hodnotu jmenovitého proudu a pro daný účinník odečtu budící magnetické napětí a z něho určím daný budící proud podle vztahu (2.89).

Přídavné ztráty:

$$P_{příd} = 0,003 \cdot S \cdot (P [\%]/100) \quad (6.4)$$

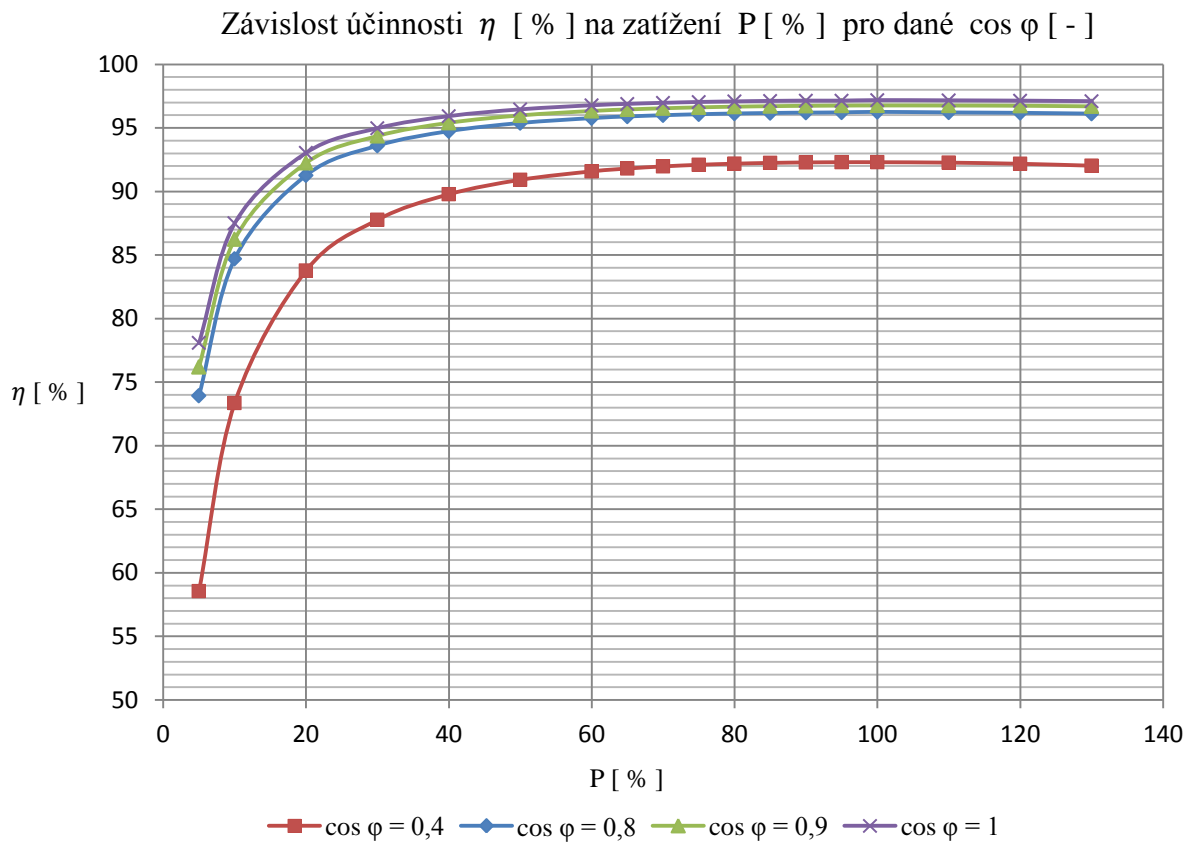
Účinnost stroje:

$$\eta = \frac{P}{P + \sum \Delta P} = \frac{P}{P_i} \cdot 100 [\%], \text{ kde } \sum \Delta P = P_o + P_{Cu1} + P_{příd} + P_{Cub} [W] \quad (6.5)$$

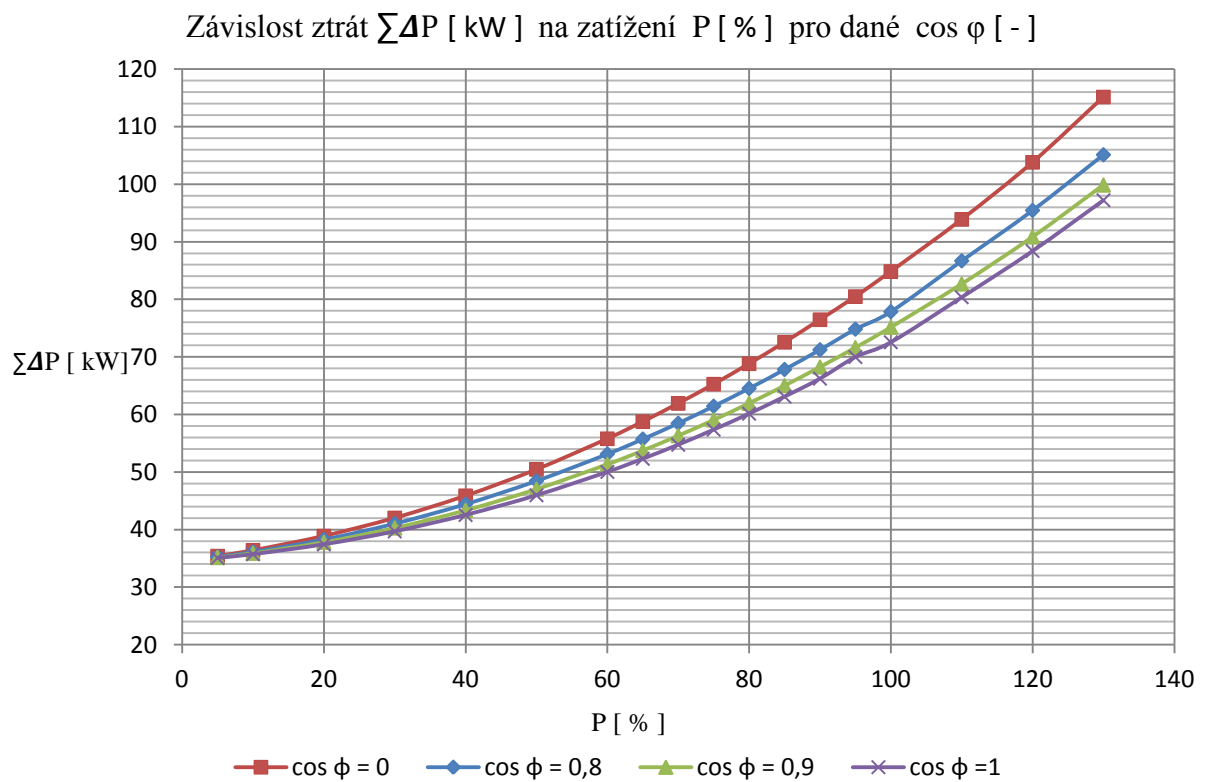
Hodnoty pro sestrojení charakteristiky závislosti účinnosti η na zatížení jsou uvedeny v tabulce (Tab. 6.3). Tato tabulka je sestavena pro jmenovitý účinník $\cos \varphi = 0,8$. K sestrojení tabulky se využijí vztahy, které jsou uvedeny výše. Tabulky pro účinníky $\cos \varphi = 0 - 1 - 0,4 - 0,6 - 0,9$ jsou uvedeny v Příloze č. 14 až č. 18.

Ze znalosti závislosti účinnosti a ztrát na zatížení pro jednotlivé $\cos \varphi$ můžeme sestrojit jednotlivé průběhy (graf č. 6.1 a č. 6.2). Porovnání účinnosti a ztrát na zatížení je také uvedeno v tab. č. 6.1 a v tab. č. 6.2

[2] [3]



Graf 6.1: Závislost účinnosti na zatížení



Graf 6.2: Závislost ztrát na zatížení

$R_s, R_b = konst., \text{při } 75 \text{ }^\circ\text{C}$				
	$\cos \varphi = 0,4$	$\cos \varphi = 0,8$	$\cos \varphi = 0,9$	$\cos \varphi = 1$
P [%]	η [%]	η [%]	η [%]	η [%]
5	58,559	73,929	76,190	78,089
10	73,357	84,700	86,240	87,498
20	83,779	91,266	92,249	93,036
30	87,776	93,597	94,367	94,973
40	89,785	94,737	95,403	95,920
50	90,919	95,377	95,986	96,453
60	91,586	95,760	96,335	96,772
65	91,808	95,889	96,455	96,881
70	91,976	95,989	96,547	96,966
75	92,101	96,065	96,619	97,031
80	92,190	96,123	96,672	97,080
85	92,251	96,163	96,712	97,116
90	92,288	96,192	96,740	97,140
95	92,305	96,210	96,758	97,137
100	92,306	96,25	96,767	97,180
110	92,271	96,209	96,762	97,160
120	92,182	96,174	96,744	97,137
130	92,030	96,114	96,698	97,095

Tabulka 6.1: Porovnání účinnosti pro jednotlivé $\cos \varphi$

$R_s, R_b = konst., \text{při } 75 \text{ }^\circ\text{C}$					
	$\cos \varphi = 0$	$\cos \varphi = 0,4$	$\cos \varphi = 0,8$	$\cos \varphi = 0,9$	$\cos \varphi = 1$
P [%]	$\sum \Delta P$ [kW]	$\sum \Delta P$ [kW]	$\sum \Delta P$ [kW]	$\sum \Delta P$ [kW]	$\sum \Delta P$ [kW]
5	35,40	35,39	35,27	35,16	35,07
10	36,39	36,33	36,13	35,90	35,72
20	38,88	38,74	38,28	37,81	37,43
30	42,03	41,80	41,05	40,29	39,69
40	45,88	45,54	44,44	43,36	42,54
50	50,46	49,99	48,47	47,04	45,97
60	55,79	55,19	53,14	51,35	50,03
65	58,76	58,07	55,74	53,74	52,31
70	61,92	61,15	58,49	56,33	54,75
75	65,27	64,42	61,45	59,06	57,37
80	68,82	67,88	64,54	61,96	60,15
85	72,55	71,52	67,83	65,02	63,11
90	76,47	75,34	71,25	68,25	66,24
95	80,49	79,34	74,84	71,63	69,99
100	84,85	83,51	77,87	75,16	72,55
110	93,89	92,33	86,70	82,68	80,37
120	103,82	101,99	95,47	90,86	88,41
130	115,16	112,84	105,13	99,87	97,23

Tabulka 6.2: Porovnání ztrát pro jednotlivé $\cos \varphi$

cos $\varphi = 0,8$											
P [%]	P [kW]	I_1 [%]	I_1 [A]	F_b [A]	I_b [A]	P_{Cu1} [kW]	P_{Cub} [kW]	$P_{Přid}$ [kW]	$\sum \Delta P$ [kW]	P_i [kW]	η [%]
5	100	5	6,88	8 786	49,62	0,07	2,95	0,38	35,27	135,27	73,929
10	200	10	13,75	9 201	51,97	0,27	3,23	0,75	36,13	236,13	84,700
20	400	20	27,50	10 011	56,54	1,08	3,82	1,50	38,28	438,28	91,266
30	600	30	41,25	10 858	61,32	2,42	4,50	2,25	41,05	641,05	93,597
40	800	40	55,00	11 741	66,31	4,30	5,26	3,00	44,44	844,44	94,737
50	1000	50	68,75	12 661	71,51	6,72	6,12	3,75	48,47	1048,47	95,377
60	1200	60	82,50	13 618	76,91	9,68	7,08	4,50	53,14	1253,14	95,760
65	1300	65	89,38	14 133	79,82	11,36	7,62	4,88	55,74	1355,74	95,889
70	1400	70	96,25	14 649	82,73	13,18	8,19	5,25	58,49	1458,49	95,989
75	1500	75	103,13	15 201	85,85	15,13	8,82	5,63	61,45	1561,45	96,065
80	1600	80	110,00	15 734	88,86	17,21	9,45	6,00	64,54	1664,54	96,123
85	1700	85	116,88	16 305	92,09	19,43	10,15	6,38	67,83	1767,83	96,163
90	1800	90	123,75	16 854	95,19	21,78	10,84	6,75	71,25	1871,25	96,192
95	1900	95	130,63	17 410	98,33	24,27	11,57	7,13	74,84	1974,84	96,210
100	2000	100	137,50	18 000	101,66	26,13	12,36	7,50	77,87	2077,87	96,25
110	2200	110	151,25	19 176	108,30	32,54	14,03	8,25	86,70	2286,70	96,209
120	2400	120	165,00	20 390	115,16	38,72	15,87	9,00	95,47	2495,47	96,174
130	2600	130	178,75	21 752	122,85	45,45	18,06	9,75	105,13	2705,13	96,114

Tabulka 6.3: Závislost ztrát a účinnosti na zatížení pro cos $\varphi = 0,8$

6.2 Závislost účinnosti na zatížení s respektováním oteplení daných částí

Postup sestavování tabulky pro získání průběhů účinnosti a ztrát na zatížení je stejný jako v kapitole 6.1 až na malé výjimky. Jouleovy ztráty ve vinutí induktu a budícího vinutí nebudou mít odpor $R_{1/75}$ a R_{Cub} konstantní, ale budou se měnit v závislosti na teplotě. K určení oteplení budícího vinutí a vinutí induktu pro určitá zatížení stroje využijeme stejný postup jako v kapitole 4, jen s tím rozdílem, že nebudeme dosazovat ztráty pro jmenovitý výkon, ale vždy pro daná zatížení. Počítám vždy oteplení budícího vinutí a střední hodnotu oteplení vinutí induktu pro dané ztráty, které odpovídají danému zatížení.

Pro danou hodnotu oteplení spočítám hodnotu odporu R_s (odpor vinutí induktu pro dané oteplení) podle vztahu (6.7) a R_b (odpor budícího vinutí pro dané oteplení) podle vztahu (6.8), kterou pak dosadím do vztahu (6.2), jedná-li se o indukt, a (6.3), jedná-li se o budící vinutí. Dostaneme celkové ztráty a určíme účinnost.

Při určování odporu nás zajímá pracovní teplota stroje. Ta se buď odhadne podle tepelné odolnosti dané izolace, nebo v našem případě se určilo, že teplota okolí bude rovna nule a pracovní teplota bude rovna oteplení.

Odpor vinutí při teplotě ϑ je:

$$R_{\vartheta} = R_{\vartheta_0} \cdot k_{\vartheta} = R_{\vartheta_0} [1 + \alpha(\vartheta - \vartheta_0)], \text{ když } k_{\vartheta} = [1 + \alpha(\vartheta - \vartheta_0)] \quad (6.6)$$

$$\text{kde součinitel teplotní závislosti } \alpha = \frac{1}{k + \vartheta_0}, k = 235 \text{ pro Cu}$$

Odpor R_s při teplotě ϑ se určí jako:

$$\text{Odpor } R_s \text{ při střídavém proudu při } \vartheta_0 = 20^\circ\text{C: } R_{1/20} = 0,378 \ \Omega$$

$$R_s = 0,378 \left[1 + \frac{1}{235 + 20} (\vartheta - 20) \right] \quad (6.7)$$

Odpor R_b při teplotě ϑ se určí jako:

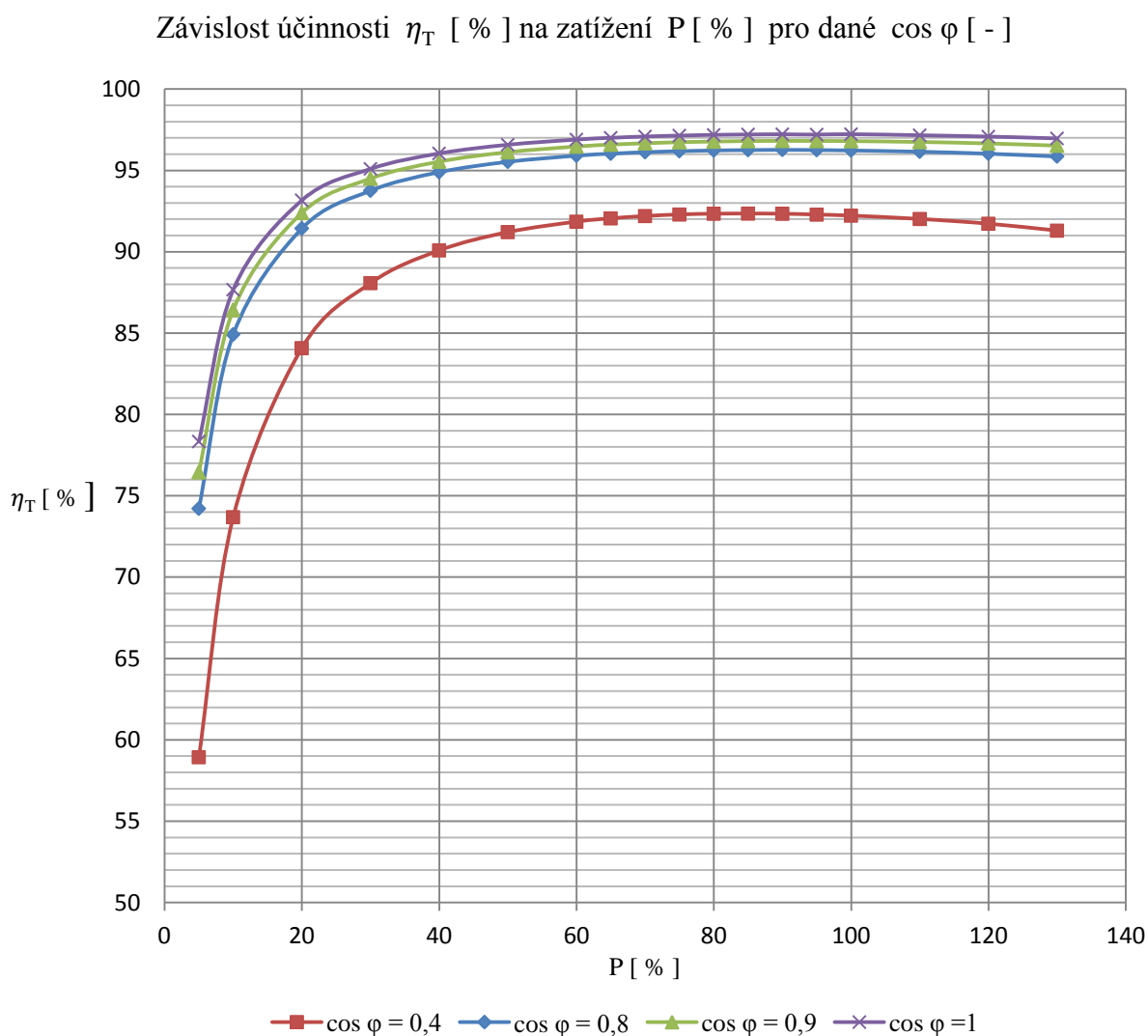
$$\text{Odpor } R_b \text{ při střídavém proudu při } \vartheta_0 = 20^\circ\text{C: } R_{1/20} = 0,984 \ \Omega$$

$$R_b = 0,984 \left[1 + \frac{1}{235 + 20} (\vartheta - 20) \right] \quad (6.8)$$

Hodnoty pro sestrojení charakteristiky závislosti účinnosti η_T na zatížení s respektováním oteplení budícího vinutí a induktu jsou uvedeny v tabulce (tab. 6.4). Tabulka je sestrojena pro jmenovitý účiník $\cos \varphi = 0,8$. Tabulky pro účinníky $\cos \varphi = 0 - 1 - 0,4 - 0,6 - 0,9$ jsou uvedeny v Příloze č. 19 až č. 23.

Ze znalosti závislosti účinnosti a ztrát na zatížení pro jednotlivé $\cos \varphi$ můžeme sestrojit jednotlivé průběhy (graf č. 6.3 a č. 6.4). Dále můžeme vykreslit průběhy oteplení induktu (graf č. 6.6) a budícího vinutí (graf č. 6.5) v závislosti na zatížení stroje pro jednotlivé $\cos \varphi$. Porovnání účinnosti a ztrát na zatížení je také uvedeno v tab. č. 6.5 a v tab. č. 6.6.

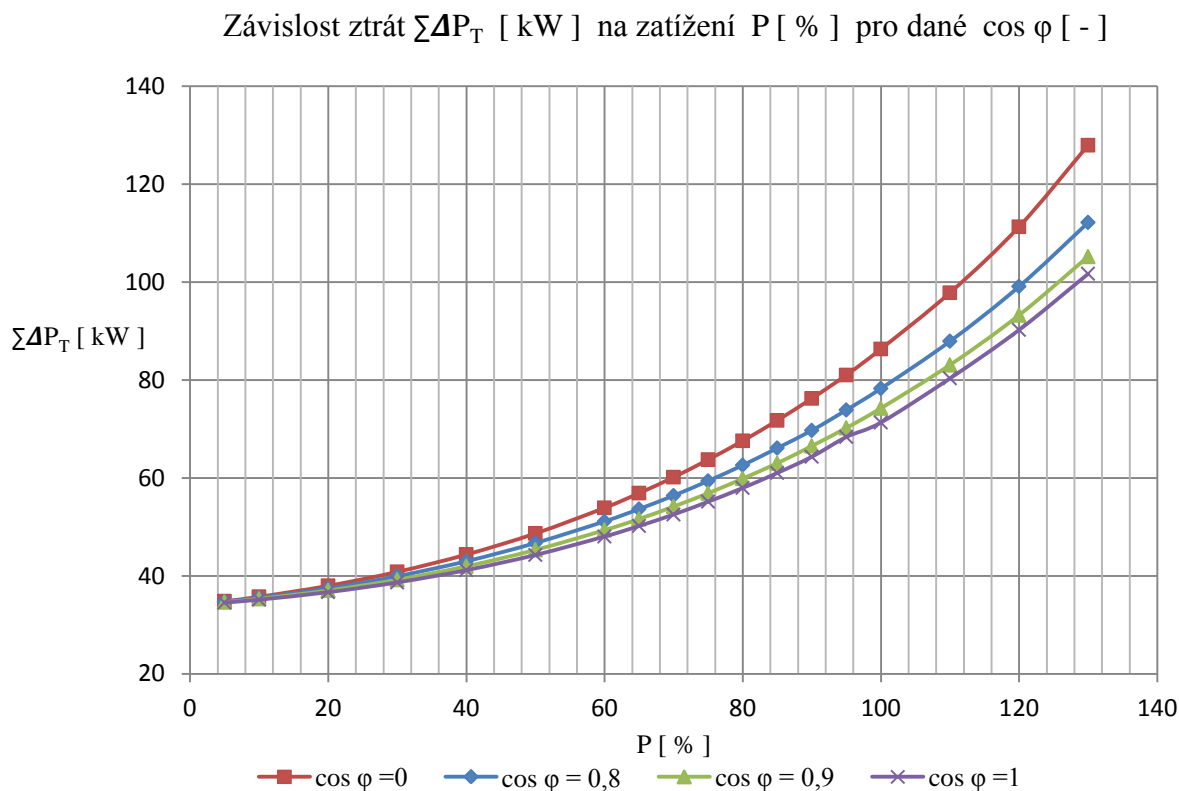
[2] [3]



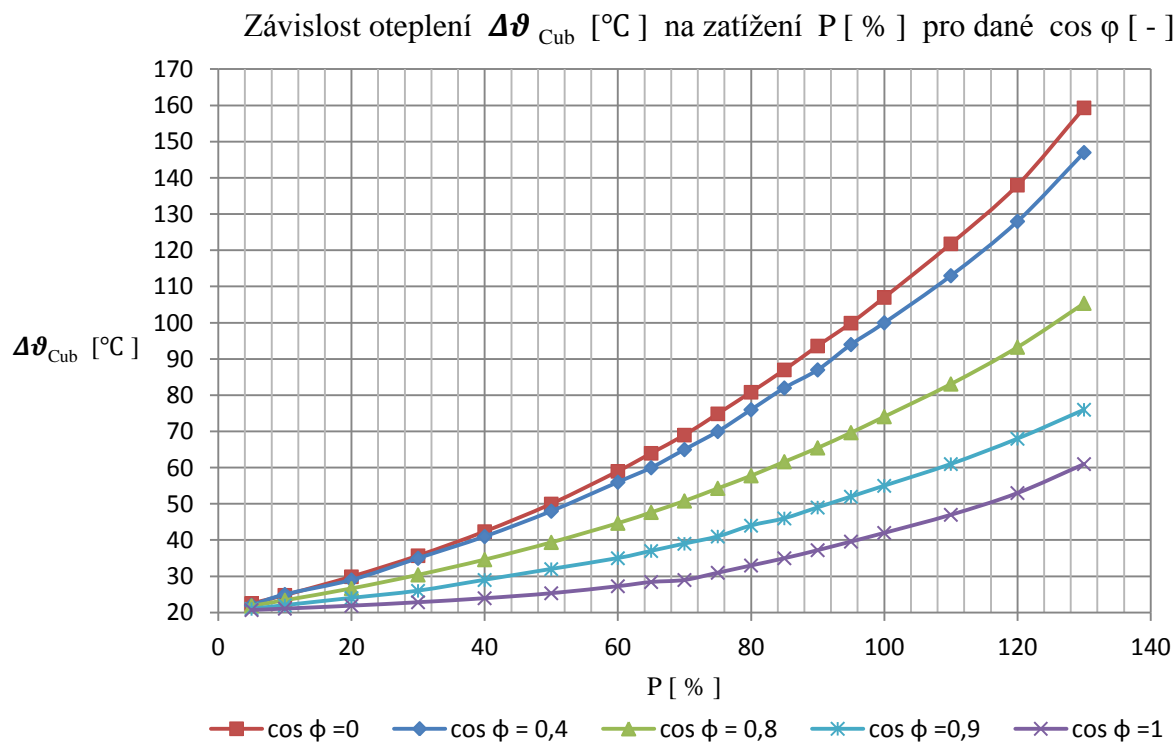
Graf 6.3: Závislost účinnosti na zatížení

$\cos \varphi = 0,8$															
P [%]	P [kW]	I_1 [%]	I_1 [A]	F_b [A]	I_b [A]	P_{Cu1} [kW]	P_{Cub} [kW]	$P_{Přid}$ [kW]	$\sum \Delta P_T$ [kW]	P_i [kW]	η_T [%]	R_s [Ω]	R_b [Ω]	$\Delta \vartheta_{SCu}$ [$^{\circ}\text{C}$]	$\Delta \vartheta_{Cub}$ [$^{\circ}\text{C}$]
5	100	5	6,87	8 786	49,62	0,05	2,44	0,38	34,75	134,75	74,214	0,37	0,99	8,50	21,86
10	200	10	13,75	9 201	51,96	0,21	2,69	0,75	35,53	235,53	84,914	0,37	1,00	9,34	23,41
20	400	20	27,5	10 011	56,5	0,86	3,23	1,50	37,46	437,46	91,436	0,38	1,01	11,86	26,67
30	600	30	41,25	10 858	61,324	1,96	3,85	2,25	39,94	639,94	93,760	0,38	1,02	15,46	30,43
40	800	40	55	11 741	66,31	3,54	4,58	3,00	42,99	842,99	94,900	0,39	1,04	20,14	34,63
50	1 000	50	68,75	12 661	71,5	5,68	5,41	3,75	46,72	1046,72	95,536	0,40	1,06	26,84	39,39
60	1 200	60	82,5	13 618	76,9	8,36	6,39	4,50	51,13	1251,13	95,914	0,41	1,08	32,78	44,69
65	1 300	65	89,4	14 133	79,8	9,96	6,95	4,88	53,66	1353,66	96,036	0,42	1,09	36,62	47,68
70	1 400	70	96,3	14 649	82,7	11,72	7,55	5,25	56,40	1456,40	96,128	0,42	1,10	40,73	50,83
75	1 500	75	103,13	15 201	85,85	13,67	8,23	5,63	59,40	1559,40	96,191	0,43	1,12	45,12	54,31
80	1 600	80	110	15 734	88,86	15,81	8,92	6,00	62,61	1662,61	96,234	0,44	1,13	49,75	57,79
85	1 700	85	116,87	16 305	92,1	18,15	9,71	6,38	66,11	1766,11	96,257	0,44	1,14	54,64	61,66
90	1 800	90	123,7	16 854	95,2	20,58	10,51	6,75	69,71	1869,71	96,272	0,45	1,16	57,84	65,48
95	1 900	95	130,63	17 410	98	23,51	11,37	7,13	73,88	1973,88	96,257	0,46	1,18	65,30	69,68
100	2 000	100	137,5	18 000	101,6	26,56	12,33	7,50	78,27	2078,27	96,234	0,47	1,19	71,23	74,10
110	2 200	110	151,3	19 176	108,3	33,39	14,40	8,25	87,92	2287,92	96,157	0,49	1,23	83,12	83,11
120	2 400	120	165	20 390	115,16	41,44	16,80	9,00	99,11	2499,11	96,034	0,51	1,27	96,72	93,28
130	2 600	130	178,5	21 752	122,85	50,72	19,83	9,75	112,17	2712,17	95,864	0,53	1,31	110,96	105,39

Tabulka 6.4: Závislost ztrát a účinnosti na zatížení s respektováním oteplení pro $\cos \varphi = 0,8$

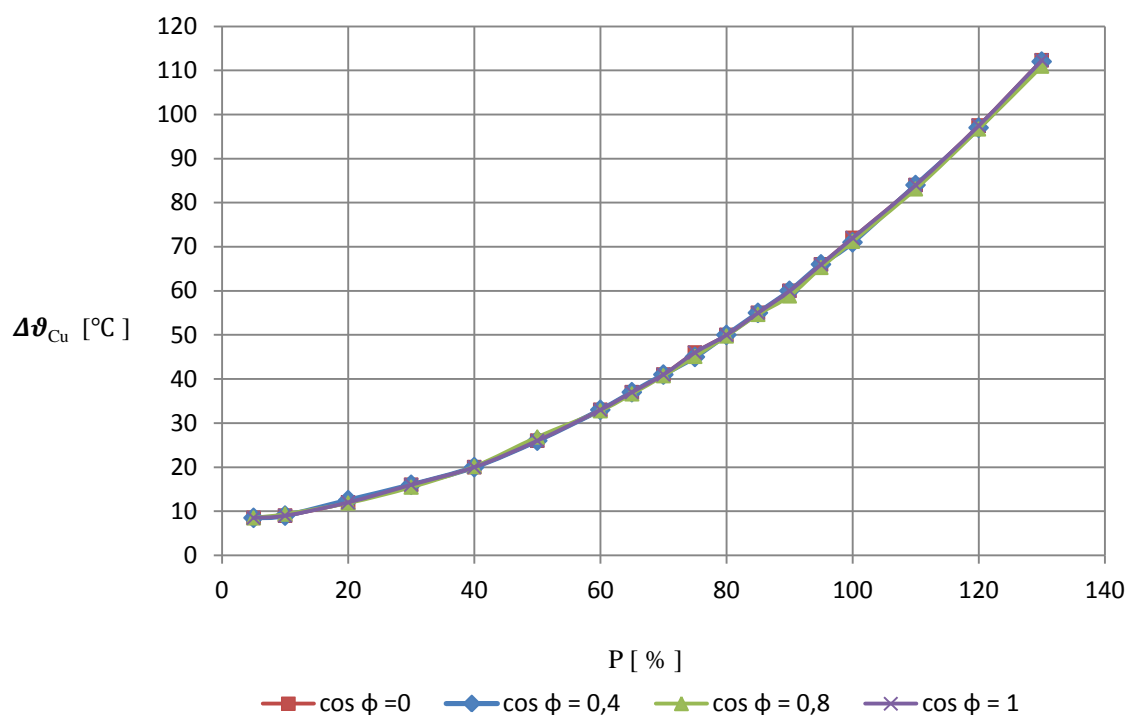


Graf 6.4: Závislost ztrát na zatížení



Graf 6.5: Závislost oteplení budícího vinutí na zatížení

Závislost oteplení $\Delta\vartheta_{Cu}$ [°C] na zatížení P [%] pro dané $\cos \varphi$ [-]

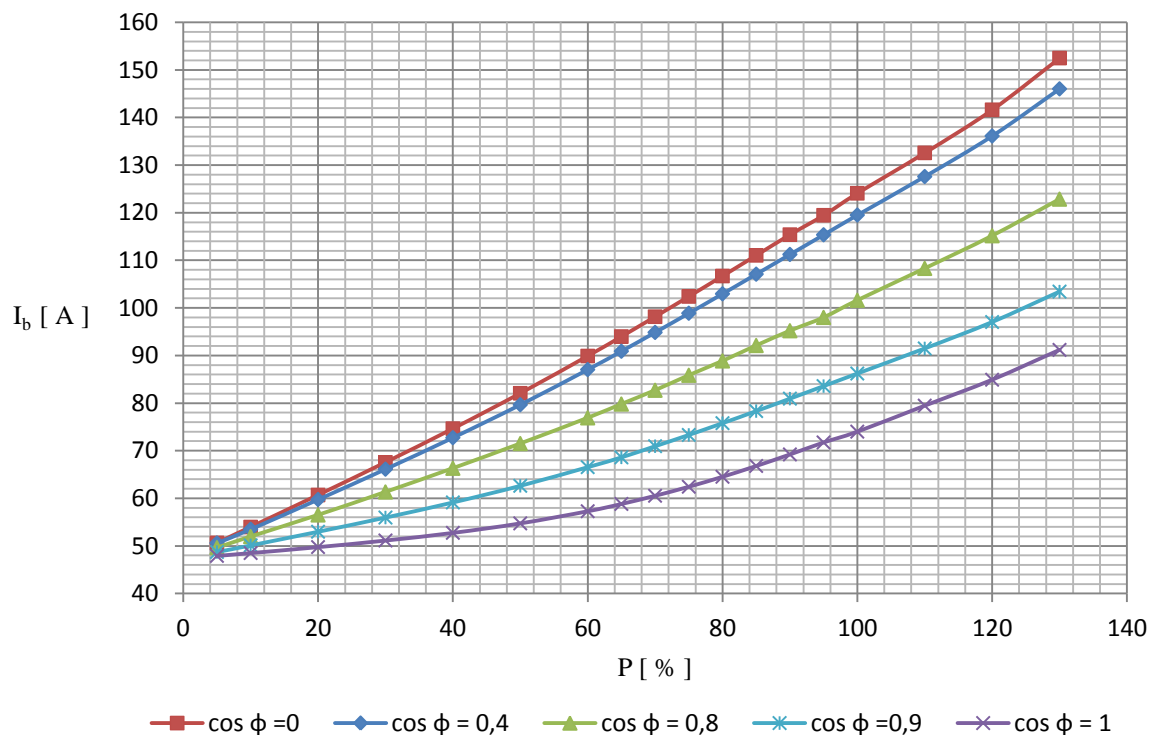


Graf 6.6: Závislost oteplení vinutí induktu na zatížení

R_s, R_b při respektování $\Delta\vartheta_{SCu}$ a $\Delta\vartheta_{Cub}$				
	$\cos \varphi = 0,4$	$\cos \varphi = 0,8$	$\cos \varphi = 0,9$	$\cos \varphi = 1$
P [%]	η_T [%]	η_T [%]	η_T [%]	η_T [%]
5	58,931	74,214	76,453	78,336
10	73,686	84,914	86,429	87,669
20	84,077	91,436	92,394	93,164
30	88,069	93,760	94,507	95,095
40	90,080	94,900	95,544	96,044
50	91,204	95,536	96,127	96,578
60	91,848	95,914	96,473	96,896
65	92,051	96,036	96,590	97,003
70	92,193	96,128	96,674	97,085
75	92,288	96,191	96,739	97,142
80	92,334	96,234	96,780	97,183
85	92,345	96,257	96,810	97,208
90	92,333	96,272	96,819	97,220
95	92,281	96,257	96,815	97,201
100	92,218	96,234	96,806	97,226
110	92,013	96,157	96,753	97,161
120	91,722	96,034	96,662	97,080
130	91,296	95,864	96,529	96,966

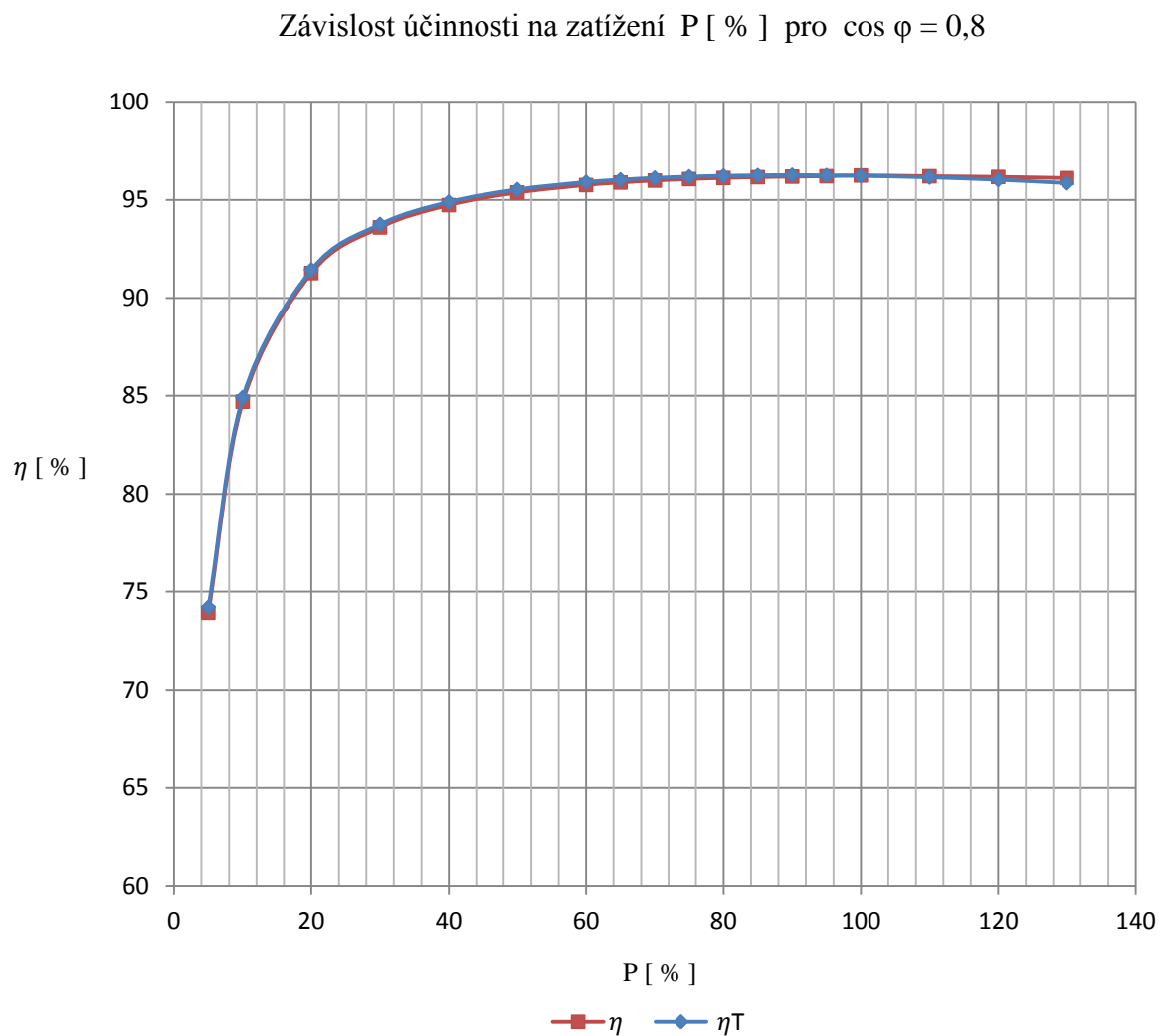
Tabulka 6.5: Porovnání účinnosti pro jednotlivé $\cos \varphi$

R_S, R_b při respektování $\Delta\vartheta_{SCu}$ a $\Delta\vartheta_{Cub}$					
	$\cos \varphi = 0$	$\cos \varphi = 0,4$	$\cos \varphi = 0,8$	$\cos \varphi = 0,9$	$\cos \varphi = 1$
P [%]	$\sum \Delta P_T$ [kW]	$\sum \Delta P_T$ [kW]	$\sum \Delta P_T$ [kW]	$\sum \Delta P_T$ [kW]	$\sum \Delta P_T$ [kW]
5	34,85	34,85	34,75	34,65	34,57
10	35,76	35,71	35,53	35,33	35,16
20	38,00	37,88	37,46	37,04	36,69
30	40,85	40,64	39,94	39,23	38,68
40	44,38	44,05	42,99	41,98	41,19
50	48,69	48,22	46,72	45,33	44,29
60	53,91	53,26	51,13	49,36	48,05
65	56,91	56,13	53,66	51,63	50,21
70	60,16	59,27	56,40	54,18	52,55
75	63,75	62,67	59,40	56,89	55,17
80	67,58	66,42	62,61	59,88	57,97
85	71,75	70,46	66,11	63,02	61,03
90	76,24	74,73	69,71	66,53	64,34
95	81,01	79,46	73,88	70,22	68,38
100	86,33	84,39	78,27	74,24	71,33
110	97,81	95,48	87,92	83,07	80,35
120	111,28	108,31	99,11	93,23	90,24
130	127,93	123,93	112,17	105,19	101,70

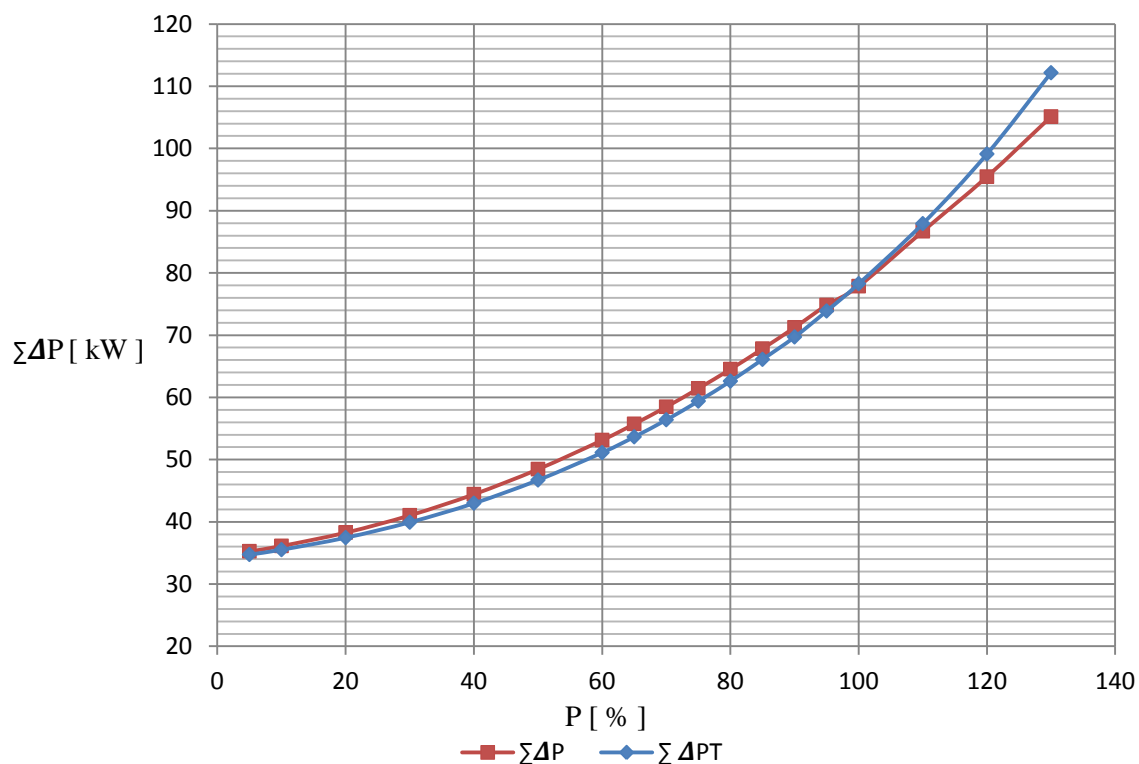
Tabulka 6.6: Porovnání ztrát pro jednotlivé $\cos \varphi$ Závislost I_b [A] na zatížení P [%] pro dané $\cos \varphi$ [-]Graf 6.7: Závislost budícího proudu na zatížení pro jednotlivé $\cos \varphi$

6.3 Porovnání účinnosti a ztrát

Porovnání průběhů účinnosti stroje pro $\cos \varphi = 0,8$, kde účinnost η je určena bez uvažování závislosti oteplení daných částí stroje na jeho zatížení a účinnost η_T tuto závislost respektuje, jsou zobrazena v grafu č. 6.8. Porovnání ztrát je uvedeno v grafu č. 6.9. Porovnání účinnosti a ztrát je uvedeno také v tab. č. 6.7.



Graf 6.8: Porovnání průběhů účinnosti stroje pro $\cos \varphi = 0,8$.

Závislost ztrát na zatížení P [%] pro $\cos \varphi = 0,8$ Graf 6.9: Porovnání ztrát stroje pro $\cos \varphi = 0,8$.

P [%]	$\cos \varphi = 0,8$			
	$R_s, R_b = \text{konst.}, \text{při } 75 \text{ } ^\circ\text{C}$		$R_s, R_b \text{ při respektování } \Delta\vartheta_{scu} \text{ a } \Delta\vartheta_{cub}$	
	$\Sigma \Delta P$ [kW]	η [%]	$\Sigma \Delta P_T$ [kW]	η_T [%]
5	35,27	73,929	34,75	74,214
10	36,13	84,700	35,53	84,914
20	38,28	91,266	37,46	91,436
30	41,05	93,597	39,94	93,760
40	44,44	94,737	42,99	94,900
50	48,47	95,377	46,72	95,536
60	53,14	95,760	51,13	95,914
65	55,74	95,889	53,66	96,036
70	58,49	95,989	56,40	96,128
75	61,45	96,065	59,40	96,191
80	64,54	96,123	62,61	96,234
85	67,83	96,163	66,11	96,257
90	71,25	96,192	69,71	96,272
95	74,84	96,210	73,88	96,257
100	77,87	96,25	78,27	96,234
110	86,70	96,209	87,92	96,157
120	95,47	96,174	99,11	96,034
130	105,13	96,114	112,17	95,864

Tabulka 6.7: Porovnání ztrát a účinnosti pro $\cos \varphi = 0.8$

7 Konstrukční uspořádání stroje

Konstrukční uspořádání stroje vychází z koncepce vzduchem chlazených strojů. Vnější konstrukční uspořádání, jako jsou ložiskové stojany, vnější tvar krytu, základová deska s kostrou a další vnější prvky, bylo inspirováno stroji, které se vyráběly v době nedávno minulé. Vzhledem k tomu, že v návrhu nebyl proveden ventilační výpočet, byly vnitřní rozměry stroje odhadnuty, odhad se týká především radiálního ventilátoru, kde se odhadl tvar a rozměr lopatek a chladících otvorů ve jhu rotoru. Tato zjednodušení nijak výrazně neovlivní celkovou podobu stroje. Pro ilustraci konstrukčního uspořádání stroje jsou přiložené výkresy v příloze dostačující (Příloha č. 30 a Příloha č. 31).

Závěr

V diplomové práci jsem se v jedné části zabýval návrhem vzduchem chlazeného synchronního generátoru s vyniklými póly dle zadaných parametrů. Cílem elektromagnetického návrhu bylo určení hlavních rozměrů stroje. Dále jsem navrhl satorové, budící a tlumící (rozběhové) vinutí. V neposlední řadě bylo provedeno dimenzování magnetického obvodu a s tím spojené sestavení charakteristiky naprázdno (Obr. 2.4), určení ztrát v jednotlivých částech stroje a následné určení celkových ztrát a účinnosti stroje. Elektromagnetický návrh uvedený v této práci je do určité míry zjednodušen. V praxi se používají výpočetní programy, které vlivem velkých zkušeností, propracovaných technologických procesů a řešení v daných firmách jsou velice propracované a prochází neustálým zlepšováním.

Součástí návrhu je také určení mezipólového rozptylu. Celkový rozptylový magnetický tok činí 12,5 % z toku hlavního. Z výsledků je patrné, že výpočet rozptylového toku pomocí analytické metody je dostatečně přesný. Výsledné hodnoty vypočtené pomocí MKP se liší od analytického řešení upraveného pro potřeby MKP velmi nepatrně, o pouhých 0,003 %, z toho také vyplývá správnost úpravy rovnice magnetické vodivosti pro potřeby MKP.

Dále jsem se zabýval oteplením satorového a budícího vinutí pomocí metody náhradních tepelných obvodů, které je uvedeno v kap. č. 4. Tepelnému výpočtu nepředcházela ventilační výpočet stroje, z tohoto důvodu byly některé veličiny voleny s přihlédnutím na výkon stroje, ztráty v budícím vinutí a pólovém nástavci a na typu chlazení stroje. Jedná se hlavně o součinitele přestupu tepla a oteplení chladiwa mezi póly budícího vinutí. Dále byly zavedeny zjednodušující podmínky, a to zejména pro teplotu okolí, která by měla podle ČSN nabývat hodnoty 40 °C. Vzhledem k tomu, že cílem je určit oteplení, byla zvolena hodnota teploty okolí 0 °C. Výpočet oteplení je rozdělen do dvou částí. V první části (kap. 4.2) je proveden výpočet oteplení satorového vinutí, kde byl proveden výpočet oteplení drážkové části satorového vinutí a výpočet oteplení čel vinutí. Vzhledem k malému rozdílu oteplení mezi drážkovou částí a čelem vinutí byla stanovena střední hodnota oteplení satorového vinutí na $\Delta\vartheta_{SCu} = 72,5$ °C.

Ve druhé části (kap. 4.3) byl proveden výpočet oteplení budícího vinutí. Při výpočtu byly použity zjednodušující parametry - po celém obvodu a výšce jádrové cívky platí stejné chladičí podmínky, zavedení náhradní tepelné vodivosti cívky, která respektuje tepelnou

vodivost vodiče a cívky. Po dodržení všech zjednodušení byla vypočtena hodnota oteplení pólové cívky $\Delta\vartheta_{Cub} = 74 \text{ }^\circ\text{C}$.

Porovnáme-li tuto hodnotu s hodnotou získanou pro orientační výpočet oteplení pólové cívky, která nabývá hodnotu $\Delta\vartheta_{Cubo} = 73,24 \text{ }^\circ\text{C}$, zjistíme minimální odchylku, tudíž obě metody jsou srovnatelné. Oteplení statorového a budícího vinutí vyhovují tepelné třídě izolace B.

Cílem této práce bylo určit závislost ztrát a účinnosti na zatížení. Nejdříve začneme u zatěžovacích charakteristik (obr. 5.2). Pro jmenovité zatížení (100% In) a různé $\cos \varphi$ se mění budící magnetické napětí, které je úměrné budicímu proudu I_b (graf 6.7). Se zvyšujícím se budícím proudem (snižování $\cos \varphi$) rostou také celkové ztráty ve stroji (graf 6.4), jejichž nezanedbatelnou složkou jsou právě ztráty v budícím vinutí, které jsou úměrné druhé mocnině proudu. Rostoucí ztráty rovněž ovlivní průběh oteplení budícího vinutí (graf 6.5). Jak je vidět z průběhů (graf 6.5), oteplení budícího vinutí se zvedá nejen s rostoucím zatížením stroje, ale také velmi závisí na účinníku, se kterým stroj pracuje, na rozdíl od oteplení vinutí induktu.

Provozování stroje s menším účinníkem, než pro který byl stroj navržen, by způsobilo velké ztráty ve stroji. Především budící vinutí by bylo velmi tepelně přetěžováno, a to nad hranici tepelné třídy izolace. Z toho je patrné, že stroj navržený pro určitý $\cos \varphi$, by měl pracovat okolo účinníku, pro který byl navržen, v tomto případě na $\cos \varphi = 0.8$.

Další důležitou veličinou pro hodnocení stroje je účinnost. Průběhy účinnosti pro jednotlivé účinníky je vidět na grafu č. 6.3. Při malém zatížení stroje je účinnost velmi malá. To je způsobeno ztrátami naprázdno, které jsou nezávislé na zatížení, a tudíž se projeví nejvíce při malém zatížení. Budeme-li zvětšovat zatížení stroje, budou se zvětšovat i celkové ztráty. Z počátku ztráty rostou pomaleji než dané zatížení a účinnost stoupá. Od určité hodnoty zatížení, okolo 70 %, začnou ztráty pro různé $\cos \varphi$ růst přibližně stejně rychle (graf. 6.4), jako dané zatížení a účinnost je téměř konstantní.

Porovnáme-li průběhy (graf 6.8) účinnosti stroje v závislosti a bez závislosti na oteplení daných částí stroje pro $\cos \varphi = 0.8$, zjistíme, že dané průběhy účinností se mění jen nepatrně. Největší činnost stroje bez uvažování oteplení daných částí je 96,25 % při jmenovitém zatížení (100 % P). Budeme-li brát v úvahu i oteplení daných částí stroje při změnách zatížení, dostaneme se na největší účinnost 96,247 % při 90-ti procentním zatížení. Při porovnání ztrát v a bez závislosti na oteplení daných částí stroje (graf 6.9) je

vidět, že při cca jmenovitém zatížení jsou ztráty stejně velké. Je to dáno tím, že ztráty bez závislosti na oteplení byly počítány pro oteplení při jmenovitém výkonu. Z toho je zřejmé, že když budeme brát v úvahu oteplení daných částí, tak ztráty (respektující oteplení daných částí) pod hranicí jmenovitého zatížení budou menší a nad hranicí jmenovitého zatížení budou naopak větší než ztráty bez závislosti na oteplení daných částí stroje.

Na závěr práce je vložena výkresová dokumentace, která byla vytvořena společně s elektromagnetickým návrhem. Elektrická část stroje byla zakreslena podle elektromagnetického návrhu. Jedná se zejména o vnitřní vrtání statoru, velikost jhu statoru, drážkovou část statoru, efektivní délku stroje a rotor. Rozměry týkající se především radiálního ventilátoru, jako jsou tvar a rozměr lopatek, dále chladících otvorů ve jhu rotoru a dalších vnitřních rozměrů stroje, byly odhadnuty z důvodu absence ventilačního výpočtu.

Seznam použité a citované literatury

- [1] WIEDEMANN, E. a KELLENBERGER, W. *Konstrukce elektrických strojů*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1973. 650 s.
- [2] ČERVENÝ, Josef. *Stavba elektrických strojů - učební materiály předmětu KEV / SES1,2*. Plzeň, 2012 [cit. 2015-03-27]. Dostupné z: <https://courseware.zcu.cz/wps/myportal/predmety/>. Výukový materiál. Západočeská univerzita v Plzni.
- [3] ČERVENÝ, Josef. *Postup při návrhu synchronního stroje*. Plzeň, 2012 [cit. 2015-03-27]. Dostupné z: <https://courseware.zcu.cz/wps/myportal/predmety/>. Výukový materiál. Západočeská univerzita v Plzni.
- [4] KOPYLOV, Igor Petrovič aj. *Stavba elektrických strojů*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988. 685 s.
- [5] CIGÁNEK, Ladislav. *Stavba elektrických strojů*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1958. 714 s.
- [6] PETROV, Georgij Nikolajevič. *Elektrické stroje 2: asynchronní stroje - synchronní stroje*. Vyd. 1. Praha: Academia, 1982. 728 s.

Seznam příloh

- Příloha 1:** Diagram průměrů synchronních strojů
- Příloha 2:** Diagram obvodové proudové hustoty a indukce ve vzduchové mezeře
- Příloha 3:** Tabulka rozměrů drážky M
- Příloha 4:** Tabulka rozměrů měděných pasů
- Příloha 5:** Diagram činitele základní harmonické a činitele tvaru magnetického toku
- Příloha 6:** Diagram deformačního činitele magnetického napětí
- Příloha 7:** Diagram Carterova činitele na drážkování
- Příloha 8:** Diagram činitele povrchových ztrát v pólovém nastavci
- Příloha 9:** Tabulka rozměrů kartáčů
- Příloha 10:** Diagram dynamových plechů
- Příloha 11:** Nomogram k určení skutečné indukce v zubech induktu
- Příloha 12:** Tabulka rozměrů plochých měděných tyčí se zaoblenými hranami
- Příloha 13:** Tingleyho schéma
- Příloha 14:** Tabulka závislosti ztrát a účinnosti na zatížení pro $\cos \varphi = 0$
- Příloha 15:** Tabulka závislosti ztrát a účinnosti na zatížení pro $\cos \varphi = 1$
- Příloha 16:** Tabulka závislosti ztrát a účinnosti na zatížení pro $\cos \varphi = 0,4$
- Příloha 17:** Tabulka závislosti ztrát a účinnosti na zatížení pro $\cos \varphi = 0,6$
- Příloha 18:** Tabulka závislosti ztrát a účinnosti na zatížení pro $\cos \varphi = 0,9$
- Příloha 19:** Tabulka závislosti ztrát a účinnosti na zatížení s respektováním oteplení pro $\cos \varphi = 0$
- Příloha 20:** Tabulka závislosti ztrát a účinnosti na zatížení s respektováním oteplení pro $\cos \varphi = 1$
- Příloha 21:** Tabulka závislosti ztrát a účinnosti na zatížení s respektováním oteplení pro $\cos \varphi = 0,4$

Příloha 22: Tabulka závislosti ztrát a účinnosti na zatížení s respektováním oteplení pro $\cos \varphi = 0,6$

Příloha 23: Tabulka závislosti ztrát a účinnosti na zatížení s respektováním oteplení pro $\cos \varphi = 0,9$

Příloha 24: Porovnání zatěžovacích charakteristik

Příloha 25: Zatěžovací charakteristika pro $\cos \varphi = 0,8$

Příloha 26: Zatěžovací charakteristika pro $\cos \varphi = 0$

Příloha 27: Zatěžovací charakteristika pro $\cos \varphi = 1$

Příloha 28: Pilové schéma vinutí

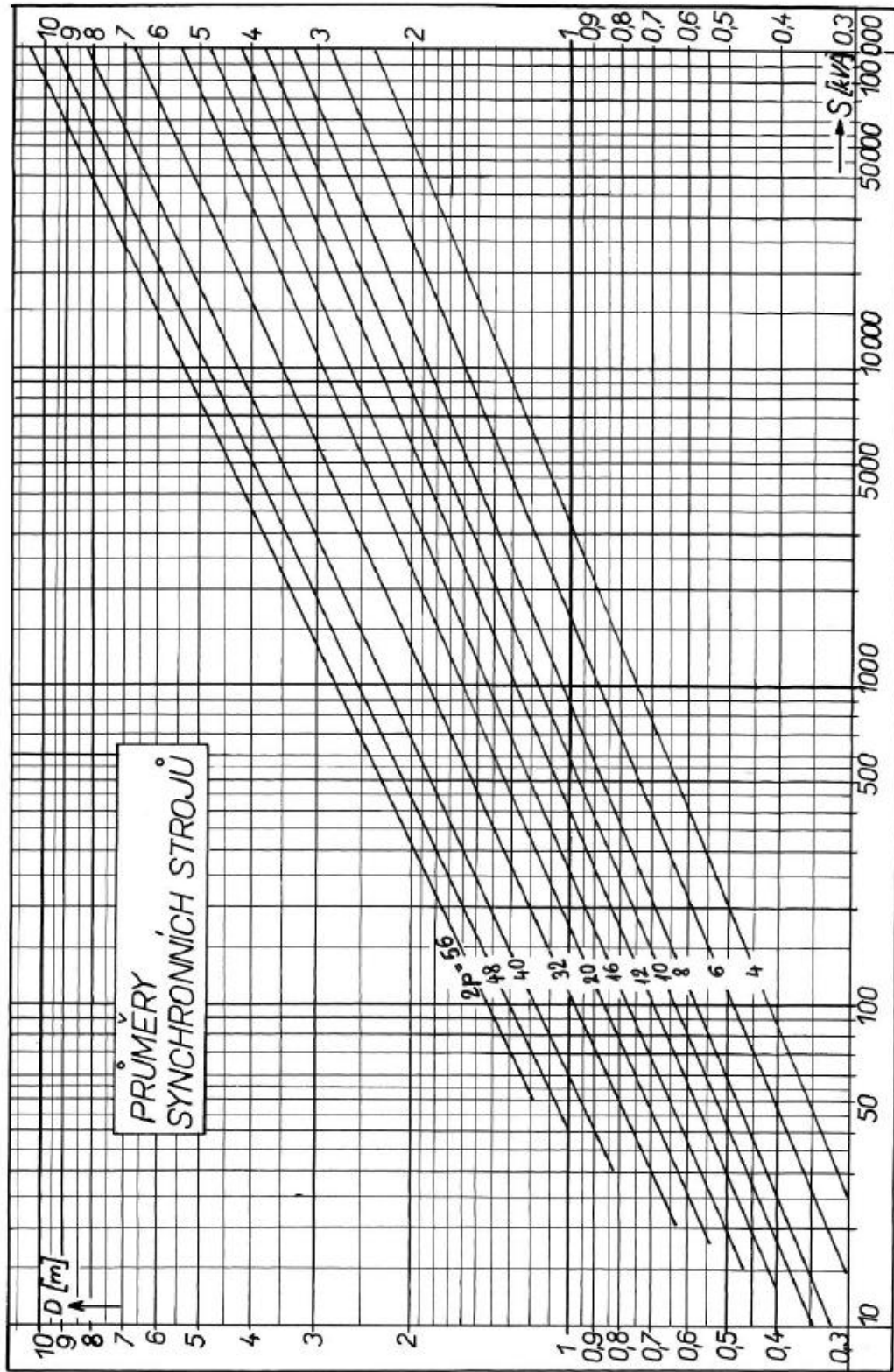
Příloha 29: Úsečkové schéma vinutí

Příloha 30: Příčný řez stroje

Příloha 31: Podélný řez stroje

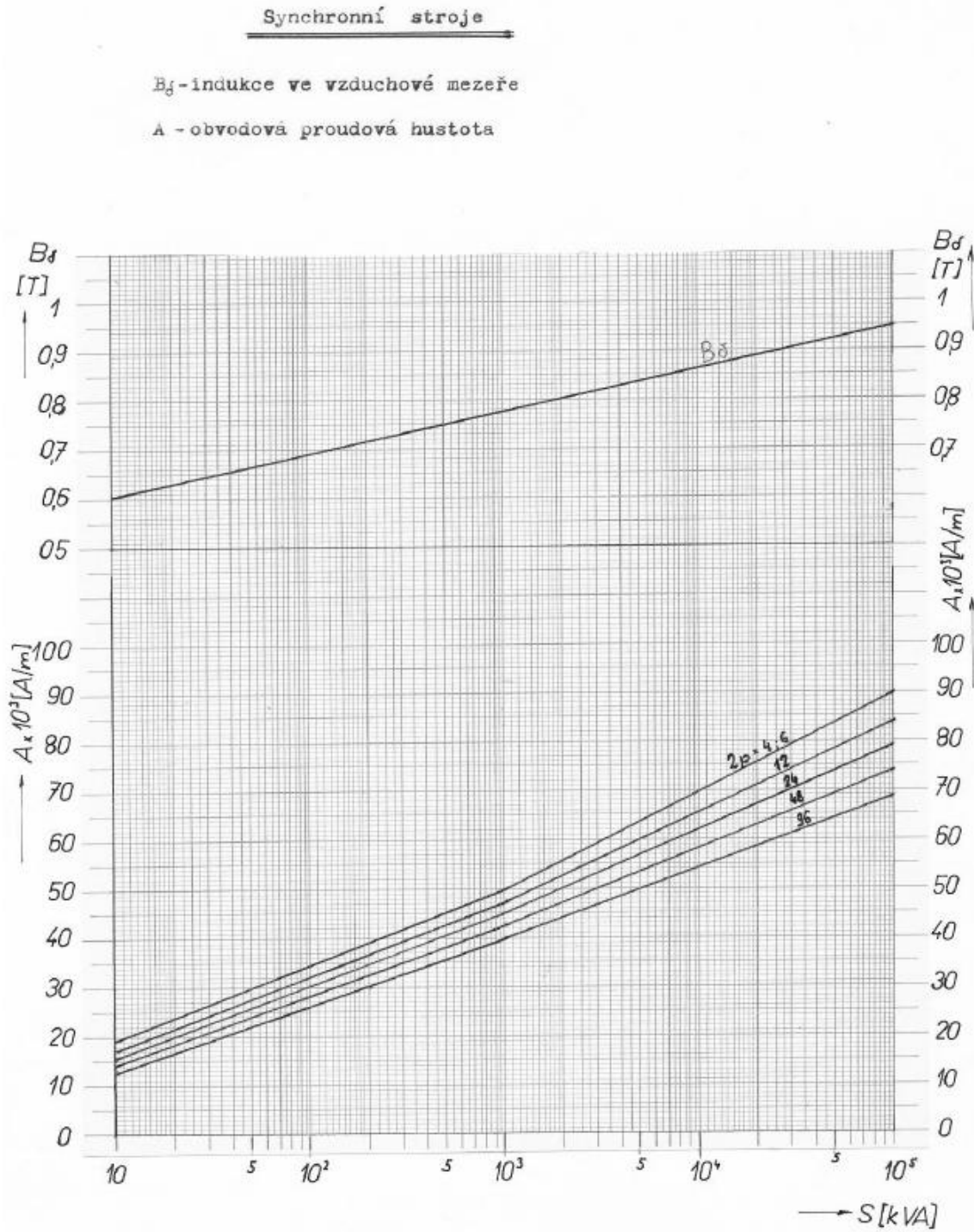
Přílohy

Příloha 1: Diagram průměrů synchronních strojů



[2][3]

Příloha 2: Diagram obvodové proudové hustoty a indukce ve vzduchové mezeře



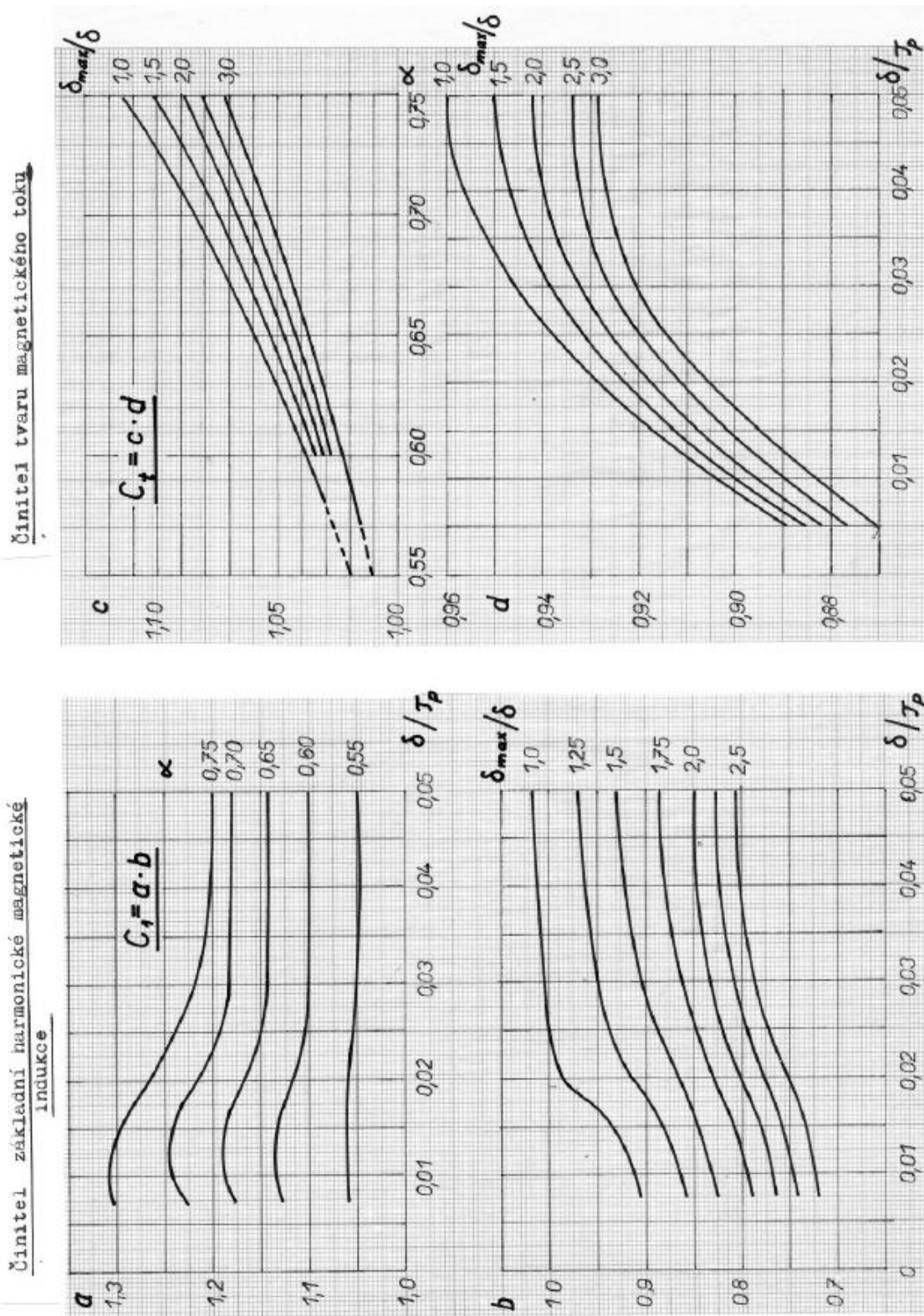
[2][3]

Příloha 3: Tabulka rozměrů drážky M

Drážka M'					Drážka W						Drážka U
b_1	h_0	h_1	a_2	λ_0	b_1	h_0	h_2	h_1	u	λ_0	b_1
5		3,5	1,2	0,704	4	2,2		0,90	1,30	0,561	1,4
5,2		3,5	1,1	0,658	4,2			1,00	1,40	0,587	1,5
5,5		3,6	1,2	0,664	4,4			0,95	1,55	0,516	1,6
5,8		3,5	1,2	0,621	4,6			1,05	1,45	0,540	1,7
6		3,3	1,1	0,581	4,8	2,5		1,15	1,35	0,562	1,8
6,3		4,0	1,4	0,630	5			1,25	1,25	0,583	1,9
6,6		3,6	1,25	0,580	5,2			1,35	1,15	0,603	2
7		4,0	1,4	0,576	5,5	2,8		1,35	1,25	0,553	2,2
7,3		3,6	1,25	0,517	5,8			1,50	1,10	0,580	2,4
7,6	0,7	4,0	1,4	0,536	6		0,5	1,50	1,00	0,550	2,6
8		4,0	1,4	0,522	6,2	3,0		1,60	0,90	0,567	2,8
8,5		3,6	1,15	0,455	6,5			1,75	0,75	0,590	3
9		4,0	1,4	0,462	6,8			1,90	0,60	0,613	3,2
9,5		3,6	1,15	0,412	7	3,2		1,90	0,50	0,585	3,4
10				0,420	7,2			2,00	0,40	0,599	3,6
10,5				0,402	7,5			1,60	1,40	0,477	3,8
11				0,386	7,8	3,5		1,72	1,28	0,493	4
11,5		4,0	1,4	0,371	8			1,80	1,20	0,503	4,2
12				0,356	8,5			1,80	1,20	0,506	4,4
12,5				0,343	9	4,0		2,00	1,00	0,528	4,6
13				0,331	9,5			2,20	0,80	0,550	4,8
13,5				0,404	10			2,20	0,80	0,505	5
14				0,390	10,5	4,5		2,40	0,60	0,524	5,2
14,5				0,372	11			2,60	0,40	0,541	5,5
15		5,0	1,65	0,366	11,5			1,95	1,05	0,412	5,8
15,5				0,355	12	5,0	0,7	2,10	0,90	0,424	6
16				0,343	12,5			2,25	0,75	0,436	6,2
16,5				0,392	13			2,25	1,25	0,407	6,5
17				0,391	13,5			2,40	1,10	0,418	6,8
17,5		6,0	1,6	0,368	14	5,5		2,55	0,95	0,428	7
18				0,362	14,5			2,55	0,95	0,403	7,2
18,5				0,352	15			2,70	0,80	0,432	7,5
19				0,344	15,5			2,85	0,65	0,472	7,8
19,5				0,461	16			3,00	0,50	0,480	8
20	1,0			0,450	16,5			3,15	0,65	0,489	8,5
20,5				0,441	17			3,30	0,70	0,497	9
21				0,430	17,5			3,45	0,55	0,504	9,5
21,5				0,415	18	6,0		3,60	0,40	0,512	10
22				0,405	18,5			3,75	0,25	0,519	10,5
22,5				0,397	19			3,90	0,10	0,525	11
23		9,0	2,45	0,389	20		1,0	2,80	1,20	0,414	11,5
23,5				0,388	21			3,00	1,00	0,422	12
24				0,382	22			3,20	0,80	0,430	12,5
25				0,367	23			3,40	0,60	0,436	13
26				0,354	24			3,40	0,60	0,395	13,5
27				0,342	25			3,60	0,40	0,402	14
28				0,322	26			3,80	0,20	0,408	14,5
30				0,310	27	7,0		4,00	0,00	0,413	15
32				0,292	28			4,20	0,80	0,419	

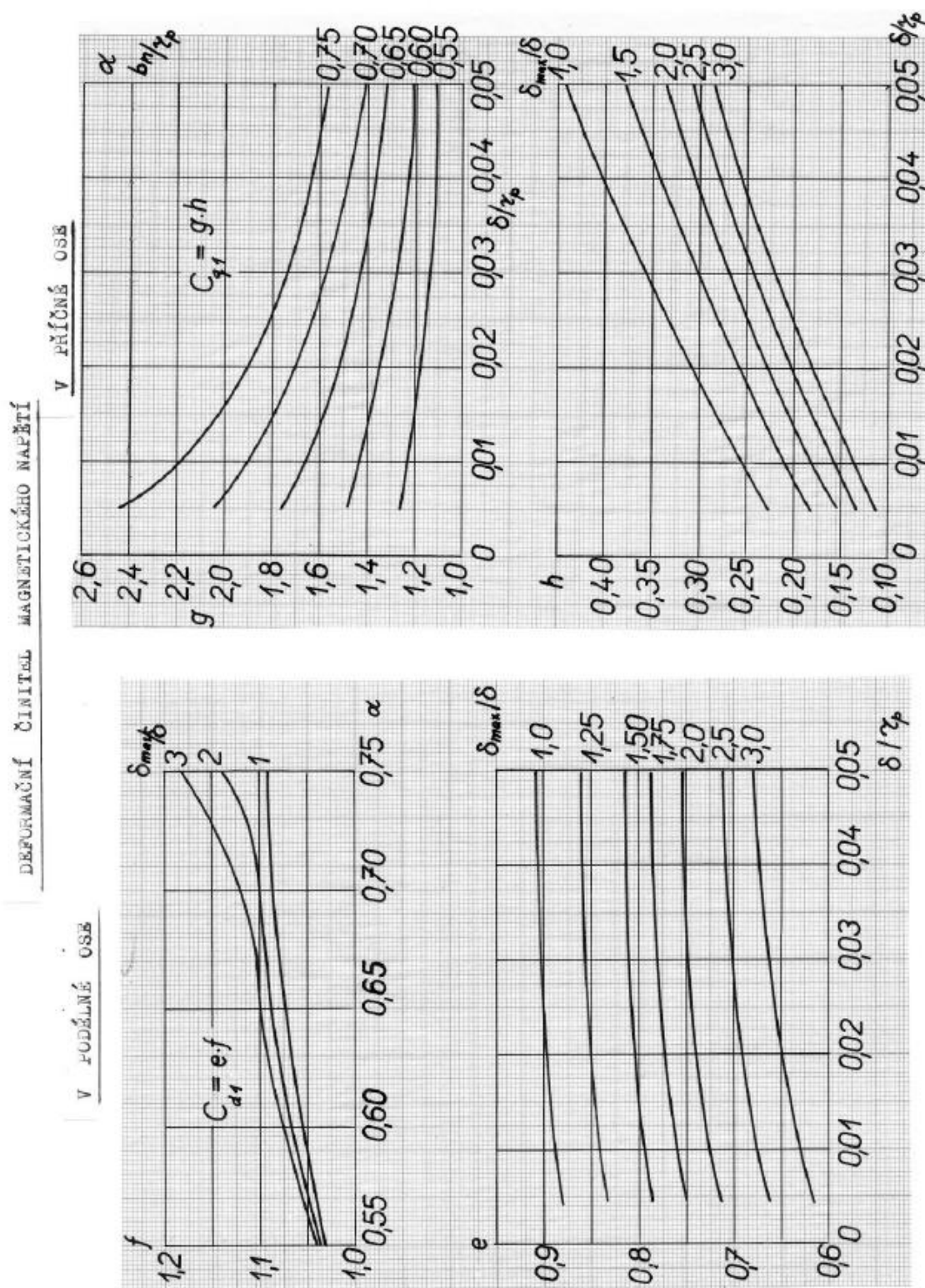
[2][3]

Příloha 5: Diagram činitele základní harmonické a činitele tvaru magnetického toku



[2][3]

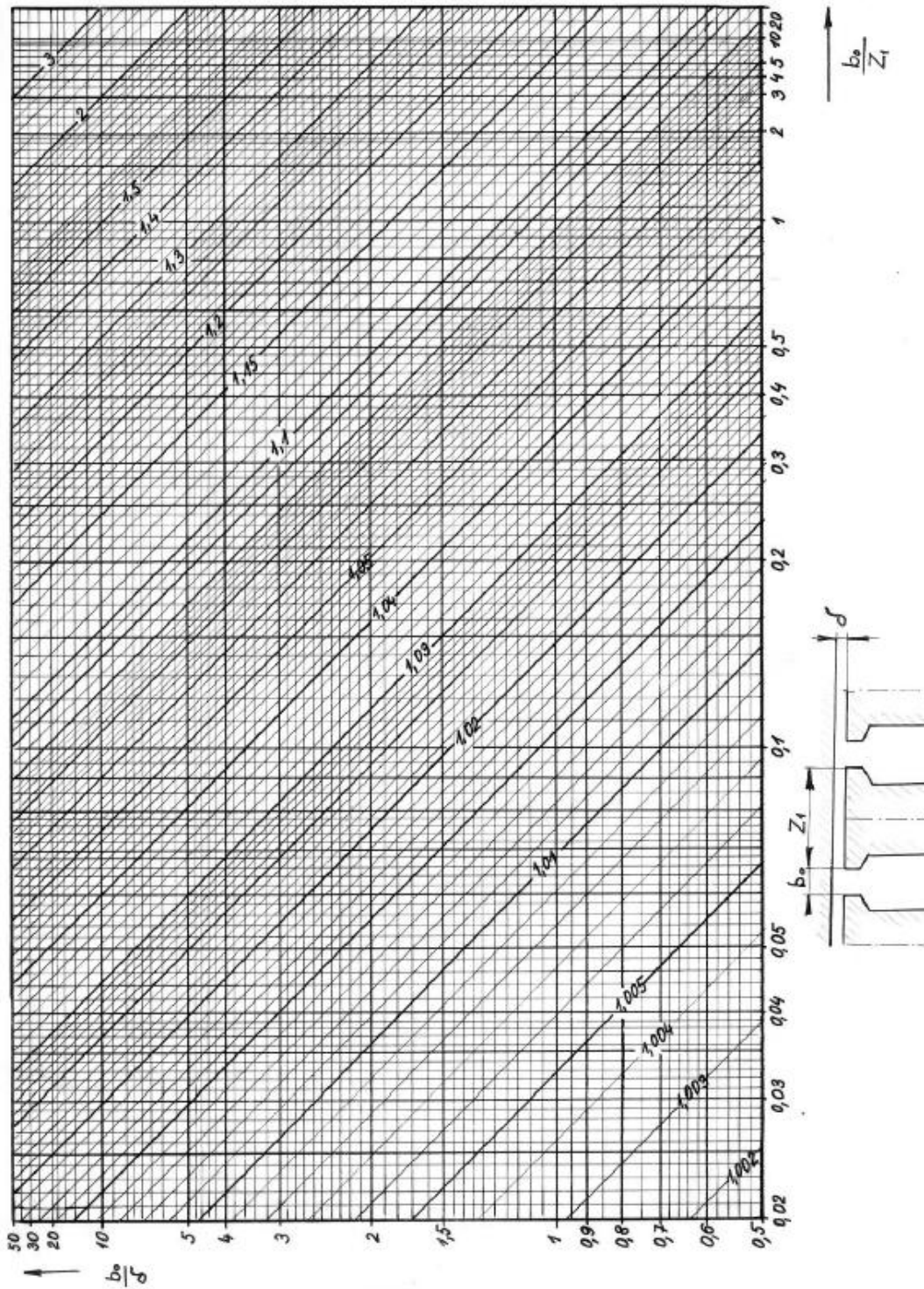
Příloha 6: Diagram deformačního činitele magnetického napětí



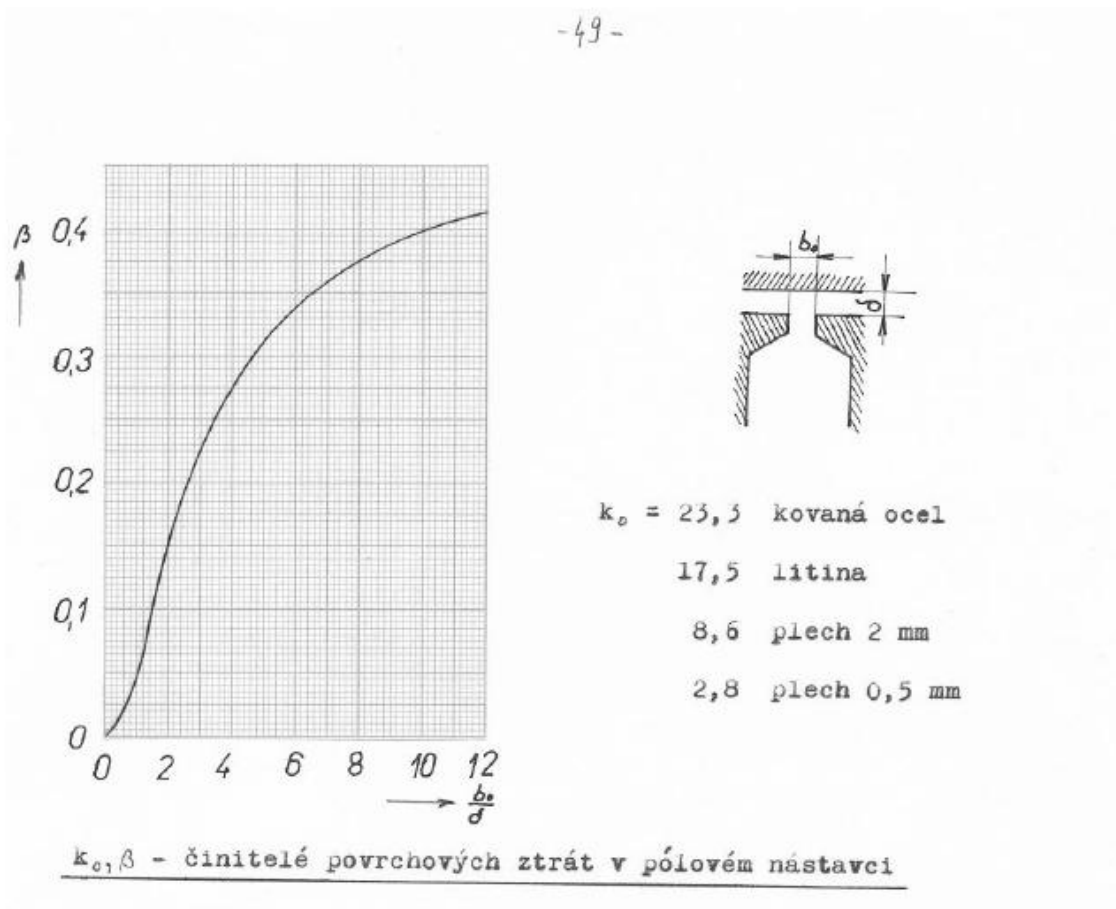
[2][3]

Příloha 7: Diagram Carterova činitele na drážkování

CARTERŮV ČINITEL NA DRÁŽKOVÁNÍ



[2][3]

Příloha 8: Diagram činitele povrchových ztrát v pólovém nastavci

Činitel mechanických ztrát :

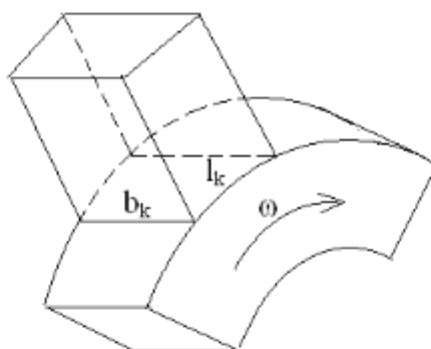
$A = 1,1 \div 1,5$	pomalub. alternátor
$0,8 \div 1,1$	rychlloběžné alt.
$0,8 \div 1$	turboalternátor

[2][3]

Příloha 9: Tabulka rozměrů kartáčů

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			



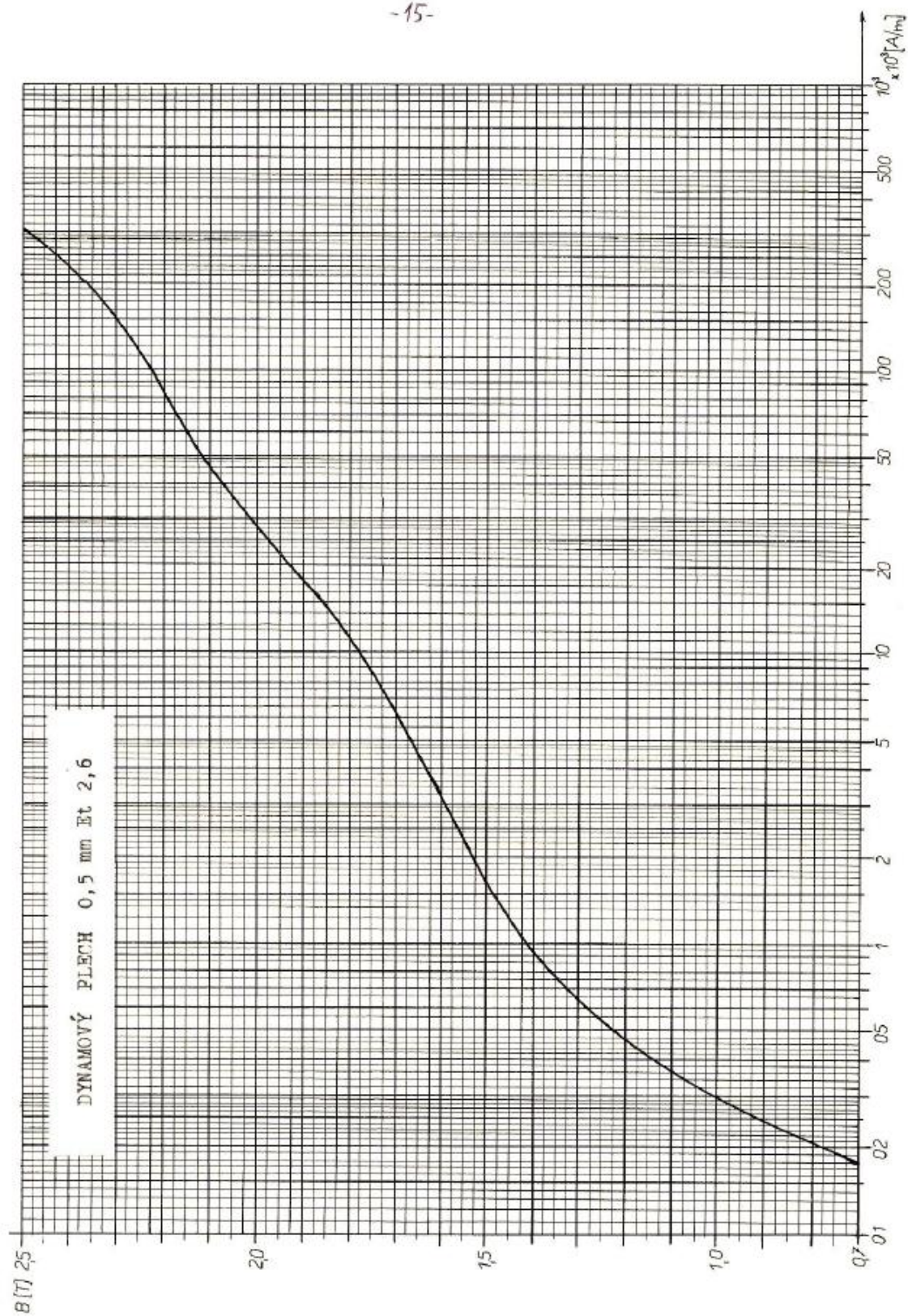
Kartáče pro kroužky – vlastnosti

Material	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

[2][3]

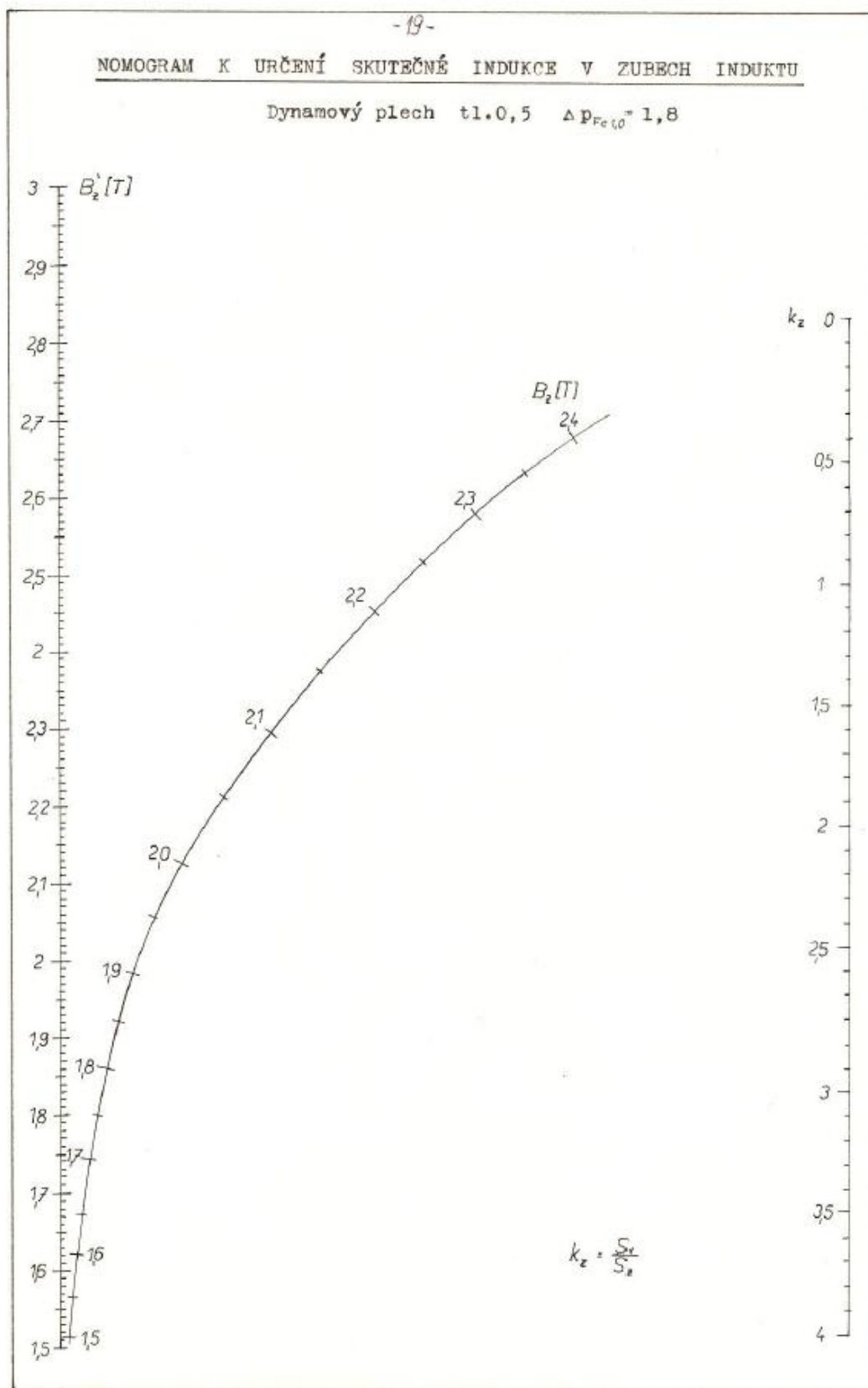
Příloha 10: Diagram dynamových plechů

-15-



[2][3]

Příloha 11: Nomogram k určení skutečné indukce v zubech induktu



[2][3]

Příloha 12: Tabulka rozměrů plochých měděných tyčí se zaoblenými hranami

Tabulka D 3.4. Rozměry a průřezy (mm²) měděných plochých tyčí se zaoblenými hranami podle ČSN 42 8625

Šířka (mm)	Tloušťka (mm)													
	5	5,5	6	6,5	7	8	9	10	11	12	14	16	18	20
7	33,76	37,26	40,32	43,82	47,32	61,80								
8	38,76	42,76	46,32	50,32	54,32	69,80	78,80	97,80						
9	43,76	48,26	52,32	56,82	61,32	77,80	87,80	107,80	118,80					
10	48,76	53,76	58,32	63,32	68,32	85,80	96,80	117,80	129,80	141,80				
11	53,76	59,26	64,32	69,82	75,32	93,80	105,80	127,80	140,80	153,80				
12	58,76	64,76	70,32	76,32	82,32	101,80	114,80	137,80	151,80	165,80	193,80			
13	63,76	70,26	76,32	82,82	89,32	109,80	123,80	147,80	162,80	177,80	207,80			
14	68,76	75,76	82,32	89,32	96,32	117,80	132,80	159,80	173,80	189,80	221,80	252,57		
15	73,76	81,26	88,32	95,82	103,32	125,80	141,80	177,80	195,80	213,80	249,80	284,57	320,57	
16	78,76	86,76	94,32	102,32	110,32	141,80	159,80	197,80	217,80	237,80	277,80	316,57	356,57	
18	88,76	97,76	106,32	115,32	124,32	157,80	177,80	217,80	239,80	261,80	305,80	348,57	392,57	
20	98,76	108,76	118,32	128,32	138,32	173,80	195,80	247,80	272,80	297,80	347,80	396,57	446,57	
22	108,76	119,76	130,32	141,32	152,32	197,80	222,80	277,80	305,80	333,80	389,80	444,57	500,57	
25	123,76	136,26	148,32	160,82	173,32	221,80	249,80	297,80	327,80	357,80	417,80	476,57	536,57	
28	138,76	152,76	166,32	180,32	194,32	237,80	267,80	297,80	327,80	357,80	417,80	476,57	536,57	
30	148,76	163,76	178,32	193,32	208,32	253,80	285,80	317,80	349,80	381,80	445,80	508,57	572,57	
32	158,76	174,76	190,32	206,32	222,32	277,80	312,80	347,80	382,80	417,80	487,80	556,57	626,57	
35	173,76	191,26	208,32	225,82	243,32	277,80	312,80	347,80	382,80	417,80	487,80	556,57	626,57	
40	198,76	218,76	238,32	258,32	278,32	317,80	357,80	397,80	437,80	477,80	557,80	636,57	716,57	796,57
45	223,76	246,26	268,32	290,82	313,32	357,80	402,80	447,80	492,80	537,80	627,80	716,57	806,57	896,57
50	248,76	273,76	298,32	323,32	348,32	397,80	447,80	497,80	547,80	597,80	697,80	796,57	896,57	996,57
55	273,76	301,26	328,32	355,82	383,32	437,80	492,80	547,80	602,80	657,80	767,80	876,57	986,57	1 096,57
60	298,76	328,76	358,32	388,32	418,32	477,80	537,80	597,80	657,80	717,80	837,80	956,57	1 076,57	1 196,57
65	323,76	356,26	388,32	420,82	453,32	517,80	582,80	647,80	712,80	777,80	907,80	1 036,57	1 166,57	1 296,57
70	348,76	383,76	418,32	453,32	488,32	557,80	627,80	697,80	767,80	837,80	977,80	1 116,57	1 256,57	1 396,57
75	378,76	411,26	448,32	483,82	523,32	597,80	672,80	747,80	822,80	897,80	1 047,80	1 196,57	1 346,57	1 496,57
80	398,76	438,76	478,32	518,32	558,32	637,80	717,80	797,80	877,80	957,80	1 117,80	1 276,57	1 436,57	1 596,57
90	448,76	493,76	538,32	583,32	628,32	717,80	807,80	897,80	987,80	1 077,80	1 257,80	1 436,57	1 616,57	1 796,57
100	498,76	548,76	598,32	648,32	698,32	797,80	897,80	997,80	1 097,80	1 197,80	1 397,80	1 596,57	1 796,57	1 996,57
120	598,76	658,76	718,32	778,32	838,32	957,80	1 077,80	1 197,80	1 317,80	1 437,80	1 677,80	1 966,57	2 256,57	2 546,57
150														

656

Příloha 13: Tingleyho schéma

	A A'								C' C								B B'							
p = 1	1 2	3 4	5 6	7 8	9 10	11 12	13 14	15 16	17 18	19 20	21 22	23 24	25 26	27 28										
p = 2		29 30	31 32	33 34	35 36	37 38	39 40	41 42	43 44	45 46	47 48	49 50	51 52	53 54										
p = 3	55 56	57 58	59 60	61 62	63 64	65 66	67 68	69 70	71 72	73 74	75 76	77 78	79 80	81 82										
p = 4		83 84	85 86	87 88	89 90	91 92	93 94	95 96	97 98	99 100	101 102	103 104	105 106	107 108										
p = 5	109 110	111 112	113 114	115 116	117 118	119 120	121 122	123 124	125 126	127 128	129 130	131 132	133 134	135 136										
p = 6		137 138	139 140	141 142	143 144	145 146	147 148	149 150	151 152	153 154	155 156	157 158	159 160	161 162										
p = 7	163 164	165 166	167 168	169 170	171 172	173 174	175 176	177 178	179 180	181 182	183 184	185 186	187 188	189 190										
p = 8		191 192	193 194	195 196	197 198	199 200	201 202	203 204	205 206	207 208	209 210	211 212	213 214	215 216										

Příloha 14: Tabulka závislosti ztrát a účinnosti na zatížení pro $\cos \varphi = 0$

cos $\varphi = 0$								
P [%]	I_1 [%]	I_1 [A]	F_b [A]	I_b [A]	P_{Cu1} [kW]	P_{Cub} [kW]	$P_{přid}$ [kW]	$\sum \Delta P$ [kW]
5	5	6,88	8965,035	50,63	0,07	3,076	0,38	35,40
10	10	13,75	9555,024	53,96	0,27	3,495	0,75	36,39
20	20	27,50	10745,31	60,69	1,08	4,420	1,50	38,88
30	30	41,25	11959,88	67,55	2,43	5,475	2,25	42,03
40	40	55,00	13213,84	74,63	4,32	6,683	3,00	45,88
50	50	68,75	14529,26	82,06	6,75	8,080	3,75	50,46
60	60	82,50	15915,72	89,89	9,72	9,696	4,50	55,79
65	65	89,38	16639,31	93,98	11,41	10,598	4,88	58,76
70	70	96,25	17378,36	98,15	13,23	11,560	5,25	61,92
75	75	103,13	18130,66	102,40	15,19	12,583	5,63	65,27
80	80	110,00	18892,9	106,70	17,28	13,663	6,00	68,82
85	85	116,88	19661,02	111,04	19,51	14,796	6,38	72,55
90	90	123,75	20430,99	115,39	21,87	15,978	6,75	76,47
95	95	130,63	21151,64	119,46	24,37	17,125	7,13	80,49
100	100	137,50	21969,45	124,08	27,00	18,475	7,50	84,85
110	110	151,25	23473,32	132,57	32,67	21,091	8,25	93,89
120	120	165,00	25074,71	141,62	38,88	24,066	9,00	103,82
130	130	178,75	27000,74	152,49	45,63	27,906	9,75	115,16

Příloha 15: Tabulka závislosti ztrát a účinnosti na zatížení pro $\cos \varphi = 1$

cos $\varphi = 1$											
P [%]	P [kW]	I_1 [%]	I_1 [A]	F_b [A]	I_b [A]	P_{Cu1} [kW]	P_{Cub} [kW]	$P_{Příd}$ [kW]	$\sum \Delta P$ [kW]	P_i [kW]	η [%]
5	125	5	6,88	8480,677	47,90	0,07	2,753	0,38	35,07	160,07	78,089
10	250	10	13,75	8586,676	48,50	0,27	2,822	0,75	35,72	285,72	87,498
20	500	20	27,50	8808,244	49,75	1,08	2,970	1,50	37,43	537,43	93,036
30	750	30	41,25	9053,368	51,13	2,43	3,137	2,25	39,69	789,69	94,973
40	1000	40	55,00	9338,977	52,74	4,32	3,338	3,00	42,54	1042,54	95,920
50	1250	50	68,75	9690,099	54,73	6,75	3,594	3,75	45,97	1295,97	96,453
60	1500	60	82,50	10142,07	57,28	9,72	3,937	4,50	50,03	1550,03	96,772
65	1625	65	89,38	10413,69	58,81	11,41	4,151	4,88	52,31	1677,31	96,881
70	1750	70	96,25	10717,34	60,53	13,23	4,397	5,25	54,75	1804,75	96,966
75	1875	75	103,13	11054,47	62,43	15,19	4,678	5,63	57,37	1932,37	97,031
80	2000	80	110,00	11424,73	64,52	17,28	4,996	6,00	60,15	2060,15	97,080
85	2125	85	116,88	11825,91	66,79	19,51	5,353	6,38	63,11	2188,11	97,116
90	2250	90	123,75	12253,59	69,21	21,87	5,747	6,75	66,24	2316,24	97,140
95	2375	95	130,63	13155,32	74,30	24,37	6,624	7,13	69,99	2444,99	97,137
100	2500	100	137,50	12700,04	71,73	27,00	6,174	7,50	72,55	2572,55	97,180
110	2750	110	151,25	14069,56	79,46	32,67	7,577	8,25	80,37	2830,37	97,160
120	3000	120	165,00	15033,49	84,91	38,88	8,651	9,00	88,41	3088,41	97,137
130	3250	130	178,75	16144,28	91,18	45,63	9,976	9,75	97,23	3347,23	97,095

Příloha 16: Tabulka závislosti ztrát a účinnosti na zatížení pro $\cos \varphi = 0,4$

cos $\varphi = 0,4$											
P [%]	P [kW]	I_1 [%]	I_1 [A]	F_b [A]	I_b [A]	P_{Cu1} [kW]	P_{Cub} [kW]	$P_{Přid}$ [kW]	$\sum \Delta P$ [kW]	P_i [kW]	η [%]
5	50	5	6,88	8960	50,60	0,07	3,07	0,38	35,39	85,39	58,559
10	100	10	13,75	9471	53,49	0,27	3,43	0,75	36,33	136,33	73,357
20	200	20	27,50	10577	59,74	1,08	4,28	1,50	38,74	238,74	83,779
30	300	30	41,25	11708	66,13	2,43	5,25	2,25	41,80	341,80	87,776
40	400	40	55,00	12877	72,73	4,32	6,35	3,00	45,54	445,54	89,785
50	500	50	68,75	14105	79,66	6,75	7,62	3,75	49,99	549,99	90,919
60	600	60	82,50	15412	87,05	9,72	9,09	4,50	55,19	655,19	91,586
65	650	65	89,38	16095	90,90	11,41	9,92	4,88	58,07	708,07	91,808
70	700	70	96,25	16794	94,85	13,23	10,80	5,25	61,15	761,15	91,976
75	750	75	103,13	17507	98,88	15,19	11,73	5,63	64,42	814,42	92,101
80	800	80	110,00	18230	102,96	17,28	12,72	6,00	67,88	867,88	92,190
85	850	85	116,88	18961	107,09	19,51	13,76	6,38	71,52	921,52	92,251
90	900	90	123,75	19694	111,23	21,87	14,85	6,75	75,34	975,34	92,288
95	950	95	130,63	20426	115,36	24,37	15,97	7,13	79,34	1029,34	92,305
100	1000	100	137,50	21160	119,51	27,00	17,14	7,50	83,51	1083,51	92,306
110	1100	110	151,25	22593	127,60	32,67	19,54	8,25	92,33	1192,33	92,271
120	1200	120	165,00	24102	136,12	38,88	22,24	9,00	101,99	1301,99	92,182
130	1300	130	178,75	25855	146,03	45,63	25,59	9,75	112,84	1412,84	92,030

Příloha 17: Tabulka závislosti ztrát a účinnosti na zatížení pro $\cos \varphi = 0,6$

cos $\varphi = 0,6$											
P [%]	P [kW]	I_1 [%]	I_1 [A]	F_b [A]	I_b [A]	P_{Cu1} [kW]	P_{Cub} [kW]	$P_{přid}$ [kW]	$\sum \Delta P$ [kW]	P_i [kW]	η [%]
5	75	5	6,88	8 875	50,12	0,07	3,01	0,38	35,33	110,33	67,975
10	150	10	13,75	9 374	52,94	0,27	3,36	0,75	36,26	186,26	80,532
20	300	20	27,50	10 381	58,63	1,08	4,12	1,50	38,58	338,58	88,605
30	450	30	41,25	11 407	64,42	2,43	4,98	2,25	41,54	491,54	91,549
40	600	40	55,00	12 462	70,38	4,32	5,94	3,00	45,14	645,14	93,003
50	750	50	68,75	13 560	76,58	6,75	7,04	3,75	49,42	799,42	93,819
60	900	60	82,50	14 724	83,16	9,72	8,30	4,50	54,40	954,40	94,301
65	975	65	89,38	15 313	86,48	11,41	8,98	4,88	57,13	1032,13	94,464
70	1050	70	96,25	15 931	89,98	13,23	9,71	5,25	60,07	1110,07	94,589
75	1125	75	103,13	16 564	93,55	15,19	10,50	5,63	63,19	1188,19	94,682
80	1200	80	110,00	17 198	97,13	17,28	11,32	6,00	66,48	1266,48	94,751
85	1275	85	116,88	17 853	100,83	19,51	12,20	6,38	69,96	1344,96	94,798
90	1350	90	123,75	18 515	104,57	21,87	13,12	6,75	73,62	1423,62	94,829
95	1425	95	130,63	19 178	108,31	24,37	14,08	7,13	77,45	1502,45	94,845
100	1500	100	137,50	19 840	112,05	27,00	15,07	7,50	81,44	1581,44	94,859
110	1650	110	151,25	21 239	119,95	32,67	17,27	8,25	90,06	1740,06	94,824
120	1800	120	165,00	22 712	128,27	38,88	19,74	9,00	99,50	1899,50	94,762
130	1950	130	178,75	24 368	137,63	45,63	22,73	9,75	109,98	2059,98	94,661

Příloha 18: Tabulka závislosti ztrát a účinnosti na zatížení pro $\cos \varphi = 0,9$

cos $\varphi = 0,9$											
P [%]	P [kW]	I_1 [%]	I_1 [A]	F_b [A]	I_b [A]	P_{Cu1} [kW]	P_{Cub} [kW]	$P_{přid}$ [kW]	$\sum \Delta P$ [kW]	P_i [kW]	η [%]
5	112,5	5	6,88	8 624	48,71	0,07	2,84	0,38	35,16	147,66	76,190
10	225	10	13,75	8 873	50,11	0,27	3,00	0,75	35,90	260,90	86,240
20	450	20	27,50	9 380	52,98	1,08	3,36	1,50	37,81	487,81	92,249
30	675	30	41,25	9 907	55,95	2,42	3,75	2,25	40,29	715,29	94,367
40	900	40	55,00	10 469	59,13	4,30	4,18	3,00	43,36	943,36	95,403
50	1125	50	68,75	11 087	62,62	6,72	4,69	3,75	47,04	1172,04	95,986
60	1350	60	82,50	11 781	66,54	9,68	5,30	4,50	51,35	1401,35	96,335
65	1462,5	65	89,38	12 147	68,60	11,36	5,63	4,88	53,74	1516,24	96,455
70	1575	70	96,25	12 561	70,94	13,18	6,02	5,25	56,33	1631,33	96,547
75	1687,5	75	103,13	12 980	73,31	15,13	6,43	5,63	59,06	1746,56	96,619
80	1800	80	110,00	13 417	75,78	17,21	6,87	6,00	61,96	1861,96	96,672
85	1912,5	85	116,88	13 868	78,32	19,43	7,34	6,38	65,02	1977,52	96,712
90	2025	90	123,75	14 330	80,93	21,78	7,84	6,75	68,25	2093,25	96,740
95	2137,5	95	130,63	14 797	83,57	24,27	8,36	7,13	71,63	2209,13	96,758
100	2250	100	137,50	15 265	86,21	26,89	8,89	7,50	75,16	2325,16	96,767
110	2475	110	151,25	16 198	91,48	32,54	10,01	8,25	82,68	2557,68	96,762
120	2700	120	165,00	17 180	97,03	38,72	11,26	9,00	90,86	2790,86	96,744
130	2925	130	178,75	18 312	103,42	45,45	12,80	9,75	99,87	3024,87	96,698

Příloha 19: Tabulka závislosti ztrát a účinnosti na zatížení s respektováním oteplení pro $\cos \varphi = 0$

cos $\varphi = 0$												
P [%]	I_1 [%]	I_1 [A]	F_b [A]	I_b [A]	P_{Cu1} [kW]	P_{Cub} [kW]	$P_{Přid}$ [kW]	$\sum \Delta P_T$ [kW]	R_S [Ω]	R_b [Ω]	$\Delta\theta_{SCu}$ [°C]	$\Delta\theta_{Cub}$ [°C]
5	5	6,88	8965,035	50,63	0,05	2,55	0,38	34,85	0,37	0,99	8,50	22,53
10	10	13,75	9555,024	53,96	0,21	2,92	0,75	35,76	0,37	1,00	9,00	24,79
20	20	27,50	10745,31	60,69	0,86	3,77	1,50	38,00	0,38	1,02	12,00	29,90
30	30	41,25	11959,88	67,55	1,96	4,77	2,25	40,85	0,38	1,04	16,00	35,70
40	40	55,00	13213,84	74,63	3,54	5,96	3,00	44,38	0,39	1,07	20,00	42,37
50	50	68,75	14529,26	82,06	5,66	7,41	3,75	48,69	0,40	1,10	26,00	50,00
60	60	82,50	15915,72	89,89	8,37	9,17	4,50	53,91	0,41	1,13	33,00	59,00
65	65	89,38	16639,31	93,98	9,97	10,19	4,88	56,91	0,42	1,15	37,00	63,98
70	70	96,25	17378,36	98,15	11,73	11,30	5,25	60,16	0,42	1,17	41,00	69,00
75	75	103,13	18130,66	102,40	13,71	12,54	5,63	63,75	0,43	1,20	46,00	74,87
80	80	110,00	18892,9	106,70	15,82	13,88	6,00	67,58	0,44	1,22	50,00	80,84
85	85	116,88	19661,02	111,04	18,18	15,32	6,38	71,75	0,44	1,24	55,00	87,00
90	90	123,75	20430,99	115,39	20,73	16,89	6,75	76,24	0,45	1,27	60,00	93,60
95	95	130,63	21151,64	119,46	23,56	18,44	7,13	81,01	0,46	1,29	66,00	99,91
100	100	137,50	21969,45	124,08	26,63	20,32	7,50	86,33	0,47	1,32	72,00	107,00
110	110	151,25	23473,32	132,57	33,48	24,20	8,25	97,81	0,49	1,38	84,00	121,80
120	120	165,00	25074,71	141,62	41,53	28,87	9,00	111,28	0,51	1,44	97,50	138,00
130	130	178,75	27000,74	152,49	50,91	35,39	9,75	127,93	0,53	1,52	112,30	159,34

Příloha 20: Tabulka závislosti ztrát a účinnosti na zatížení s respektováním oteplení pro $\cos \varphi = 1$

$\cos \varphi = 1$															
P [%]	P [kW]	I_1 [%]	I_1 [A]	F_b [A]	I_b [A]	P_{Cu1} [kW]	P_{Cub} [kW]	$P_{Příd}$ [kW]	$\sum \Delta P_T$ [kW]	P_i [kW]	η_T [%]	R_S [Ω]	R_b [Ω]	$\Delta \vartheta_{SCu}$ [°C]	$\Delta \vartheta_{Cub}$ [°C]
5	125	5	6,88	8480,677	47,90	0,05	2,26	0,38	34,57	159,57	78,336	0,37	0,99	8,40	20,70
10	250	10	13,75	8586,676	48,50	0,21	2,32	0,75	35,16	285,16	87,669	0,37	0,99	9,28	21,09
20	500	20	27,50	8808,244	49,75	0,86	2,45	1,50	36,69	536,69	93,164	0,38	0,99	11,74	21,90
30	750	30	41,25	9053,368	51,13	1,95	2,60	2,25	38,68	788,68	95,095	0,38	1,00	15,28	22,85
40	1000	40	55,00	9338,977	52,74	3,54	2,78	3,00	41,19	1041,19	96,044	0,39	1,00	19,70	23,96
50	1250	50	68,75	9690,099	54,73	5,65	3,01	3,75	44,29	1294,29	96,578	0,40	1,00	25,60	25,34
60	1500	60	82,50	10142,07	57,28	8,35	3,32	4,50	48,05	1548,05	96,896	0,41	1,01	32,40	27,28
65	1625	65	89,38	10413,69	58,81	9,94	3,52	4,88	50,21	1675,21	97,003	0,41	1,02	36,25	28,44
70	1750	70	96,25	10717,34	60,53	11,69	3,73	5,25	52,55	1802,55	97,085	0,42	1,02	40,00	29,00
75	1875	75	103,13	11054,47	62,43	13,66	4,00	5,63	55,17	1930,17	97,142	0,43	1,03	45,00	31,00
80	2000	80	110,00	11424,73	64,52	15,78	4,31	6,00	57,97	2057,97	97,183	0,43	1,03	49,30	33,00
85	2125	85	116,88	11825,91	66,79	18,13	4,65	6,38	61,03	2186,03	97,208	0,44	1,04	54,21	35,00
90	2250	90	123,75	12253,59	69,21	20,68	5,03	6,75	64,34	2314,34	97,220	0,45	1,05	59,36	37,23
95	2375	95	130,63	13155,32	74,30	23,47	5,90	7,13	68,38	2443,38	97,201	0,46	1,07	64,85	39,60
100	2500	100	137,50	12700,04	71,73	26,50	5,45	7,50	71,33	2571,33	97,226	0,47	1,06	70,46	42,00
110	2750	110	151,25	14069,56	79,46	33,35	6,87	8,25	80,35	2830,35	97,161	0,49	1,09	82,70	47,00
120	3000	120	165,00	15033,49	84,91	41,35	8,01	9,00	90,24	3090,24	97,080	0,51	1,11	96,00	53,00
130	3250	130	178,75	16144,28	91,18	50,58	9,50	9,75	101,70	3351,70	96,966	0,53	1,14	110,00	61,00

Příloha 21: Tabulka závislosti ztrát a účinnosti na zatížení s respektováním oteplení pro $\cos \varphi = 0,4$

cos $\varphi = 0,4$															
P [%]	P [kW]	I_1 [%]	I_1 [A]	F_b [A]	I_b [A]	P_{Cu1} [kW]	P_{Cub} [kW]	$P_{Přid}$ [kW]	$\sum \Delta P_T$ [kW]	P_i [kW]	η_T [%]	R_S [Ω]	R_b [Ω]	$\Delta\vartheta_{SCu}$ [°C]	$\Delta\vartheta_{Cub}$ [°C]
5	50	5	6,88	8960	50,60	0,05	2,54	0,38	34,85	84,85	58,931	0,37	0,99	8,50	22,00
10	100	10	13,75	9471	53,49	0,21	2,87	0,75	35,71	135,71	73,686	0,37	1,00	9,00	25,00
20	200	20	27,50	10577	59,74	0,86	3,64	1,50	37,88	237,88	84,077	0,38	1,02	14,00	29,00
30	300	30	41,25	11708	66,12	1,96	4,56	2,25	40,64	340,64	88,069	0,38	1,04	16,00	35,00
40	400	40	55,00	12877	72,73	3,54	5,63	3,00	44,05	444,05	90,080	0,39	1,07	20,00	41,00
50	500	50	68,75	14105	79,66	5,66	6,93	3,75	48,22	548,22	91,204	0,40	1,09	26,00	48,00
60	600	60	82,50	15412	87,04	8,37	8,51	4,50	53,26	653,26	91,848	0,41	1,12	33,00	56,00
65	650	65	89,38	16095	90,90	9,97	9,41	4,88	56,13	706,13	92,051	0,42	1,14	37,00	60,00
70	700	70	96,25	16794	94,85	11,73	10,42	5,25	59,27	759,27	92,193	0,42	1,16	41,00	65,00
75	750	75	103,13	17507	98,88	13,66	11,51	5,63	62,67	812,67	92,288	0,43	1,18	45,00	70,00
80	800	80	110,00	18230	102,96	15,82	12,72	6,00	66,42	866,42	92,334	0,44	1,20	50,00	76,00
85	850	85	116,88	18961	107,09	18,18	14,03	6,38	70,46	920,46	92,345	0,44	1,22	55,00	82,00
90	900	90	123,75	19694	111,23	20,73	15,37	6,75	74,73	974,73	92,333	0,45	1,24	60,00	87,00
95	950	95	130,63	20426	115,36	23,56	16,90	7,13	79,46	1029,46	92,281	0,46	1,27	66,00	94,00
100	1000	100	137,50	21160	119,51	26,54	18,46	7,50	84,39	1084,39	92,218	0,47	1,29	71,00	100,00
110	1100	110	151,25	22593	127,60	33,48	21,87	8,25	95,48	1195,48	92,013	0,49	1,34	84,00	113,00
120	1200	120	165,00	24102	136,12	41,47	25,96	9,00	108,31	1308,31	91,722	0,51	1,40	97,00	128,00
130	1300	130	178,75	25855	146,02	50,87	31,43	9,75	123,93	1423,93	91,296	0,53	1,47	112,00	147,00

Příloha 22: Tabulka závislosti ztrát a účinnosti na zatížení s respektováním oteplení pro $\cos \varphi = 0,6$

cos $\varphi = 0,6$															
P [%]	P [kW]	I_1 [%]	I_1 [A]	F_b [A]	I_b [A]	P_{Cu1} [kW]	P_{Cub} [kW]	$P_{Přid}$ [kW]	$\sum \Delta P_T$ [kW]	P_i [kW]	η_T [%]	R_S [Ω]	R_b [Ω]	$\Delta\vartheta_{SCu}$ [°C]	$\Delta\vartheta_{Cub}$ [°C]
5	75	5	6,88	8 875	50,12	0,05	2,49	0,38	34,80	109,80	68,308	0,37	0,99	8,00	22,00
10	150	10	13,75	9 374	52,94	0,21	2,80	0,75	35,64	185,64	80,801	0,37	1,00	9,00	24,00
20	300	20	27,50	10 381	58,63	0,86	3,49	1,50	37,72	337,72	88,830	0,38	1,01	12,00	28,00
30	450	30	41,25	11 407	64,42	1,96	4,29	2,25	40,38	490,38	91,766	0,38	1,03	15,50	33,00
40	600	40	55,00	12 462	70,38	3,54	5,22	3,00	43,64	643,64	93,220	0,39	1,05	20,00	38,00
50	750	50	68,75	13 560	76,58	5,66	6,32	3,75	47,60	797,60	94,032	0,40	1,08	26,00	44,00
60	900	60	82,50	14 724	83,16	8,37	7,63	4,50	52,38	952,38	94,500	0,41	1,10	33,00	51,00
65	975	65	89,38	15 313	86,48	10,01	8,37	4,88	55,13	1030,13	94,648	0,42	1,12	38,00	55,00
70	1050	70	96,25	15 931	89,98	11,73	9,19	5,25	58,04	1108,04	94,762	0,42	1,13	41,00	59,00
75	1125	75	103,13	16 564	93,55	13,66	10,06	5,63	61,23	1186,23	94,838	0,43	1,15	45,00	63,00
80	1200	80	110,00	17 198	97,13	15,82	11,03	6,00	64,73	1264,73	94,882	0,44	1,17	50,00	68,00
85	1275	85	116,88	17 853	100,83	18,18	12,08	6,38	68,51	1343,51	94,900	0,44	1,19	55,00	73,00
90	1350	90	123,75	18 515	104,57	20,73	13,21	6,75	72,56	1422,56	94,899	0,45	1,21	60,00	78,00
95	1425	95	130,63	19 178	108,31	23,56	14,40	7,13	76,97	1501,97	94,876	0,46	1,23	66,00	83,00
100	1500	100	137,50	19 840	112,05	26,54	15,70	7,50	81,62	1581,62	94,839	0,47	1,25	71,00	89,00
110	1650	110	151,25	21 239	119,95	33,48	18,66	8,25	92,27	1742,27	94,704	0,49	1,30	84,00	101,00
120	1800	120	165,00	22 712	128,27	41,47	22,16	9,00	104,51	1904,51	94,512	0,51	1,35	97,00	114,00
130	1950	130	178,75	24 368	137,63	50,72	26,75	9,75	119,10	2069,10	94,244	0,53	1,41	111,00	131,00

Příloha 23: Tabulka závislosti ztrát a účinnosti na zatížení s respektováním teplení pro $\cos \varphi = 0,9$

cos $\varphi = 0,9$															
P [%]	P [kW]	I_1 [%]	I_1 [A]	F_b [A]	I_b [A]	P_{Cu1} [kW]	P_{Cub} [kW]	$P_{Přid}$ [kW]	$\sum \Delta P_T$ [kW]	P_i [kW]	η_T [%]	R_S [Ω]	R_b [Ω]	$\Delta\vartheta_{SCu}$ [°C]	$\Delta\vartheta_{Cub}$ [°C]
5	112,5	5	6,88	8 624	48,71	0,05	2,34	0,38	34,65	147,15	76,453	0,37	0,99	8,00	21,00
10	225	10	13,75	8 873	50,11	0,21	2,49	0,75	35,33	260,33	86,429	0,37	0,99	9,00	22,00
20	450	20	27,50	9 380	52,98	0,86	2,81	1,50	37,04	487,04	92,394	0,38	1,00	13,00	24,00
30	675	30	41,25	9 907	55,95	1,95	3,15	2,25	39,23	714,23	94,507	0,38	1,01	15,00	26,00
40	900	40	55,00	10 469	59,13	3,54	3,56	3,00	41,98	941,98	95,544	0,39	1,02	20,00	29,00
50	1125	50	68,75	11 087	62,62	5,66	4,04	3,75	45,33	1170,33	96,127	0,40	1,03	26,00	32,00
60	1350	60	82,50	11 781	66,54	8,37	4,61	4,50	49,36	1399,36	96,473	0,41	1,04	33,00	35,00
65	1462,5	65	89,38	12 147	68,60	9,93	4,94	4,88	51,63	1514,13	96,590	0,41	1,05	36,00	37,00
70	1575	70	96,25	12 561	70,94	11,73	5,32	5,25	54,18	1629,18	96,674	0,42	1,06	41,00	39,00
75	1687,5	75	103,13	12 980	73,31	13,66	5,72	5,63	56,89	1744,39	96,739	0,43	1,07	45,00	41,00
80	1800	80	110,00	13 417	75,78	15,82	6,18	6,00	59,88	1859,88	96,780	0,44	1,08	50,00	44,00
85	1912,5	85	116,88	13 868	78,32	18,11	6,65	6,38	63,02	1975,52	96,810	0,44	1,08	54,00	46,00
90	2025	90	123,75	14 330	80,93	20,73	7,18	6,75	66,53	2091,53	96,819	0,45	1,10	60,00	49,00
95	2137,5	95	130,63	14 797	83,57	23,49	7,74	7,13	70,22	2207,72	96,815	0,46	1,11	65,00	52,00
100	2250	100	137,50	15 265	86,21	26,54	8,32	7,50	74,24	2324,24	96,806	0,47	1,12	71,00	55,00
110	2475	110	151,25	16 198	91,48	33,38	9,56	8,25	83,07	2558,07	96,753	0,49	1,14	83,00	61,00
120	2700	120	165,00	17 180	97,03	41,35	11,01	9,00	93,23	2793,23	96,662	0,51	1,17	96,00	68,00
130	2925	130	178,75	18 312	103,42	50,72	12,84	9,75	105,19	3030,19	96,529	0,53	1,20	111,00	76,00

