

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Návrh stejnosměrného stroje s derivačním
buzením**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Karel HOUŠKA**
Osobní číslo: **E11N0068P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Průmyslová elektronika a elektromechanika**
Název tématu: **Návrh stejnosměrného stroje s derivačním buzením**
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Proveďte elektromagnetický návrh stejnosměrného motoru s kompenzačním vinutím těchto parametrů: $P = 600 \text{ kW}$, $U = 400 \text{ V}$, $n = 1800 \text{ ot./min.}$, derivační buzení, provedení IP22.
2. Metodou náhradních tepelných obvodů proveďte výpočet oteplení induktu.
3. Nakreslete schématicky příčný a podélný řez strojem.

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

1. L. Cigánek: Stavba elektrických strojů
2. Kopylov, I. P.: Stavba elektrických strojů

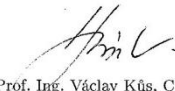
Vedoucí diplomové práce: Doc. Ing. Josef Červený, CSc.
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání diplomové práce: 15. října 2012
Termín odevzdání diplomové práce: 9. května 2013


Doc. Ing. Jiri Hammerbauer, Ph.D.

děkan

L.S.


Prof. Ing. Václav Kús, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

Anotace

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na návrh stejnosměrného motoru s paralelním buzením. V této práci je obsažen elektromagnetický výpočet všech částí stejnosměrného motoru dle zadaných parametrů, stanovení ztrát a účinnosti. Dále práce obsahuje tepelný výpočet indultu stroje pomocí metody náhradních obvodů. Nakonec je proveden schématický náčrt navrženého stroje v podélném a příčném řezu.

Klíčová slova

stejnosměrný stroj, elektromagnetický návrh, derivační buzení, budící vinutí, kompenzační vinutí, pomocné póly, komutátor, výpočet oteplení induktu, metoda náhradních tepelných obvodů

Abstract

Design of DC machine with shunt excitation

The present work is aimed to electromagnetic design of DC machine with shunt excitation. In this work is included electromagnetic design of all part of DC motor according to set parameters, determination of losses and efficiency of the motor. In addition work includes heat calculation with using the method of alternative thermal circuit. Finally, it is performed a diagram designed machinery in transection and cross-section.

Key words

DC motor, electromagnetic design, shunt excitation, excitation winding, compensating winding, auxiliary poles, commutator, warming calculation of inductive, method of alternative thermal circuit

Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 30.4.2013

Bc. Karel Houška

Poděkování

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

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	9
1 ELEKTROMAGNETICKÝ NÁVRH.....	10
1.1 ZADANÉ PARAMETRY STROJE.....	10
1.2 VOLBA HLAVNÍCH ROZMĚRŮ STROJE	10
1.3 VOLBA VINUTÍ KOTVY.....	11
1.4 VÝPOČET GEOMETRIE ZUBŮ A DRÁŽEK	13
1.5 VÝPOČET VINUTÍ KOTVY	19
1.5.1 Výpočet kroků vinutí	19
1.5.2 Určení fázorové hvězdice a napětového polygonu.....	20
1.5.3 Výpočet čel vinutí.....	20
1.5.4 Odpor vinutí a vliv skinefektu	23
1.6 NÁVRH MAGNETICKÉHO OBVODU	24
1.6.1 Určení velikosti vzduchové mezery a magnetického toku.....	24
1.6.2 Dimenzování magnetického obvodu.....	24
1.6.3 Charakteristika naprázdno	27
1.7 VÝPOČET BUDÍČÍHO VINUTÍ	28
1.8 ORIENTAČNÍ VÝPOČET OTEPLENÍ BUDÍČÍ CÍVKY	30
1.9 KOMUTÁTOR A KARTÁČE	31
1.10 KOMPENZAČNÍ VINUTÍ	32
1.11 VÝPOČET KOMUTACE.....	37
1.12 VÝPOČET VINUTÍ POMOCNÝCH PÓLŮ.....	40
1.13 ZTRÁTY A ÚČINNOST.....	42
2 VÝPOČET OTEPLENÍ INDULTU S RADIÁLNÍMI KANÁLY	45
2.1 URČENÍ ROZMĚRŮ ÚSEKU.....	45
2.2 VÝPOČET TEPELNÝCH ODPORŮ	46
2.3 URČENÍ OKOLNÍCH TEPLŮ VYMEZENÉHO ÚSEKU	49
2.4 SESTAVENÍ A ŘEŠENÍ NÁHRADNÍHO TEPELNÉHO OBVODU OBLASTI	51
3 ZÁVĚR:	53
4 POUŽITÁ LITERATURA.....	55
5 PŘÍLOHY.....	56

Úvod

Předkládaná práce se zabývá návrhem stejnosměrného motoru s paralelním budícím vinutím. Předností stejnosměrného motoru s paralelním buzením je možnost samostatné regulace proudu statoru a především také tzv. tvrdá otáčková charakteristika, což znamená, že otáčky motoru jsou jen málo závislé na jeho zátěži. Proto se tento stroj využívá hlavně tam, kde je vyžadován častý rozběh, neměnné otáčky motoru bez ohledu na jeho zatížení a přesné ovládání rychlosti a točivého momentu (např. automobilový průmysl, důlní zařízení, dopravní pásy, jeřáby, obráběcí stroje atd.). Práce je rozdělena do 2 hlavních částí. V první části práce se nachází kompletní elektromagnetický návrh stejnosměrného motoru dle zadaných parametrů. Elektromagnetický návrh je rozdělen do jednotlivých podkapitol, podle hlavních částí navrhovaného stroje, chronologicky řazených dle postupu návrhu od volby hlavních rozměrů stroje až po stanovení jeho ztrát a účinnosti. Ve druhé části je proveden tepelný výpočet induktu stroje pomocí metody náhradních tepelných obvodů. Tepelný výpočet slouží k ověření, zda navržená izolace stroje vyhovuje tepelným poměrům uvnitř stroje. Výpočet začíná vymezením úseku rotoru, ve kterém se oteplení počítá, dále pak pokračuje určením parametrů náhradního schématu, jeho následným sestavením a řešením. Práce dále obsahuje schématický náčrt příčného a podélného řezu navrženého stroje, které jsou umístěny v příloze této práce.

1 Elektromagnetický návrh

1.1 Zadané parametry stroje

Činný výkon

$$P = 600 \text{ kW}$$

Jmenovité síťové napětí

$$U = 400 \text{ V}$$

Jmenovité otáčky

$$n = 1800 \text{ ot/min}$$

Stroj má derivační buzení a stroj je zadán v provedení IP22.

1.2 Volba hlavních rozměrů stroje

Předběžná hodnota účinnosti

$$\eta = 92 \% \quad \text{-určeno podle [1] obr. 8.6., str. 452}$$

Předběžná hodnota jmenovitého proudu motoru

$$I_N = \frac{P \cdot 10^3}{\eta \cdot U} = \frac{600\,000}{0,92 \cdot 400} = 1\,630 \text{ A} \quad (1.1)$$

Proud v paralelním budícím vinutí

$$I_{pb} = k_b \cdot I_N = 0,01 \cdot 1630 = 16 \text{ A} \quad (1.2)$$

-konstanta k_b určena podle [1] tab. 8.10. - str.453

Proud kotvy

$$I = (1 - k_B) \cdot I_N = (1 - 0,01) \cdot 1630 = 1\,614 \text{ A} \quad (1.3)$$

Vnitřní výkon

$$P_i = P \cdot \frac{1+\eta}{2\cdot\eta} = 600 \cdot \frac{1+0,92}{2\cdot0,92} = 626,1 \text{ kW} \quad (1.4)$$

Průměr kotvy

$D_1 = 0,65 \text{ m}$ - zvoleno podle [2] obr. 765, str. 591

Indukce ve vzduchové mezeře

$B_\delta = 0,86 \text{ T}$ - zvoleno podle [1] obr. 8.9., str. 454

Činitel pólového krytí

$\alpha_\delta = 0,7$ - zvoleno podle [1] obr. 8.7., str. 453

Lineární proudová hustota

$A = 38\,000 \text{ A}$ - zvoleno podle [1] obr. 8.8., str. 453

Ideální délka kotvy k jejímu průměru

$$l_i = \frac{6,1 \cdot P_1 \cdot 10^3}{\alpha_\delta \cdot A \cdot B_\delta \cdot D_1 \cdot n} = \frac{6,1 \cdot 626,1 \cdot 10^3}{0,7 \cdot 38\,000 \cdot 0,86 \cdot 0,65^2 \cdot 1800} = 0,22 \text{ m} \quad (1.5)$$

Poměr délky kotvy k jejímu průměru

$$\lambda = \frac{l_i}{D_1} = \frac{0,22}{0,65} = 0,3385 \quad (1.6)$$

Počet pólů

$2p = 6$ - zvoleno podle [1] obr. 8.10., str. 455

Pólová rozteč

$$t_p = \frac{\pi \cdot D_1}{2p} = \frac{\pi \cdot 0,65}{6} = 0,34 \text{ m} \quad (1.7)$$

[1],[2]

1.3 Volba vinutí kotvy

Počet paralelních větví

$a = 3$ - zvoleno $a = p \rightarrow$ paralelní vinutí

Proud v jedné paralelní větvi

$$I_a = \frac{I}{2a} = \frac{1614}{6} = 269 \text{ A} \quad (1.8)$$

Předběžný počet efektivních vodičů v kotvě

$$V = \frac{\pi \cdot D_1 \cdot A \cdot 2a}{l} = \frac{\pi \cdot 0,65 \cdot 38\,000 \cdot 6}{1614} = 288,47 \rightarrow 288 \quad (1.9)$$

Počet drážek

$$Q = 75 \quad - \text{ zvoleno podle [2], str. 592}$$

Počet efektivních vodičů v drážce

$$V_d = \frac{V}{Q} = \frac{288}{75} = 3,84 \rightarrow 4 \quad (1.10)$$

Skutečný počet efektivních vodičů v kotvě

$$V = V_d \cdot Q = 4 \cdot 75 = 300 \quad (1.11)$$

Počet cívkových stran v drážce

$$u = 2$$

Volíme otevřenou drážku typu N

Počet lamel komutátoru

$$K = Q \cdot u = 75 \cdot 2 = 150 \quad (1.12)$$

Mezilamelové napětí

$$U_{lav} = \frac{2p \cdot U}{K} = \frac{6 \cdot 400}{150} = 16 \text{ V} \quad (1.13)$$

-pro stroj s kompenzačním vinutím musí být menší než 20 V

Počet závitů v kotvě

$$N = \frac{V}{2} = \frac{300}{2} = 150 \quad (1.14)$$

Upřesněná lineární hustota proudu

$$A = \frac{V \cdot I_a}{\pi \cdot D_1} = \frac{300 \cdot 269}{\pi \cdot 0,65} = 39\,519 \text{ A} \quad (1.15)$$

Korigovaná délka kotvy

$$l_i = 0,22 \cdot \frac{39\,519}{38\,000} = 0,23 \text{ m} \quad (1.16)$$

-rotorový svazek rozdělíme na 5 svazků po 46mm a 4 kanály po 10mm

Počet ventilačních kanálů

$$n_K = 4$$

Šířka ventilačního kanálu

$$b_K = 0,01 \text{ m}$$

Šířka svazku

$$s_p = 0,046 \text{ m}$$

Celková délka rotorového svazku

$$l = l_i + n_K \cdot b_K = 0,23 + 4 \cdot 0,01 = 0,27 \text{ m} \quad (1.17)$$

Vnější průměr komutátoru pro otevřené drážky kotvy typu N

$$D_K = 0,65 \cdot D_1 = 0,75 \cdot 0,65 = 0,488 \text{ m} \quad (1.18)$$

-zvoleno podle [1] vztahu 8.8. str.456

Obvodová rychlost komutátoru

$$v_K = \frac{\pi \cdot D_K \cdot n}{60} = \frac{\pi \cdot 0,488 \cdot 1800}{60} = 46 \text{ m/s} \quad (1.19)$$

Lamelová rozteč

$$t_1 = \frac{\pi \cdot D_K}{K} = \frac{\pi \cdot 0,423}{150} = 10,22 \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad (1.20)$$

[1],[2],[3]

1.4 Výpočet geometrie zubů a drážek

Předběžná hodnota hloubky drážky

$$h_d = 38 \text{ mm}$$

- zvoleno podle [2] obr. 765, str. 591

Orientační průměr kotvy uprostřed drážky

$$D_2 = D_1 - h_d = 0,65 - 0,038 = 0,612 \text{ m} \quad (1.21)$$

Orientační průměr kotvy na dně drážky

$$D_3 = D_1 - 2 \cdot h_d = 0,65 - 2 \cdot 0,038 = 0,574 \text{ m} \quad (1.22)$$

Rozteč drážek ve vzduchové mezeře

$$t_{d1} = \frac{\pi \cdot D_1}{Q} = \frac{\pi \cdot 650}{75} = 27,23 \text{ mm} \quad (1.23)$$

Orientační rozteč drážek uprostřed drážky

$$t_{d2} = \frac{\pi \cdot D_2}{Q} = \frac{\pi \cdot 612}{75} = 25,64 \text{ mm} \quad (1.24)$$

Orientační rozteč drážek na dně drážky

$$t_{d3} = \frac{\pi \cdot D_3}{Q} = \frac{\pi \cdot 574}{75} = 24 \text{ mm} \quad (1.25)$$

Činitel plnění železa

$$k_{FE} = 0,93 \quad - \text{ zvoleno podle [1] tab. 2.1., str. 45}$$

Frekvence proudu rotoru

$$f = \frac{p \cdot n}{60} = \frac{3 \cdot 1800}{60} = 90 \text{ Hz} \quad (1.26)$$

Magnetická indukce v nejmenším průřezu zubu kotvy při otevřené drážce typu N

$$B_{z3} = 2,1 \text{ T} \quad - \text{ zvoleno podle [1] tab. 2.1., str. 45}$$

Předběžná šířka zubu v nejmenším průřezu

$$z_3 = \frac{B_\delta \cdot t_{d3}}{B_{z3} \cdot k_{FE}} = \frac{0,86 \cdot 24}{2,1 \cdot 0,93} = 10,57 \text{ mm} \quad (1.27)$$

Šířka drážky

$$b_d = t_{d3} - z_3 = 24 - 10,57 = 13,43 \quad (1.28)$$

Podle [1]. tab. D4.1a. str. 657 zvolena šířka drážky $b_d = 13 \text{ mm}$

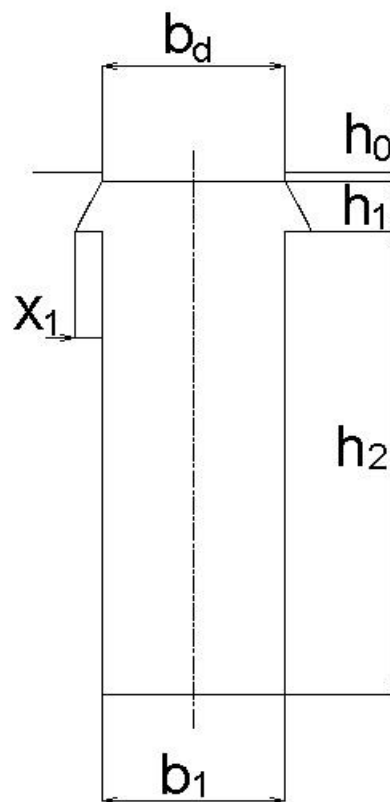
Další rozměry drážky

Podle [1] Tab. D4.1a., str. 657 zjištěno:

$$h_0 = 0,7 \text{ mm}$$

$$h_1 = 3,8 \text{ mm}$$

$$x_1 = 2 \text{ mm}$$



Obrázek 1.1 – Drážka vinutí kotvy

Proudová hustota ve vodiči

$$\sigma_v = 5 \text{ A/mm}^2$$

- hodnota zvolena

Orientační průřez vodiče

$$S_{cu1} = \frac{I_a}{\sigma_v} = \frac{269}{5} = 53,8 \text{ mm}^2 \quad (1.29)$$

Izolace drážky na šířku

- Podle [1]. Tab. 3.16., str. 122

Číslo izolace	Materiál	Tloušťka izolace [mm]	Počet otáček	Celkem na obou stranách [mm]
1	Izolační fólie	0,15	4,5	1,35
3	Skelná lakovaná tkanina	0,15	1	0,3
5	Sklotextit	0,5	1	1
Celkem($i_{z\zeta}$)				2,65
vůle				0,35
Celková izolace drážky na šířku ($i_{zd\zeta c}$)				3

Tabulka 1.1 – Izolace drážky rotoru na šířku – viz. [1] tab. 3.16., str. 122

Izolace vodiče $i_{zv} = 0,4 \text{ mm}$

- zvolena podle [1] tab. D 3.3., str. 655

Šířka vodiče

$$b_v = b_d - i_{zd\zeta c} = 13 - 3 = 10 \text{ mm} \quad (1.30)$$

Volíme rozdělení na 2 paralelní vodiče $\rightarrow j = 2$

Jelikož by se 2 paralelní vodiče o šířce 5 mm při započtení izolace vodiče nevešly do drážky, byla zvolena šířka vodiče 4,5 mm

Výška vodiče

$$h_v' = \frac{S_{cu1}}{b_v} = \frac{53,8}{4,5} = 11,995 \rightarrow 12 \text{ mm} \quad (1.31)$$

Jelikož by použití vodiče o výšce 12 mm byly přídavné ztráty vodiče vlivem skinefektu příliš velké, je nutné vodič na výšku rozdělit. Aby byly přídavné ztráty co nejmenší, bylo zvoleno rozdělení na 4 samostatné vodiče $\rightarrow i = 4$.

Skutečná výška vodiče jednoho vodiče

$$h_v = \frac{h_v'}{i} = \frac{12}{4} = 3 \text{ mm} \quad (1.32)$$

Z tabulky z přílohy č. 1 zvolen vodič 4,5 x 3 mm s izolací pak 4,9 x 3,4 mm

Skutečný průřez vodiče

$$S_1 = 12,9 \text{ mm}^2 \quad - \text{ odečteno z tabulky v příloze č. 1}$$

Skutečný průřez vodiče jedné paralelní větve

$$S_{cu1} = S_1 \cdot i = 12,9 \cdot 4 = 51,6 \text{ mm}^2 \quad (1.33)$$

Izolace drážky na výšku

- Podle [1] tab. 3.16., str. 122

Číslo izolace	Materiál	Tloušťka izolace [mm]	Počet otáček	Kolikrát se izolace vyskytuje	Celkem [mm]
1	Izolační fólie	0,15	4,5	4	2,7
3	Skelná lakovaná tkanina	0,5	1	4	0,6
4	Sklotextit	0,5	1	1	0,5
5	Sklotextit	0,5	1	2	1
6	Sklotextit	0,5	1	1	0,5
9	Sklotextit	1	1	1	1
Celkem (i_{zv})					6,3
Vůle					1,5
Celková izolace drážky na výšku (i_{zdhc})					7,8

Tabulka 1.2 – Izolace drážky rotoru na výšku – viz. [1] tab. 3.16., str. 122

Výška drážky h_2

$$h_2 = j \cdot i \cdot (h_v + iz_v) + iz_{dhc} = 2 \cdot 4 \cdot (3 + 0,4) + 7,8 = 35 \text{ mm} \quad (1.34)$$

Celková výška drážky

$$h_d = h_2 + h_1 + h_0 = 35 + 3,8 + 0,7 = 39,5 \text{ mm} \quad (1.35)$$

Skutečný průměr kotvy uprostřed drážky

$$D_2 = D_1 - h = 0,65 - 0,0395 = 0,6105 \text{ m} \quad (1.36)$$

Skutečný průměr kotvy na dně drážky

$$D_3 = D_1 - 2 \cdot h = 0,65 - 2 \cdot 0,0395 = 0,571 \text{ m} \quad (1.37)$$

Skutečná rozteč drážek kotvy uprostřed drážky

$$t_{d2} = \frac{\pi \cdot D_2}{Q} = \frac{\pi \cdot 0,6105}{75} = 25,57 \text{ mm} \quad (1.38)$$

Skutečná rozteč drážek kotvy na dně drážky

$$t_{d3} = \frac{\pi \cdot D_3}{Q} = \frac{\pi \cdot 0,571}{75} = 24 \text{ mm} \quad (1.39)$$

Skutečná šířka zubu v nejmenším průřezu

$$z_3 = t_{d3} - b_d = 23,92 - 13 = 10,92 \text{ mm} \quad (1.40)$$

Šířka zubu ve vzduchové mezeře

$$z_1 = t_{d1} - b_d = 27,23 - 13 = 14,23 \text{ mm} \quad (1.41)$$

Konstanta motoru

$$k_M = 0,95 \quad \text{-zvoleno podle [1] tab. 8.10., str. 453}$$

Indukované napětí

$$U_i = U \cdot k_M = 400 \cdot 0,95 = 380 \text{ V} \quad (1.42)$$

Minimální průřez zubů kotvy

$$S_z = \frac{Q \cdot \alpha_\delta \cdot z_1 \cdot l \cdot k_{Fe}}{2p} = \frac{75 \cdot 0,7 \cdot 14,23 \cdot 10^{-3} \cdot 0,27 \cdot 0,93}{6} = 0,0313 \text{ m}^2 \quad (1.43)$$

Krok spojkový

$$y_2 = y - y_1 = 98 - 49 = 49 \quad (1.51)$$

[1]

1.5.2 Určení fázorové hvězdice a napět'ového polygonu

Elektrický úhel drážek

$$\alpha = \left(\frac{360}{Q}\right) \cdot p = \left(\frac{360}{75}\right) \cdot 3 = 14,4^\circ \quad (1.52)$$

Počet ztotožnění fázorů drážkových napětí v jednom směru

$$\chi_1 = D^1(Q, p) = D(75, 3) = 3 \quad (1.53)$$

Počet paprsků fázorové hvězdice

$$P = \frac{Q}{\chi_1} = \frac{75}{3} = 25 \quad (1.54)$$

Úhel mezi sousedními fázory

$$\alpha' = \frac{360}{P} = \frac{360}{25} = 14,4^\circ \quad (1.55)$$

Počet galvanických celků na které se vinutí rozdělí

$$\chi_2 = D(K, y_K) = D(150, 49) = 1 \quad (1.56)$$

[3]

1.5.3 Výpočet čel vinutí

Poloměr ohybu na vnitřním kraji čel

$$r = 5 \text{ mm}$$

Vzdálenost mezi čely dvou sousedních cívek

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

¹ D – největší společný dělitel čísel

Šířka čela

$$b_{\zeta} = 13 \text{ mm}$$

-volí se stejná, jako je šířka drážky

Úhel sklonu čel

$$\sin \alpha_{\zeta} = \frac{b_{\zeta} + m}{t_{d3}} \Rightarrow \alpha_{\zeta} = \arcsin \left(\frac{b_{\zeta} + m}{t_{d3}} \right) = \arcsin \left(\frac{13 + 3}{23,92} \right) = 42^{\circ} \quad (1.57)$$

Délka čela

$$x = \frac{\beta \cdot t_p}{2 \cdot \cos \alpha_{\zeta}} = \frac{0,96 \cdot 0,34 \cdot 10^3}{2 \cdot \cos(42)} = 220 \text{ mm} \quad (1.58)$$

Poloměr vnějšího oblouku čela

$$B = \frac{h_2}{2} + r = \frac{35}{2} + 5 = 22,5 \text{ mm} \quad (1.59)$$

Podélná délka čela

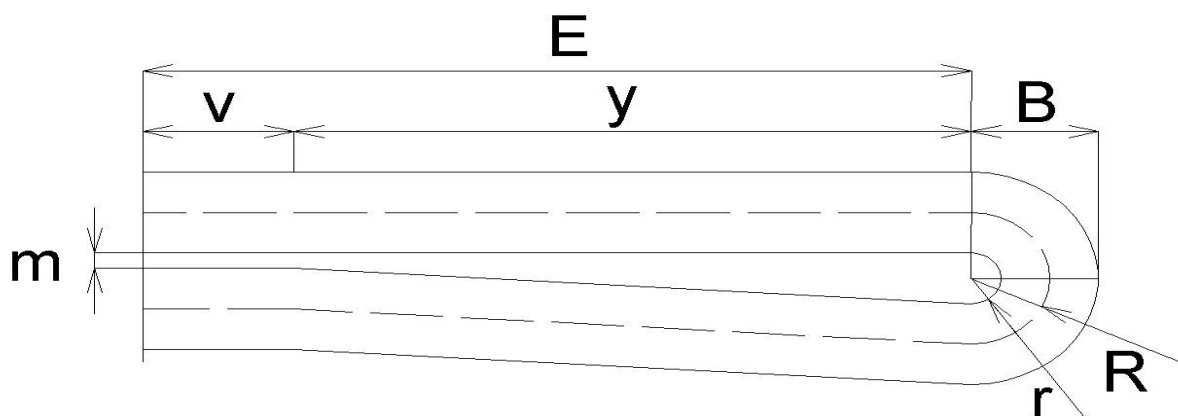
$$y = \frac{\beta \cdot t_p}{2} \cdot \tan \alpha_{\zeta} = \frac{0,96 \cdot 0,34 \cdot 10^3}{2} \cdot \tan(42) = 147 \text{ mm} \quad (1.60)$$

Poloměr ohybu uprostřed čel

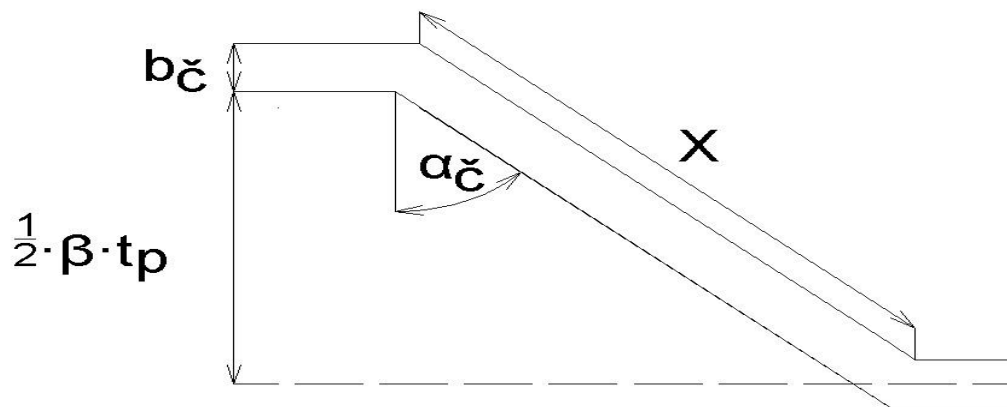
$$R = r + \frac{i \cdot (h_v + iz_v)}{2} = 5 + \frac{4 \cdot (3 + 0,4)}{2} = 11,8 \text{ mm} \quad (1.61)$$

Délka oka

$$o = \frac{\pi \cdot R}{2} = \frac{\pi \cdot 11,8}{2} = 18,5 \text{ mm} \quad (1.62)$$



Obrázek 1.2 - Čelo vinutí induktu



Obrázek 1.3 - Čelo vinutí induktu

Výběh cívky z drážky

v = volíme podle tabulky 1.3

U [kV].	$\leq 0,6$	3	6	10 ÷ 15
v [mm]	25	35 ÷ 40	40 ÷ 60	60 ÷ 70

Tabulka 1.3 – Tabulka závislosti výběhu z drážky na napětí stroje

Vyložení čel

$$E = v + y + B = 25 + 147 + 22,5 = 194,5 \text{ mm} \quad (1.63)$$

Délka čela

$$l_{\check{c}} = 2 \cdot (v + x + o) = 2 \cdot (25 + 220 + 18,5) = 527 \text{ mm} = 0,527 \text{ m} \quad (1.64)$$

Délka vodiče

$$l_v = l + l_{\check{c}} = 0,27 + 0,527 = 0,797 \text{ m} \quad (1.65)$$

Celková délka vodičů vinutí kotvy

$$l_a = 2 \cdot N \cdot l_v = 2 \cdot 150 \cdot 0,798 = 239 \text{ m} \quad (1.66)$$

[3]

1.5.4 Odpor vinutí a vliv skinefektu

Odpor jedné fáze

$$R_{1/20}' = \rho_{\text{cu}} \cdot \frac{2 \cdot l_v \cdot N_s}{a \cdot S_{\text{cu1}}} = \frac{1}{56} \cdot \frac{2 \cdot 0,797 \cdot 25}{3 \cdot 51,6} = 4,6 \cdot 10^{-3} \Omega \quad (1.67)$$

Vliv skinefektu:

Náhradní výška vodiče

$$\varepsilon = 2 \cdot \pi \cdot h_v \cdot \sqrt{\frac{j \cdot b_v \cdot f}{b_d \cdot \rho_{\text{cu}}}} \cdot 10^{-7} = 2 \cdot \pi \cdot 3 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 4,5 \cdot 90}{13 \cdot \frac{1}{56}}} \cdot 10^{-7} = 0,35 \quad (1.68)$$

Celkový počet vodičů v drážce nad sebou

$$g = i \cdot \frac{v_d}{2} = 4 \cdot \frac{4}{2} = 8 \quad (1.69)$$

Činitel zvýšení elektrického odporu

$$k_{\text{cu}} = \frac{g^2 - 0,2}{9} \cdot \varepsilon^4 = \frac{8^2 - 0,2}{9} \cdot 0,35^4 = 0,106 \quad (1.70)$$

Musí být splněna podmínka: $k_{\text{cu}} < 0,2$

Odpor při průchodu střídavého proudu při teplotě 20°C

$$R_{1/20} = (1 + k_{\text{cu}}) \cdot R_{1/20}' = (1 + 0,106) \cdot 4,6 \cdot 10^{-3} = 5,1 \cdot 10^{-3} \Omega \quad (1.71)$$

Odpor při průchodu střídavého proudu při teplotě 75°C

$$R_{1/75} = 1,22 \cdot R_{1/20} = 1,22 \cdot 5,1 \cdot 10^{-3} = 6,2 \cdot 10^{-3} \Omega \quad (1.72)$$

Procentní hodnota úbytku napětí na ohmickém odporu

$$u_r = \frac{R_{1/75} \cdot I}{U_f} \cdot 100 = \frac{6,2 \cdot 10^{-3} \cdot 1614}{\frac{400}{\sqrt{3}}} \cdot 100 = 4,3 \% \quad (1.73)$$

Hmotnost mědi vinutí kotvy

$$m_{\text{cu1}} = 8900 \cdot l_a \cdot S_{\text{cu1}} = 8900 \cdot 239 \cdot 51,6 \cdot 10^{-6} = 110 \text{ kg} \quad (1.74)$$

[1],[3]

1.6 Návrh magnetického obvodu

1.6.1 Určení velikosti vzduchové mezery a magnetického toku

Kontrola magnetického toku

$$\Phi_{\delta n} = \frac{2}{\pi} \cdot t_p \cdot l_i \cdot B_{\delta} = \frac{2}{\pi} \cdot 0,34 \cdot 0,23 \cdot 0,86 = 42,8 \cdot 10^{-3} \text{ Wb} \quad (1.75)$$

Velikost vzduchové mezery pod hlavním pólem

$$\delta = \gamma \cdot t_p \cdot \frac{A}{B_{\delta}} \cdot 10^{-6} = 0,255 \cdot 0,34 \cdot \frac{39519}{0,86} \cdot 10^{-6} = 4 \text{ mm} \quad (1.76)$$

, kde se konstanta γ volí mezi $\langle 0,2 \text{ až } 0,3 \rangle$ - zvoleno 0,255

- hodnota velikost vzduchové mezery byla odečtena z [1]. obr.8.17., str. 465

- Je nutné počítat s tím, že na okrajích pólových nástavců máme velikost mezery 2 až 3 krát větší než je tomu v ose pólu. Proto volíme:

$$\frac{\delta_{\max}}{\delta} = 2 \quad (1.77)$$

[1],[3]

1.6.2 Dimenzování magnetického obvodu

Výška pólu

$$h_p = 0,3 \cdot t_p = 0,3 \cdot 0,34 = 0,102 \text{ m} \quad (1.78)$$

Výška pólového nástavce

$$h_{pn} = 0,1 \cdot t_p = 0,1 \cdot 0,34 = 0,03 \text{ m} \quad (1.79)$$

Předpokládaná hodnota mezipólového rozptylového toku

$v = 0,15$ - volí se mezi 0,1 až 0,3

Délka pólu

-volí se stejná jako je délka induktu s radiálními chladícími kanály

$$l_p = l = 0,27 \text{ m} \quad (1.80)$$

Magnetická indukce v pólu

$$B_p = 1,55 \text{ T} \quad - \text{ volí se mezi 1,5 až 1,6 T}$$

Magnetická indukce ve jhu statoru

$$B_{js} = 1,1 \text{ T}$$

Šířka pólu

$$b_p = \frac{(1+\nu) \cdot \Phi_{\delta n}}{B_p \cdot l_p} = \frac{(1+0,15) \cdot 42 \cdot 10^{-3}}{1,55 \cdot 0,27} = 0,115 \text{ m} \quad (1.81)$$

Šířka pólového nástavce

$$b_{pn} = \alpha_{\delta} \cdot t_p = 0,7 \cdot 0,34 = 0,238 \text{ m} \quad (1.82)$$

Délka statoru

- oproti rotoru je zvětšená o 5 až 8 cm

$$l_s = l + 0,05 = 0,27 + 0,05 = 0,32 \text{ m} \quad (1.83)$$

Výška jha statoru

$$h_{js} = \frac{(1+\nu) \cdot \Phi_{\delta n}}{2 \cdot B_{js} \cdot l_s} = \frac{(1+0,15) \cdot 42 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 1,1 \cdot 0,32} = 0,069 \text{ m} \quad (1.84)$$

Magnetická indukce v jádře induktu

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

Výška jádra induktu

$$h_{jr} = \frac{\Phi_{\delta n}}{2 \cdot B_{jr} \cdot l_l \cdot k_{Fe}} = \frac{42 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 1,3 \cdot 0,23 \cdot 0,93} = 0,076 \text{ m} \quad (1.85)$$

Délka střední siločáry pólu:

$$l_{pstr} = h_p + h_{pn} = 0,102 + 0,034 = 0,132 \text{ m} \quad (1.86)$$

Délka střední siločáry jha statoru

$$l_{js} = \frac{\pi \cdot [D_1 + 2 \cdot (\delta + h_p + h_{pn})]}{4 \cdot p} = \frac{\pi \cdot [0,65 + 2 \cdot (0,004 + 0,102 + 0,03)]}{4 \cdot 3} = 0,241 \text{ m} \quad (1.87)$$

Délka střední siločáry jádra induktu

$$l_r = \frac{\pi \cdot [D_1 - 2 \cdot (h_d + h_{jr})]}{4 \cdot p} = \frac{\pi \cdot [0,65 - 2 \cdot (0,0395 + 0,076)]}{4 \cdot 3} = 0,11 \text{ m} \quad (1.88)$$

Nejmenší průměr hřídele

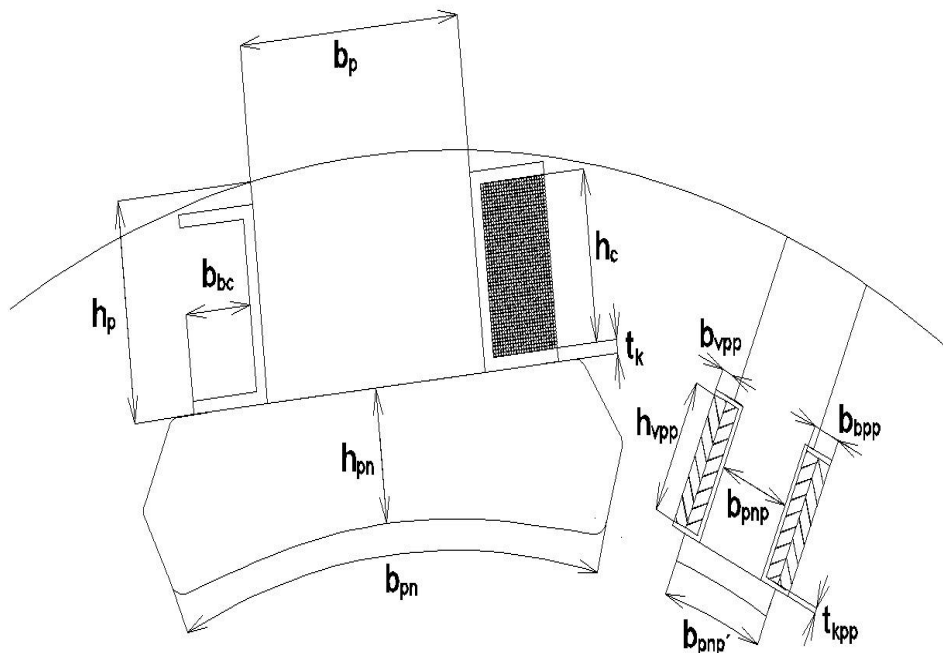
$$d_H = 0,135 \cdot \sqrt[i]{\frac{P}{n}} = 0,135 \cdot \sqrt[4]{\frac{600}{1800}} = 0,1 \text{ m} \quad (1.89)$$

Hodnotu i volíme podle poměru $\frac{P}{n}$:

Pokud poměr $\frac{P}{n} > 1$: $i = 3$

Pokud poměr $\frac{P}{n} < 1$: $i = 4$

$$\frac{P[\text{kW}]}{n} = \frac{600}{1800} < 1 \Rightarrow i = 4 \quad (1.90)$$



Obrázek 1.4 – Rozměry hlavního a pomocného pólu

[1],[3]

1.6.3 Charakteristika naprázdno

Carterův činitel respektující drážkování induktu

$$\frac{b_0}{z_1} = \frac{13}{14,23} = 0,914$$

$$\frac{b_0}{\delta} = \frac{13}{4} = 3,25$$

-jelikož máme otevřenou drážku typu N → platí: $b_0 = b_d$

$$k_{cd}=1,22$$

- odečteno z grafu pro určení Carterova činitele (příloha č.2)

Carterův činitel respektující vliv radiálních ventilačních kanálů

$$k_{ck} = \frac{1}{1 + \frac{\delta}{2+\delta} \cdot \frac{s_k \cdot n_k}{l_i}} = \frac{1}{1 + \frac{4 \cdot 10^{-4}}{2+4} \cdot \frac{10 \cdot 4}{230}} = 0,9 \quad (1.91)$$

Výsledná hodnota Carterova činitele

$$k_c = k_{cd} \cdot k_{ck} = 1,22 \cdot 0,9 = 1,1 \quad (1.92)$$

Magnetické napětí ve vzduchové mezeře

$$F_\delta = 0,8 \cdot k_c \cdot \delta \cdot B_\delta \cdot 10^6 = 0,8 \cdot 1,1 \cdot 0,004 \cdot 0,86 \cdot 10^6 = 3027 \text{ A} \quad (1.93)$$

Magnetizační charakteristika zubové vrstvy - viz. příloha č. 6

- Při vyplnění tabulky byly použity grafy z přílohy č.3 a 5

Magnetizační charakteristika celého magnetického obvodu – viz. příloha č.7

- Při vyplnění tabulky bylo využito grafů z přílohy č. 3,4 a 5

- Pomocí hodnot získaných z magnetizační charakteristiky celého obvodu byla zkonstruována charakteristika naprázdno (viz. příloha č.8)

Budící magnetické napětí

- odečteno z magnetizační charakteristiky celého obvodu (viz. příloha č.8) pro 100% jmenovitého napětí

$$\Sigma F = 4\,259 \text{ A}$$

1.7 Výpočet budícího vinutí

Demagnetizační účinek příčné složky reakce kotvy

- u strojů s kompenzačním vinutím, jenž kompenzuje reakci kotvy je:

$$F_{qd}=0$$

Potřebné magnetomotorické napětí budícího vinutí

$$F_b = \Sigma F + F_{qd} = 4259 + 0 = 4\,259 \text{ A} \quad (1.94)$$

Přesahující část pólového nástavce

$$a = \frac{b_{pn} - b_p}{2} = \frac{0,238 - 0,115}{2} = 0,0615 \text{ m} \quad (1.95)$$

Šířka budící cívký

$$b_{bc} = 32 \text{ mm}$$

- mělo by být < (40 až 50) mm

– viz. [1], str.81

Tloušťka kostřičky budící cívký

$$t_k = 5 \text{ mm}$$

- obvykle se volí 5 až 8mm.

– viz. [1] kap.8.7

Úbytek napětí na budícím vinutí

- zpravidla se volí 0,9 U

$$U_b = 0,9 \cdot U = 0,9 \cdot 400 = 360 \text{ V} \quad (1.96)$$

Střední délka závitů cívký

$$l_{bs} = 2 \cdot (l_p + b_p + 2 \cdot (b_{bc} + t_k)) = 2 \cdot (0,27 + 0,115 + 2 \cdot (0,032 + 0,005)) = 0,918 \text{ m} \quad (1.97)$$

Průřez vodiče budící cívký

$$S_{cub} = \rho_{cu} \cdot \frac{l_{bs} \cdot 2p \cdot F_b}{U_b} = \frac{1}{56} \cdot \frac{0,918 \cdot 6 \cdot 4259}{360} = 1,16 \text{ mm}^2 \quad (1.98)$$

Typ a rozměry vodiče

- podle [1] tab. 8.20. str. 478 – lakované mnohovrstvé cívky z drátu kruhového průřezu

- podle [1] tab. D3.1. str. 650-651 byl zvolen vodič o průměru:

$$b_v = h_v = 1,18 \text{ mm}$$

Průměr vodiče s izolací

- zvolena jednoduchá izolace podle [1] tab. D3.3., str. 655

$$b_{vi} = h_{vi} = 1,3 \text{ mm}$$

Skutečný průřez vodiče budící cívky

$$S_{cub} = 1,094 \text{ mm}^2 \quad - \text{ odečteno z [1] tab. D3.1., str. 650-651}$$

Proudová hustota ve vodiči

$$\sigma_{cub} = 3,2 \text{ A/mm}^2 \quad - \text{ viz. [1] kap.8.7.}$$

Budící proud

$$I_b = \sigma_{cub} \cdot S_{cub} = 3,2 \cdot 1,094 = 3,5 \text{ A} \quad (1.99)$$

Počet závitů budící cívky

$$N_b = \frac{F_b}{I_b} = \frac{4259}{3,5} = 1216,86 \quad (1.100)$$

-volíme nejbližší celé číslo $\rightarrow N_b=1217$

Počet poloh cívky

$$n_p = \frac{b_{bc}}{h_{vi}} = \frac{32}{1,3} = 24,62 \quad (1.101)$$

-volíme nejbližší celé číslo $\rightarrow n_p=25$

Přepočtená tloušťka budící cívky

$$b_{bc} = b_{vi} \cdot n_p = 1,3 \cdot 25; 32,5 \text{ mm} \quad (1.102)$$

Počet závitů v jedné poloze

$$N_p = \frac{N_b}{n_p} = \frac{1217}{25} = 48,68 \quad (1.103)$$

-volíme nejbližší celé číslo $\rightarrow N_p=49$

Výška budící cívky

$$h_c = N_p \cdot b_{vi} = 49 \cdot 1,3 = 63,7 \text{ mm} \quad (1.104)$$

Výška pólu

$$b_p = h_c + 2 \cdot t_k = 0,0637 + 2 \cdot 0,005 = 0,0737 \text{ m} \quad (1.105)$$

- výška pólu vychází menší, než byl odhad, proto musíme výšku pólu upravit

[1],[3]

1.8 Orientační výpočet oteplení budící cívky

Vnější obvod budící cívky

$$l_{bc} = 2 \cdot [l_p + b_p + 4 \cdot (b_{bc} + t_k)] = 2 \cdot [0,27 + 0,115 + 4 \cdot (0,0325 + 0,005)] = 1,07 \text{ m} \quad (1.106)$$

Střední obvod budící cívky

$$l_{bs} = 2 \cdot \left[l_p + b_p + 4 \cdot \left(\frac{b_{bc}}{2} + t_k \right) \right] = 2 \cdot \left[0,27 + 0,115 + 4 \cdot \left(\frac{0,0325}{2} + 0,005 \right) \right] = 0,94 \text{ m} \quad (1.107)$$

Ochlazovací povrch všech cívek

$$O_{2pc} = h_c \cdot l_{bc} \cdot 2p = 0,0637 \cdot 1,07 \cdot 6 = 0,41 \text{ m}^2 \quad (1.108)$$

Odpor všech cívek budícího vinutí při teplotě 20°C

$$R_{b/20} = \rho_{cu} \cdot \frac{l_{bs} \cdot N_b \cdot 2p}{S_{cub}} = \frac{1}{56} \cdot \frac{0,94 \cdot 1217 \cdot 6}{1,094} = 112 \ \Omega \quad (1.109)$$

Odpor všech cívek budícího vinutí při teplotě 75°C

$$R_{b/75} = 1,22 \cdot R_{b/20} = 1,22 \cdot 112 = 137 \ \Omega \quad (1.110)$$

Jouleovy ztráty v budícím vinutí

$$\Delta P_{jb} = R_{b/75} \cdot I_b^2 = 137 \cdot 3,5^2 = 1\,678 \text{ W} \quad (1.111)$$

Součinitel přestupu tepla

$$\alpha = 60 \frac{\text{W}}{\text{K}\cdot\text{m}^2} \quad \text{-hodnota zvolena}$$

Oteplení cívky

$$\Delta v_{\text{cub}} = \frac{1,18 \cdot \Delta P_{\text{cub}}}{\alpha \cdot 0,2_{\text{pc}}} = \frac{1,18 \cdot 1678}{60 \cdot 0,41} = 80,5^\circ\text{C} \quad (1.112)$$

[3]

1.9 Komutátor a kartáče

Šířka komutačního pásma

$$b_{kp} = 0,7 \cdot (t_p - b_{pn}) = 0,7 \cdot (0,24 - 0,238) = 71,4 \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad (1.113)$$

Činitel mezilamelového krytí

$$\beta = 3,1 \quad \text{-volí se 2 až 4}$$

Šířka kartáče

$$b_k = \beta \cdot t_1 = 3,1 \cdot 10,22 = 31,7 \text{ mm} \quad (1.114)$$

- podle [1] tab. D5.1. str. 666-668 - zvoleny kartáče o rozměru $b_k \times l_k = 32 \times 40 \text{ mm}$

Dovolená proudová hustota kartáče

- podle [1] tab. D5.2., str. 668-670 zvoleny kartáče typu Ek 24

$$J_k = 11 \text{ A/cm}^2$$

Dosedací plocha kartáče

$$S_k = b_k \cdot l_k = 32 \cdot 10^{-3} \cdot 40 \cdot 10^{-3} = 12,8 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \quad (1.115)$$

Počet kartáčů na jednom sběradle

$$N_k = \frac{I}{p \cdot S_k \cdot J_k} = \frac{1614}{3 \cdot 12,8 \cdot 10^{-4} \cdot 11 \cdot 10^4} = 3,82 \quad (1.116)$$

- volíme nejbližší celé číslo $\rightarrow N_k = 4$

Dotyková plocha všech kartáčů na komutátoru

$$\Sigma S_k = 2p \cdot N_k \cdot S_k = 6 \cdot 4 \cdot 12,6 \cdot 10^{-4} = 0,03072 \text{ m}^2 \quad (1.117)$$

Skutečná hustota proudu pod kartáči

$$J_k = \frac{2 \cdot I}{\Sigma S_k} = \frac{2 \cdot 1614}{307,2 \cdot 10^{-4}} = 10,51 \cdot 10^4 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2} \quad (1.118)$$

Nezbytná aktivní délka komutátoru

$$l_{\text{kom}} = (N_k + 0,5) \cdot l_k + (N_k - 1) \cdot 5 + 20 = (4 + 0,5) \cdot 40 + (4 - 1) \cdot 5 + 20 = 215 \text{ mm} \quad (1.119)$$

Celková aktivní délka komutátoru

- k aktivní délce musíme přidat velikost pro praporky – zvoleno 8 mm

$$l_{\text{komc}} = l_{\text{kom}} + 8 = 215 + 8 = 223 \text{ mm} \quad (1.120)$$

[1]

1.10 Kompenzační vinutí

Magnetomotorické napětí kompenzačního vinutí

$$U_{kv} = (0,85 \text{ až } 1,15) \cdot A \cdot \frac{b_{pn}}{2} - \text{zvoleno 1 krát}$$

$$U_{kv} = A \cdot \frac{b_{pn}}{2} = 39519 \cdot \frac{0,238}{2} = 4703 \text{ V} \quad (1.121)$$

Počet drážek kompenzačního vinutí

Q_{kv} – volí se 6 až 12 – vždy musí být sudé z důvodu požadavku na souměrnost sousedních cívek kompenzačního vinutí

- dále musí být splněna podmínka, že: $t_d \neq t_{dkv} \rightarrow$ zvoleno:

$$Q_{kv} = 10$$

Počet paralelních větví kompenzačního vinutí

$$a_{kv} = 1 \quad - \text{ zvoleno podle [1] kap. 8.5}$$

Šířka pólového nástavce bez okrajů

$$b_{pn}' = b_{pn} - 20 = 238 - 20 = 218 \text{ mm} \quad (1.122)$$

Počet vodičů v drážce kompenzačního vinutí

$$v_{dkv} = 1$$

Drážková rozteč kompenzačního vinutí

$$t_{dkv} = \frac{b_{pn}'}{Q_{kv}} = \frac{218}{10} = 21,8 \text{ mm} \quad (1.123)$$

Proud kompenzačního vinutí

$$- \text{ jelikož platí: } \frac{t_{kv} \cdot I_k}{t_k} = \frac{v_d \cdot I_a}{t_{d1}}$$

- po vyjádření I_k dostáváme:

$$I_k = \frac{v_d \cdot I_a}{v_{dkv}} \cdot \frac{t_{dkv}}{t_{d1}} = \frac{4 \cdot 269}{1} \cdot \frac{21,8}{27,23} = 861 \text{ A} \quad (1.124)$$

Počet vodičů kompenzačního vinutí

$$V_{kv} = \frac{A \cdot b_{pn}' \cdot a_{kv}}{I_k} = \frac{39519 \cdot 0,218 \cdot 1}{861} = 10 \quad (1.125)$$

Činitel rozptylu hlavních pólů

$$\sigma_p = 1,05 \quad - \text{ podle [1] kap. 8.5}$$

Magnetická indukce v nejmenším průřezu zubu kompenzačního vinutí

$$B_{zkv} = 1,7 \quad - \text{ volí se mezi 1,6 až 1,8 T}$$

Šířka zubu

$$b_{zkv} = \frac{t_{dkv} \cdot B_{\delta} \cdot \sigma_p}{B_{zkv} \cdot k_{Fe}} = \frac{21,8 \cdot 0,86 \cdot 1,05}{1,7 \cdot 0,93} = 12,45 \text{ mm} \quad (1.126)$$

Světlá šířka drážky

$$b_{dkv} = t_{dkv} - b_{zkv} = 21,8 - 12,45 = 9,35 \text{ mm} \quad (1.127)$$

- zvoleno $b_{dkv} = 10$

Ověření počtu vodičů v jedné drážce kompenzačního vinutí

$$V_{dkv} = \frac{V_{kv}}{Q_{kv}} = \frac{10}{10} = 1 \quad (1.128)$$

- vždy se musí zaokrouhlit na nejbližší celé číslo

Hustota proudu vodiče pro izolaci třídy typu B

$$J_{kv} = 5 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2 \quad - \text{ podle [1] kap. 8.5}$$

Průřez vodiče kompenzačního vinutí

$$S_{kv} = \frac{I_k}{a_{kv} \cdot J_{kv}} = \frac{861}{1 \cdot 5 \cdot 10^6} = 172 \text{ mm}^2 \quad (1.129)$$

- Jelikož je $V_{dkvk} < 2$ – je výhodné použití polozavřených drážek

- byla zvolena drážka typu D

Rozměry drážky

- podle [1] tab. D4.1a., str. 659 zjištěno :

$$b_0 = 4,5 \text{ mm}$$

$$h_0 = 0,7 \text{ mm}$$

$$h_1 = 2,2 \text{ mm}$$

$$u = 0,8 \text{ mm}$$

Izolace drážky

- podle [1] tab. 8.15., str. 468

Číslo izolace	Materiál	Tloušťka izolace [mm]	Počet otáček	Kolikrát se vyskytuje	Celkem na šířku [mm]	Celkem na výšku [mm]
Č.1	Sklotextitá nebo polyamidá páska	0,1	1 překrytí	0		
Č.2	Syntetická izolace	0,15	4,5	2	1,35	1,35
Č.3	Lakovaná tkanina nebo feronový papír	0,15	4,5	2	0,3	0,3
Izolace celkem					1,65	1,65
vůle					0,35	1,65
Celková izolace kompenzačního vinutí					2 ($i_{zkvdš}$)	2,4 (i_{kvdh})

Tabulka 1.4 – Izolace drážky kompenzačního vinutí

Šířka vodiče

$$b_{vkv} = b_{dkv} - b_{izkvd} = 10 - 2 = 8 \text{ mm} \quad (1.130)$$

- podle [1] tab. D3.4 str. 656 - zvolen vodič tloušťky $b_{vkv} = 7 \text{ mm}$ Skutečná šířka zubu

$$b_{zkv'} = t_{dkv'} - b_{dkv} = 21,8 - 10 = 11,8 \text{ mm} \quad (1.131)$$

Výška vodiče

$$h_{vkV} = \frac{S_{kv}}{b_{vkV}} = \frac{172}{8} = 21,5 \text{ mm} \quad (1.132)$$

- podle tab. [1] tab. D3.4 str. 656 - zvolen vodič $b_{vkV} \times h_{vkV} = 7 \times 22 \text{ mm}$

Izolace vodiče

$$i_{z_{vkV}} = 0,6 \text{ mm} \quad \text{- podle [1] tab. D3.3., str. 655}$$

Šířka izolovaného vodiče

$$b_{vkViz} = b_{vkV} + i_{z_{vkV}} = 7 + 0,6 = 7,6 \text{ mm} \quad (1.133)$$

Výška izolovaného vodiče

$$h_{vkViz} = h_{vkV} + i_{z_{vkV}} = 22 + 0,6 = 22,6 \text{ mm} \quad (1.134)$$

Skutečný průřez vodiče kompenzačního vinutí

$$S_{kv} = 173,8 \text{ mm}^2 \quad \text{- odečteno z [1] tab. D3.4., str. 656}$$

Výška drážky hd_{2kv}

$$h_{d_{2kv}} = h_{vkV} + i_{z_{kvh}} = 22,6 + 2,4 = 25 \text{ mm} \quad (1.135)$$

Celková výška drážky

$$h_{vdK} = h_{d_{2kv}} + h_0 + h_1 = 25 + 0,7 + 2,2 = 27,9 \text{ mm} \quad (1.136)$$

Skutečná hustota proudu

$$J_{kv} = \frac{I_k}{a_{kv} \cdot S_{kv}} = \frac{861}{1 \cdot 173,8} = 4,95 \text{ A/mm}^2 \quad (1.137)$$

Stupeň kompenzace

$$k_k = \frac{V_{kv} \cdot I_k}{a_{kv} \cdot b_{pn} \cdot A} = \frac{10 \cdot 861}{1 \cdot 0,218 \cdot 39219} = 1 \quad (1.138)$$

- musí být splněna podmínka, že $k_k = (0,85 \text{ až } 1,115)$ - vyhovuje

Průměr vnitřního povrch hlavního pólu

$$D_h = D_1 = 2 \cdot \delta = 0,65 + 2 \cdot 0,004 = 0,658 \text{ m} \quad (1.139)$$

Sřední šířka cívky kompenzačního vinutí

$$b_{ckv} = \frac{\pi \cdot (D_h + h_{dkv})}{2p} - \frac{b_{pn}}{2} \cdot \frac{(D_h + h_{dkv})}{D_h} = \frac{\pi \cdot (0,658 + 0,0279)}{6} - \frac{0,328}{2} \cdot \frac{(0,658 + 0,0279)}{0,658} = 0,24 \text{ m} \quad (1.140)$$

Sřední délka čel kompenzačního vinutí

$$l_{čkv} = 1,2 \cdot b_{ckv} = 1,2 \cdot 0,24 = 0,288 \text{ m} \quad (1.141)$$

Výběh z cívky kompenzačního vinutí

$$b_{čk} = 0,05 \text{ m} \quad \text{- podle [1] kap. 8.5}$$

Sřední délka přímkové části cívky kompenzačního vinutí

$$l_{dvk} = l_{pn} + 2 \cdot b_{čk} = 0,27 + 2 \cdot 0,05 = 0,37 \text{ m} \quad (1.142)$$

Sřední délka půlsvitu kompenzačního vinutí

$$l_{kvav} = l_{dkv} + l_{čkv} = 0,37 + 0,288 = 0,658 \text{ m} \quad (1.143)$$

Odpor kompenzačního vinutí

$$R_{kv} = \rho_{cu} \cdot \frac{V_{kv} \cdot l_{kvav} \cdot 2p}{a_{kv}^2 \cdot S_{kv}} = \frac{1}{56} \cdot \frac{10 \cdot 0,658 \cdot 6}{12 \cdot 173,8 \cdot 10^{-6}} = 4 \cdot 10^{-3} \Omega \quad (1.144)$$

Hmotnost mědi kompenzačního vinutí

$$m_{cukv} = 8900 \cdot l_{kvav} \cdot V_{kv} \cdot 2p \cdot S_{kv} = 8900 \cdot 0,658 \cdot 10 \cdot 6 \cdot 173,8 \cdot 10^{-6} = 61 \text{ kg} \quad (1.145)$$

[1],[3]

1.11 Výpočet komutacePočet závitů v budící cívce

$$z = \frac{V}{2 \cdot K} = \frac{300}{2 \cdot 150} = 1 \quad (1.146)$$

Obvodová rychlost kotvy

$$v_a = \frac{\pi \cdot D_1 \cdot n}{60} = \frac{\pi \cdot 0,65 \cdot 1800}{60} = 61,28 \text{ m/s} \quad (1.147)$$

Délka drážky

$$l_d = l = 0,27$$

Magnetická vodivost drážky

$$\lambda = 0,6 \cdot \frac{h_d}{b_d} + \frac{l_c}{l_d} + \frac{2,5 \cdot 10^5 \cdot a}{z \cdot l_d \cdot A \cdot v_a \cdot p} = 0,6 \cdot \frac{39,5}{13} + \frac{0,528}{0,27} + \frac{2,5 \cdot 10^5 \cdot 3}{1 \cdot 0,27 \cdot 39519 \cdot 61,26 \cdot 3} = 4,16 \quad (1.148)$$

Reaktanční napětí v komutující cívice

$$U_r = 2 \cdot z \cdot l \cdot A \cdot v_a \cdot \lambda \cdot 10^{-6} = 2 \cdot 1 \cdot 0,27 \cdot 39519 \cdot 61,28 \cdot 4,16 \cdot 10^{-6} = 5,44 \text{ V} \quad (1.149)$$

Habartovo číslo

$$\varepsilon = 5 \cdot 10^{-6} \quad \text{- volí se } (4 \text{ až } 7) \cdot 10^{-6}$$

Kontrola reaktančního napětí v komutující cívice

$$U_r' = 2 \cdot v_a \cdot A \cdot l_i \cdot z \cdot \varepsilon = 2 \cdot 61,26 \cdot 39519 \cdot 0,23 \cdot 1 \cdot 5 \cdot 10^{-6} = 5,57 \text{ V} \quad (1.150)$$

Vzduchová mezera pod pomocným pólem

$$\delta_{pp} = (1,5 \text{ až } 2) \cdot \delta$$

$$\delta_{pp} = 2 \cdot \delta = 2 \cdot 0,004 = 0,008 \text{ m} \quad (1.151)$$

Carterův činitel pod pomocným pólem

$$k_{cp} = \frac{t_d + 10 \cdot \delta_{pp}}{t_d - b_0 + 10 \cdot \delta_{pp}} = \frac{0,02723 + 10 \cdot 0,008}{0,02723 - 0,013 + 10 \cdot 0,008} = 1,14 \quad (1.152)$$

Výpočtová vzduchová mezera

$$l_{\delta p} = k_{cp} \cdot \delta_{pp} = 1,14 \cdot 0,008 = 9,12 \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad (1.153)$$

Střední indukce ve vzduchové mezeře pod pomocným pólem

- k zajištění zrychlené komutace volíme reaktanční napětí 1,1 krát větší

$$B_{\delta pp} = \frac{U_r}{2 \cdot z \cdot l \cdot v_a} = \frac{1,1 \cdot 5,44}{2 \cdot 1 \cdot 0,27 \cdot 61,26} = 0,18 \text{ T} \quad (1.154)$$

Šířka pólového nástavce

$$b_{\text{pnp}}' = (0,55 \text{ až } 0,75) \cdot b_{\text{kp}} = (0,55 \text{ až } 0,75) \cdot 71,4 \cdot 10^{-3} = 50 \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad (1.155)$$

Skutečná šířka pólového nástavce

$$b_{\text{pnp}} = b_{\text{pnp}}' - 2 \cdot \delta_{\text{pp}} = 50 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 8 \cdot 10^{-3} = 34 \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad (1.156)$$

Osová délka pólového nástavce pomocného pólu

$$l_{\text{pp}} = l = 0,27 \text{ m}$$

Magnetický tok pomocného pólu ve vzduchové mezeře

$$\Phi_{\delta\text{p}} = B_{\delta\text{pp}} \cdot b_{\text{pnp}}' \cdot l_{\text{pp}} = 0,18 \cdot 50 \cdot 10^{-3} \cdot 0,27 = 2,43 \cdot 10^{-3} \text{ Wb} \quad (1.157)$$

Činitel rozptylu pomocných pólů

$$\sigma_{\text{pp}} = 2,5 \quad \text{- volí se 2 až 3}$$

Magnetický tok v jádře pomocného pólu

$$\Phi_{\text{pp}} = \sigma_{\text{pp}} \cdot \Phi_{\delta\text{p}} = 2,5 \cdot 2,43 \cdot 10^{-3} = 6,08 \cdot 10^{-3} \text{ Wb} \quad (1.158)$$

Šířka jádra pomocného pólu

$$b_{\text{pp}} = 30 \text{ mm} \quad \text{- volí se podle [1] obr.8.29a str. 484}$$

Délka jádra pomocného pólu

$$l_{\text{pp}}' = l = 0,27 \text{ m}$$

Průřez jádra složený z plechů 0,5 mm²

$$S_{\text{Fepp}} = l_{\text{pp}}' \cdot b_{\text{pp}} \cdot k_{\text{Fe}} = 0,27 \cdot 30 \cdot 10^{-3} \cdot 0,93 = 7,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \quad (1.159)$$

Magnetická indukce v jádře pomocných pólů

$$B_{\text{pp}} = \frac{\Phi_{\text{pp}}}{S_{\text{Fepp}}} = \frac{6,08 \cdot 10^{-3}}{7,5 \cdot 10^{-3}} = 0,81 \text{ T} \quad (1.160)$$

Magnetická indukce ve vzduchové mezeře

$$B_{\delta p} = \frac{\Phi_{\delta p}}{b_{pn} \cdot l_{pp}} = \frac{2,43 \cdot 10^{-3}}{50 \cdot 10^{-3} \cdot 0,27} = 0,23 \text{ T} \quad (1.161)$$

[1],[3]

1.12 Výpočet vinutí pomocných pólů

Velikost magnetického napětí reakce kotvy

Obecně :

$$F_a = \frac{1}{2} \cdot A \cdot t_p$$

Pro stroj s kompenzačním vinutím platí:

$$F_{ak} = F_a - F_k = \frac{1}{2} \cdot A \cdot t_p - \frac{1}{2} \cdot A \cdot \alpha_{\delta} \cdot t_p = \frac{1}{2} \cdot (1 - \alpha) \cdot A \cdot t_p =$$

$$\frac{1}{2} \cdot (1 - 0,7) \cdot 39519 \cdot 0,34 = 2015 \text{ A} \quad (1.162)$$

Magnetické napětí pro vytvoření magnetické indukce $B_{\delta pp}$ pod pomocným pólem

$$F_{kp} = \frac{1}{\mu_0} \cdot B_{\delta pp} \cdot \delta_{pp} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot 0,18 \cdot 0,008 = 1146 \text{ A} \quad (1.163)$$

Výsledné magnetické napětí pomocného pólu

$$F_{pp} = F_{ak} + F_{kp} = 2015 + 1146 = 3161 \text{ A} \quad (1.164)$$

Počet závitů cívky pomocného pólu

$$N_{pp} = \frac{F_{pp}}{I} = \frac{3161}{1614} = 1,96 \quad (1.165)$$

-volíme nejbližší celé číslo $\rightarrow N_{pp} = 2$

Počet paralelních větví pomocných pólů

$$a_{pp} = 1$$

Předběžná proudová hustota vinutí pomocných pólů

$$J_{pp} = 5 \text{ A/mm}^2$$

Předběžný průřez vodiče

$$S_{pp} = \frac{I}{a_{pp} \cdot J_{pp}} = \frac{1614}{1,5 \cdot 10^{-6}} = 323 \text{ mm}^2 \quad (1.166)$$

-podle [1] tab.D3.4., str. 656 byl zvolen vodič $b_{vpp} \times h_{vpp} = 6,5 \times 50 \text{ mm}$

-podle [1] tab.D3.3., str. 655 byla zvolena izolace vodiče o tloušťce $iz_{pp} = 0,6 \text{ mm}$

Skutečný průřez vodiče

$$S_{pp} = 323,32 \text{ mm}^2 \quad - \text{ odečteno z [1] tab. D3.4., str. 656}$$

Skutečná proudová hustota vinutí pomocných pólů

$$J_{pp} = \frac{I}{S_{pp}} = \frac{1614}{323,23} = 5 \text{ A/mm}^2 \quad (1.167)$$

Jádro pomocného pólu

- kvůli opěrkám pro cívku se volí na každé straně o 1 mm kratší

$$l_{pp} = l_{pp}' - 2 \cdot 10^{-3} = 0,27 \cdot 2 \cdot 10^{-3} = 0,268 \text{ m} \quad (1.168)$$

Šířka cívky pomocného pólu

$$b_{cpp} = 13 \text{ mm}$$

Tloušťka izolace pomocného pólu

$$t_{kpp} = 2 \text{ mm}$$

Střední délka závitu vinutí pomocného pólu

$$l_{ppav} = 2 \cdot (b_{pp} + l_{pp}) + \pi \cdot (b_{cpp} + 2 \cdot t_{kpp}) = 2 \cdot (0,03 + 0,268) + \pi \cdot (0,013 + 0,002) = 0,649 \text{ m} \quad (1.169)$$

Celková délka vodiče vinutí pomocného pólu

$$l_{vpp} = 2p \cdot l_{ppav} \cdot N_{pp} = 6 \cdot 0,649 \cdot 2 = 7,79 \text{ m} \quad (1.170)$$

Odpor vinutí pomocných pólů při 20°C

$$R_{pp} = \rho \cdot \frac{l_{vpp}}{S_{pp} \cdot a_{pp}^2} = \frac{1}{56 \cdot 10^6} \cdot \frac{7,74}{323,32 \cdot 10^{-6} \cdot 1^2} = 0,43 \cdot 10^{-3} \Omega \quad (1.171)$$

Odpor vinutí pomocných pólů při 75°C

$$R_{pp(75)} = 1,22 \cdot R_{pp} = 1,22 \cdot 0,43 \cdot 10^{-3} = 0,52 \cdot 10^{-3} \Omega \quad (1.172)$$

Hmotnost vinutí pomocných pólů

$$m_{cupp} = 8900 \cdot l_{vpp} \cdot S_{pp} = 8900 \cdot 7,79 \cdot 323,23 \cdot 10^{-6} = 22 \text{ kg} \quad (1.173)$$

- rozměry pomocného pólu – viz obr. 1.4.

[1]

1.13 Ztráty a účinnost

Jouleovy ztráty ve vinutí kotvy

$$\Delta P_{ja} = R_{a(75)} \cdot I^2 = 6,2 \cdot 10^{-3} \cdot 1614^2 = 16\,151 \text{ W} \quad (1.174)$$

Jouleovy ztráty ve vinutí pomocných pólů

$$\Delta P_{jpp} = R_{pp(75)} \cdot I^2 = 0,52 \cdot 10^{-3} \cdot 1614^2 = 1\,355 \text{ W} \quad (1.175)$$

Jouleovy ztráty v budícím vinutí

- určeny v kap.1.8.

Jouleovy ztráty v kompenzačním vinutí

$$\Delta P_{jkv} = R_{kv} \cdot I_k^2 = 4 \cdot 10^{-3} \cdot 861^2 = 2\,965 \text{ W} \quad (1.176)$$

Úbytek napětí na kartáčích

- odečteno z [1] tab. D5.2 str. 668 – 670 pro kartáče EK24

$$\Delta U_k = 2,9 \text{ V}$$

Elektrické ztráty v kluzném kontaktu kartáč - komutátor

$$\Delta P_k = 2 \cdot \Delta U_k \cdot I = 2 \cdot 2,9 \cdot 1614 = 9\,316 \text{ W} \quad (1.177)$$

Koeficient tření kartáčů

$$k_f = 0,25 \quad \text{- viz. [1] kap.8.10}$$

Přítlačný tlak kartáčů

$$P_k = 12 \text{ kPa} \quad - \text{ viz. [1] kap.8.10}$$

Ztráty třením kartáčů

$$\Delta P_{fk} = k_f \cdot p_k \cdot \Sigma S_k \cdot v_k = 0,25 \cdot 1,8 \cdot 10^4 \cdot 307,23 \cdot 10^{-4} \cdot 46 = 6359 \text{ W} \quad (1.178)$$

Ztráty ventilační a v ložiskách

$$\Delta P_{\text{vent}} + \Delta P_{fl} = 10 \text{ 000 W} \quad - \text{ odečteno dle [1] obr. 8.30., str. 487}$$

Hodnota vnitřního průměru kotvy

$$D_i = 27 \cdot \sqrt[3]{\frac{P}{n}} = 27 \cdot \sqrt[3]{\frac{600 \text{ 000}}{1800}} = 187,2 \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad (1.179)$$

Hmotnost jha kotvy

$$m_j = 7800 \cdot \frac{\pi \cdot [(D - 2 \cdot h_d)^2 - D_i^2]}{4} \cdot l \cdot k_{Fe} = 7800 \cdot \frac{\pi \cdot [(0,65 - 2 \cdot 0,0395)^2 - 0,1872^2]}{4} \cdot 0,27 \cdot 0,93 = 448 \text{ kg} \quad (1.180)$$

Hmotnost zubů kotvy

$$m_z = 7800 \cdot Q \cdot z_2 \cdot h_d \cdot l_i \cdot k_{Fe} = 7800 \cdot 75 \cdot 12,57 \cdot 10^{-3} \cdot 0,0395 \cdot 0,23 \cdot 0,93 = 62 \text{ kg} \quad (1.181)$$

Měrné ztráty

$$P_{1,0/5,0} = 1,75 \quad - \text{ odečteno z [1] tab. 6.24., str. 256}$$

Exponent β

$$\beta = 1,4 \quad - \text{ odečteno z [1] tab. 6.24., str. 256}$$

Magnetické ztráty ve jhu kotvy

$$\Delta P_{Fej} = 2,3 \cdot \Delta p_{1,0/5,0} \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^\beta \cdot B_{js}^2 \cdot m_j = 2,3 \cdot 1,75 \cdot \left(\frac{90}{50}\right)^{1,4} \cdot 1,1^2 \cdot 448 = 4 \text{ 968 W} \quad (1.182)$$

Magnetické ztráty v zubech rotoru

$$\Delta P_{\text{Fez}} = 2,3 \cdot \Delta p_{1,0/5,0} \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^\beta \cdot B_{z2}^2 \cdot m_z = 2,3 \cdot 1,75 \cdot \left(\frac{90}{50}\right)^{1,4} \cdot 1,85^2 \cdot 62 = 1\,945 \text{ W} \quad (1.183)$$

Celkové ztráty

$$\begin{aligned} \Delta P &= \Delta P_{\text{ja}} + \Delta P_{\text{jpp}} + \Delta P_{\text{jb}} + \Delta P_{\text{jkv}} + \Delta P_{\text{k}} + \Delta P_{\text{fk}} + (\Delta P_{\text{vent}} + \Delta P_{\text{fl}}) + \Delta P_{\text{Fej}} + \Delta P_{\text{Fez}} + \\ \Delta P_{\text{d}} &= 16\,151 + 1\,355 + 678 + 2\,965 + 9\,361 + 6\,359 + 10\,000 + 4\,968 + \\ &1\,945 = 54\,782 \text{ W} \end{aligned} \quad (1.184)$$

Elektrický příkon

$$P_p = P + \Delta P = 600\,000 + 54\,782 = 654\,782 \text{ W} \quad (1.185)$$

Jmenovitý proud stroje

$$I_N = \frac{P_p}{U} = \frac{654\,782}{400} = 1\,637 \text{ A} \quad (1.186)$$

Proud kotvy

$$I = I_N - I_{\text{bn}} = 1637 - 3,5 = 1633,5 \text{ A} \quad (1.187)$$

Účinnost stroje

$$\eta = \frac{P}{P + \Delta P} = \frac{600\,000}{600\,000 + 54\,782} = 0,916 \quad (1.188)$$

[1]

2 Výpočet oteplení indultu

2.1 Určení rozměrů úseku

Ztráty v drážkové části

$$\Delta P_{\text{cud}} = \Delta P_{\text{ja}} \cdot \frac{l}{l_v} = 16\,151 \cdot \frac{0,27}{0,797} = 5\,471 \text{ W} \quad (2.1)$$

Ztráty v čelech vinutí

$$\Delta P_{\text{cuč}} = \Delta P_{\text{ja}} \cdot \frac{l_{\xi}}{l_v} = 16\,151 \cdot \frac{0,527}{0,797} = 10\,680 \text{ W} \quad (2.2)$$

Počet čel

$$Q_c = Q = 75 \quad \text{- je roven počtu drážek induktu}$$

Ztráty ve vinutí ve vymezeném úseku rotoru

$$\Delta P_{\text{cud1}} = \frac{\Delta P_{\text{cud}}}{2 \cdot Q_c \cdot (n_k + 1)} = \frac{5\,471}{2 \cdot 75 \cdot (4 + 1)} = 7,3 \text{ W} \quad (2.3)$$

Ztráty v zubu ve vymezeném úseku rotoru

$$\Delta P_{\text{Fez1}} = \frac{\Delta P_{\text{Fez}}}{2 \cdot Q_c \cdot (n_k + 1)} = \frac{1\,945}{2 \cdot 75 \cdot (4 + 1)} = 2,6 \text{ W} \quad (2.4)$$

Ztráty v jádře rotoru ve vymezeném úseku

$$\Delta P_{\text{Fej1}} = \frac{\Delta P_{\text{Fej}}}{2 \cdot Q_c \cdot (n_k + 1)} = \frac{4\,968}{2 \cdot 75 \cdot (4 + 1)} = 6,6 \text{ W} \quad (2.5)$$

Drážková rozteč v jednotlivých hladinách - viz. obr. 2.1.

$$S_{z1} = \frac{\pi \cdot D_1}{Q} - b_d = \frac{\pi \cdot 0,65}{75} - 0,013 = 0,0142 \text{ m} \quad (2.6)$$

$$S_{z2} = \frac{\pi \cdot (D_1 - \frac{h_d}{4})}{Q} - b_d = \frac{\pi \cdot (0,65 - \frac{0,0395}{4})}{75} - 0,013 = 0,0138 \text{ m} \quad (2.7)$$

$$S_{z3} = \frac{\pi \cdot (D_1 - \frac{h_d}{2})}{Q} - b_d = \frac{\pi \cdot (0,65 - \frac{0,0395}{2})}{75} - 0,013 = 0,0134 \text{ m} \quad (2.8)$$

$$S_{z4} = \frac{\pi \cdot (D_1 - \frac{3 \cdot h_d}{4})}{Q} - b_d = \frac{\pi \cdot (0,65 - \frac{3 \cdot 0,0395}{4})}{75} - 0,013 = 0,013 \text{ m} \quad (2.9)$$

$$S_{j1} = \frac{\pi \cdot (D_1 - h_d - \frac{h_{jr}}{4})}{Q} = \frac{\pi \cdot (0,65 - 0,0395 - \frac{0,076}{4})}{75} = 0,0248 \text{ m} \quad (2.10)$$

$$S_{j2} = \frac{\pi \cdot (D_1 - h_d - \frac{h_{jr}}{2})}{Q} = \frac{\pi \cdot (0,65 - 0,0395 - \frac{0,076}{2})}{75} = 0,0240 \text{ m} \quad (2.11)$$

$$S_{j3} = \frac{\pi \cdot (D_1 - h_d - \frac{3 \cdot h_{jr}}{4})}{Q} = \frac{\pi \cdot (0,65 - 0,0395 - \frac{3 \cdot 0,076}{4})}{75} = 0,0232 \text{ m} \quad (2.12)$$

$$S_{j4} = \frac{\pi \cdot (D_1 - h_d - h_{jr})}{Q} = \frac{\pi \cdot (0,65 - 0,0395 - 0,076)}{75} = 0,0224 \text{ m} \quad (2.13)$$

[3]

2.2 Výpočet tepelných odporů

Velikost izolace mezi vodičem a stěnou drážky

$$\delta_{iz} = \frac{b_d - b_v}{2} = \frac{13 - 10}{2} = 1,5 \text{ mm} = 0,0015 \text{ m} \quad (2.14)$$

Velikost izolace mezi vodičem a vzduchovou mezerou

$$\delta_{iz}' = \delta_{iz} + h_1 + \text{izolace pod klínem} = 1,5 + 3,8 + 0,5 = 5,8 \text{ mm} = 0,0058 \text{ m} \quad (2.15)$$

Součet vzduchových vrstviček mezi vrstvami izolace

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

Obvod izolace uvnitř drážky

$$O_{iz} = 2 \cdot h_2 + b_d = 2 \cdot 35 + 13 = 83 \text{ mm} = 0,0083 \text{ m} \quad (2.16)$$

Měrná tepelná vodivost izolace

$$\lambda_{iz} = 0,3 \text{ W/}^\circ\text{C}\cdot\text{m}$$

Měrná tepelná vodivost vzduchu pro 20°C

$$\lambda_{vzd} = 0,026 \text{ W/}^\circ\text{C}\cdot\text{m}$$

Měrná tepelná vodivost plechového svazku ve směru plechů

$$\lambda_{Fel} = 40 \text{ W/}^\circ\text{C}\cdot\text{m}$$

Měrná tepelná vodivost plechového svazku v kolmém směru

$$\lambda_{Feq} = 1 \text{ W/}^\circ\text{C}\cdot\text{m}$$

Součinitel přestupu tepla ve vzduchové mezeře

$$\alpha_\delta = 125 \text{ W/}^\circ\text{C}\cdot\text{m}$$

Součinitel přestupu tepla v zubu radiálního ventilačního kanálu

$$\alpha_z = 105 \text{ W/}^\circ\text{C}\cdot\text{m}$$

Součinitel přestupu tepla ve jádře rotoru radiálního ventilačního kanálu

$$\alpha_j = 85 \text{ W/}^\circ\text{C}\cdot\text{m}$$

Součinitel přestupu tepla na vnitřním poloměru jádra rotoru radiálního ventilačního kanálu

$$\alpha_4 = 75 \text{ W/}^\circ\text{C}\cdot\text{m}$$

Rozteč radiálních ventilačních kanálů

$$s_t = s_p + b_k = 0,046 + 0,01 = 0,056 \text{ m} \quad (2.17)$$

Výška zubu

$$h_z = h_d = 0,0395 \text{ m}$$

Velikost tepelného odporu z vinutí do ventilačního kanálu

$$R_1 = \frac{\delta_{iz}}{\lambda_{iz} \cdot O_{iz} \cdot \frac{b_k}{2}} + \frac{\delta_{vzd}}{\lambda_{vzd} \cdot O_{iz} \cdot \frac{b_k}{2}} + \frac{1}{\alpha_z \cdot O_{iz} \cdot \frac{b_k}{2}} = \frac{0,0015}{0,3 \cdot 0,083 \cdot \frac{0,01}{2}} + \frac{0,0001}{0,026 \cdot 0,083 \cdot \frac{0,01}{2}} + \frac{1}{105 \cdot 0,083 \cdot \frac{0,01}{2}} =$$

$$44,26 \text{ } ^\circ\text{C/W} \quad (2.18)$$

Velikost tepelného odporu z vinutí do vzduchové mezery

$$R_2 = \frac{\delta_{iz'}}{\lambda_{iz} \cdot b_d \cdot \frac{s_t}{2}} + \frac{\delta_{vzd}}{\lambda_{vzd} \cdot b_d \cdot \frac{s_t}{2}} + \frac{1}{\alpha_\delta \cdot b_d \cdot \frac{s_t}{2}} = \frac{0,0058}{0,3 \cdot 0,013 \cdot \frac{0,056}{2}} + \frac{0,0001}{0,026 \cdot 0,013 \cdot \frac{0,056}{2}} + \frac{1}{125 \cdot 0,013 \cdot \frac{0,056}{2}} =$$

$$85,66 \text{ } ^\circ\text{C/W} \quad (2.19)$$

Velikost tepelného odporu z vinutí do zubu

$$R_3 = \frac{\delta_{iz}}{\lambda_{iz} \cdot O_{iz} \cdot \frac{s_p}{2}} + \frac{\delta_{vzd}}{\lambda_{vzd} \cdot O_{iz} \cdot \frac{s_p}{2}} + \frac{\frac{S_{z3}}{2}}{3 \cdot \lambda_{Fe1} \cdot O_{iz} \cdot \frac{s_p}{2}} =$$

$$\frac{0,0015}{0,3 \cdot 0,083 \cdot \frac{0,046}{2}} + \frac{0,0001}{0,026 \cdot 0,083 \cdot \frac{0,046}{2}} + \frac{\frac{0,0134}{2}}{3 \cdot 40 \cdot 0,083 \cdot \frac{0,046}{2}} = 4,66 \text{ } ^\circ\text{C/W} \quad (2.20)$$

Velikost tepelného odporu ze zubu do vzduchové mezery

$$R_4 = \frac{\frac{h_z}{2}}{3 \cdot \lambda_{Fe1} \cdot S_{z2} \cdot \frac{s_p}{2}} + \frac{1}{\alpha_\delta \cdot S_{z1} \cdot \frac{s_p}{2}} = \frac{\frac{0,0395}{2}}{3 \cdot 40 \cdot 0,0138 \cdot \frac{0,046}{2}} + \frac{1}{125 \cdot 0,0142 \cdot \frac{0,046}{2}} = 25,01 \text{ } ^\circ\text{C/W} \quad (2.21)$$

Velikost tepelného odporu ze zubu do ventilačního kanálu

$$R_5 = \frac{\frac{s_p}{2}}{3 \cdot \lambda_{Feq} \cdot S_{z3} \cdot h_z} + \frac{1}{\alpha_z \cdot S_{z3} \cdot h_z} = \frac{\frac{0,046}{2}}{3 \cdot 1 \cdot 0,0134 \cdot 0,0395} + \frac{1}{105 \cdot 0,0134 \cdot 0,0395} = 32,48 \text{ } ^\circ\text{C/W} \quad (2.22)$$

Velikost tepelného odporu z plechů zubu do plechů jádra

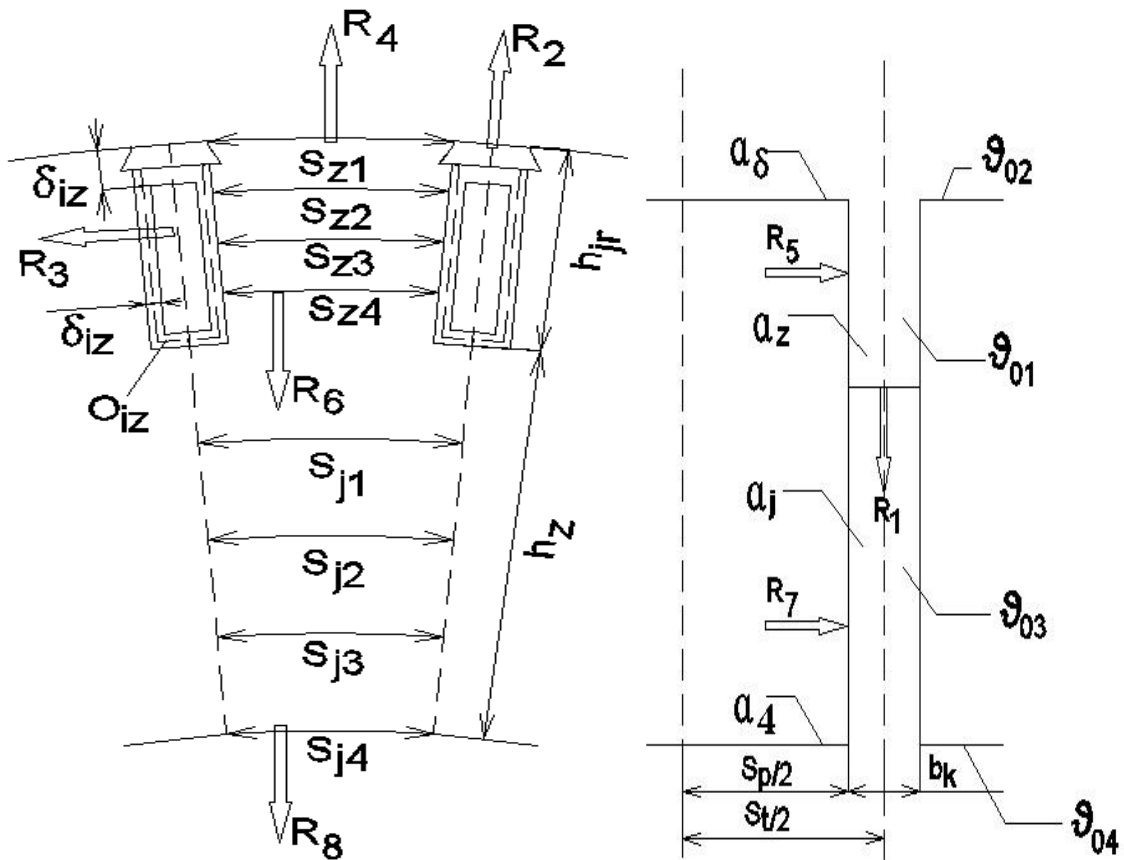
$$R_6 = \frac{\frac{h_z}{2}}{3 \cdot \lambda_{Fe1} \cdot S_{z4} \cdot \frac{s_p}{2}} + \frac{\frac{h_{jr}}{2}}{3 \cdot \lambda_{Fe1} \cdot S_{j1} \cdot \frac{s_p}{2}} = \frac{\frac{0,0395}{2}}{3 \cdot 40 \cdot 0,013 \cdot \frac{0,046}{2}} + \frac{\frac{0,076}{2}}{3 \cdot 40 \cdot 0,0248 \cdot \frac{0,046}{2}} = 1,11 \text{ } ^\circ\text{C/W} \quad (2.23)$$

Velikost tepelného odporu z plechů jádra do ventilačního kanálu

$$R_7 = \frac{\frac{s_p}{2}}{3 \cdot \lambda_{Feq} \cdot S_{j2} \cdot h_{jr}} + \frac{1}{\alpha_j \cdot S_{j2} \cdot h_{jr}} = \frac{\frac{0,046}{2}}{3 \cdot 1 \cdot 0,024 \cdot 0,076} + \frac{1}{85 \cdot 0,024 \cdot 0,076} = 10,65 \text{ } ^\circ\text{C/W} \quad (2.24)$$

Velikost tepelného odporu z plechů jádra do vnitřního poloměru jádra rotoru

$$R_8 = \frac{\frac{h_{jr}}{2}}{3 \cdot \lambda_{Fe1} \cdot S_{j3} \cdot \frac{s_p}{2}} + \frac{1}{\alpha_4 \cdot S_{j4} \cdot \frac{s_p}{2}} = \frac{\frac{0,076}{2}}{3 \cdot 40 \cdot 0,0232 \cdot \frac{0,046}{2}} + \frac{1}{75 \cdot 0,0224 \cdot \frac{0,046}{2}} = 26,47 \text{ } ^\circ\text{C/W} \quad (2.25)$$



Obrázek 2.1. - Vymezený úsek stroje

[3]

2.3 Určení okolních teplot vymezeného úseku

Měrná tepelná kapacita vzduchu

$$c_v = 1250 \text{ Ws/m}^3\text{°C}$$

Celkové průtočné množství chladiva při ohřevu o 20 °C

- od celkových ztrát je nutno odečíst ztráty v ložiskách, ve které průtočným množstvím chladiva nechládíme

$$Q = \frac{\Delta P - \frac{1}{2}\Delta P_{fl}}{c_v \cdot \Delta \theta} = \frac{54\,872 - 5000}{1250 \cdot 20} = 1,99 \text{ m}^3/\text{s} \quad (2.26)$$

Celkové průtočné množství chladiva se dělí mezi průtočné množství chladiva okolo čel a průtočné množství chladiva přes vzduchovou mezeru do rotoru stroje.

Průtočné množství chladiva proudící okolo čel vinutí

$$Q_{\zeta} = \frac{1}{3} \cdot Q = \frac{1}{3} \cdot 1,96 = 0,66 \text{ m}^3/\text{s} \quad (2.27)$$

Průtočné množství chladiva přes vzduchovou mezeru do rotoru

$$Q_r = \frac{2}{3} \cdot Q = \frac{2}{3} \cdot 1,96 = 1,33 \text{ m}^3/\text{s} \quad (2.28)$$

Teplota vzduchu vstupujícího do stroje

$$\vartheta_0 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$$

Oteplení chladiva ve vzduchové mezeře

$$\vartheta_{02} = 0 \text{ }^\circ\text{C} \quad (2.29)$$

Oteplení chladiva v okolí zubu kanálu

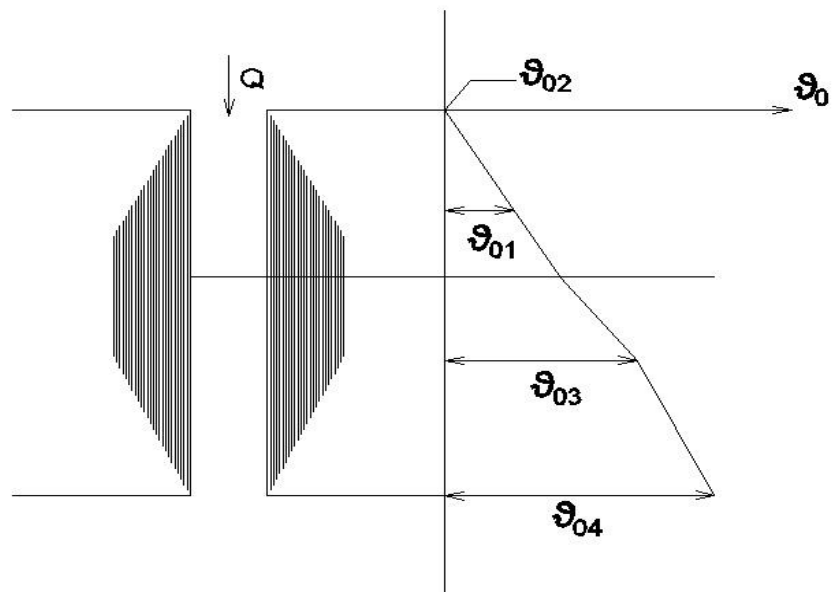
$$\vartheta_{01} = \vartheta_{02} + \frac{\Delta P_{\text{Fez}} + \Delta P_{\text{cud}}}{2 \cdot c_v \cdot Q_r} = 0 + \frac{1945 + 5471}{2 \cdot 1250 \cdot 1,33} = 2,2 \text{ }^\circ\text{C} \quad (2.30)$$

Oteplení chladiva v okolí jádra indultu kanálu

$$\vartheta_{03} = \vartheta_{02} + \frac{\Delta P_{\text{Fez}} + \Delta P_{\text{cud}} + \frac{1}{2} \Delta P_{\text{Fej}}}{c_v \cdot Q_r} = 0 + \frac{1945 + 5471 + \frac{1}{2} \cdot 4968}{1250 \cdot 1,33} = 6 \text{ }^\circ\text{C} \quad (2.31)$$

Oteplení chladiva vystupujícího z kanálu

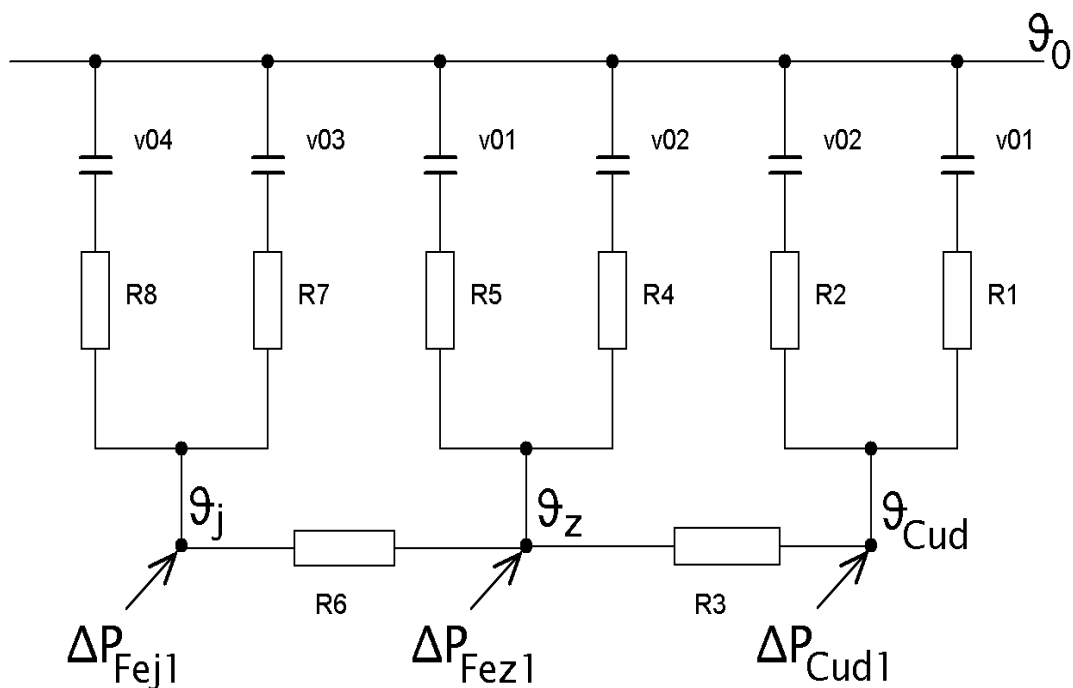
$$\vartheta_{04} = \vartheta_{02} + \frac{\Delta P_{\text{Fez}} + \Delta P_{\text{cud}} + \Delta P_{\text{Fej}}}{c_v \cdot Q_r} = 0 + \frac{1945 + 5471 + 4968}{1250 \cdot 1,33} = 7,4 \text{ }^\circ\text{C} \quad (2.32)$$



2.2. – Průběh teploty v radiálním kanálu

[3]

2.4 Sestavení a řešení náhradního tepelného obvodu oblasti



2.3. - Náhradní schéma tepelného obvodu vymezeného úseku

Ze schéma náhradního tepelného obvodu sestavíme za použití metody uzlových napětí tři navzájem nezávislé rovnice. Z těchto rovnic potom určíme oteplení a výslednou teplotu uzlů ϑ_{cud} , ϑ_z a ϑ_j .

$$\frac{\vartheta_{\text{cud}} - \vartheta_{01}}{R_1} + \frac{\vartheta_{\text{cud}} - \vartheta_{02}}{R_2} + \frac{\vartheta_{\text{cud}} - \vartheta_z}{R_3} = \Delta P_{\text{cud}1} \quad (2.33)$$

$$\frac{\vartheta_z - \vartheta_{\text{cud}}}{R_3} + \frac{\vartheta_z - \vartheta_{02}}{R_4} + \frac{\vartheta_z - \vartheta_{01}}{R_5} + \frac{\vartheta_z - \vartheta_j}{R_6} = \Delta P_{\text{Fez}1} \quad (2.34)$$

$$\frac{\vartheta_j - \vartheta_z}{R_6} + \frac{\vartheta_j - \vartheta_{03}}{R_7} + \frac{\vartheta_j - \vartheta_{04}}{R_8} = \Delta P_{\text{Fej}1} \quad (2.35)$$

Po dosazení do rovnic získáváme:

$$\frac{\vartheta_{\text{cud}} - 42,1}{44,26} + \frac{\vartheta_{\text{cud}} - 40}{85,66} + \frac{\vartheta_{\text{cud}} - \vartheta_z}{4,66} = 7,3 \quad (2.36)$$

$$\frac{\vartheta_z - \vartheta_{\text{cud}}}{4,66} + \frac{\vartheta_z - 40}{25,01} + \frac{\vartheta_z - 42,1}{32,48} + \frac{\vartheta_z - \vartheta_j}{1,11} = 2,6 \quad (2.37)$$

$$\frac{\vartheta_j - \vartheta_z}{1,11} + \frac{\vartheta_j - 45,7}{10,65} + \frac{\vartheta_j - 47,1}{26,47} = 6,6 \quad (2.38)$$

Po úpravě dostaneme oteplení:

$$\Delta\vartheta_{\text{cud}} = 91,6 \text{ }^\circ\text{C} \quad (2.39)$$

$$\Delta\vartheta_z = 72 \text{ }^\circ\text{C} \quad (2.40)$$

$$\Delta\vartheta_j = 70 \text{ }^\circ\text{C} \quad (2.41)$$

Z hodnot oteplení pak vypočteme výslednou teplotu uzlů:

$$\vartheta_{\text{cud}} = \Delta\vartheta_{\text{cud}} + \vartheta_0 = 91,6 + 40 = 131,6 \text{ }^\circ\text{C} \quad (2.42)$$

$$\vartheta_z = \Delta\vartheta_z + \vartheta_0 = 72 + 40 = 112 \text{ }^\circ\text{C} \quad (2.43)$$

$$\vartheta_j = \Delta\vartheta_j + \vartheta_0 = 70 + 40 = 110 \text{ }^\circ\text{C} \quad (2.44)$$

[3]

3 Závěr:

Úkolem mojí diplomové práce bylo provést návrh stejnosměrného stroje derivačním buzením dle zadaných parametrů. Návrh byl proveden pro motor o činném výkonu $P = 600 \text{ kW}$, o jmenovitých otáčkách $n=1800 \text{ ot/min}$, určený pro napájení ze sítě o jmenovitém napětí $U=400\text{V}$.

Jako první jsem provedl celkový elektromagnetický návrh stroje. Mnou navržený motor je šestipólový, s průměrem rotoru (indultu) $D_1=0,65\text{m}$, o celkové délce rotorového svazku $l=0,27\text{m}$. Vzhledem k zadanému činnému výkonu a malému napájecímu napětí motoru, prochází kotvou poměrně velký proud $I=1614\text{A}$, který nám pak dále ovlivnil rotorové vinutí. Vinutí je navrženo jako dvouvrstvé, tyčové, vlnové, tvořené třemi paralelními vodiči, umístěné v 75 drážkách po obvodu rotoru. Během návrhu se objevil problém s volbou počtu vodičů v drážce n_d . Počet vodičů v drážce se s ohledem na požadavek dostatečného počtu cívkových stran v drážce volí u stejnosměrných strojů vždy větší než jedna. Pokud by počet vodičů v drážce vycházel roven jedné, potom by při použití, u stejnosměrných strojů výhradně používaného, dvouvrstvého tyčového vinutí, byl stejný počet cívek rotorového vinutí jako lamel komutátoru, což by vedlo k velmi širokým kartáčům a lamelám komutátoru. To by znamenalo vysoké mezilamelové napětí, které by způsobilo výrazné zhoršení komutace a tím i velké jiskření kartáčů. Pro mnou navržený stroje vychází počet vodičů v drážce roven čtyřem. Dalším typickým znakem stejnosměrných motorů je přítomnost komutátoru. Komutátor navrženého stroje má průměr $D_k=0,488 \text{ m}$, délku $l_k= 0,223\text{m}$ a je složen ze 150 lamel. Velikost vzduchové mezery stroje je $\delta=4\text{mm}$. Dále jsem provedl návrh magnetického obvodu, ze kterého jsem vypočetl magnetizační charakteristiku naprázdno. Z této charakteristiky jsem poté určil potřebné magnetomotorické napětí budícího vinutí pod hlavním pólem $F_b = 4259\text{A}$. Pro lepší průběh magnetického pole ve vzduchové mezeře jsem stroj opatřil kompenzačním vinutím, jež potlačuje pole reakce kotvy pod hlavním pólem, a pomocnými póly, které kompenzují pole reakce kotvy v neutrální ose mezi hlavními póly a zároveň pomáhají k lepší komutaci cívkou indultu. Na závěr elektromagnetického výpočtu jsem stanovil ztráty a účinnost stroje. Vzhledem k již zmíněnému velkému proudu kotvy vycházejí výrazně největší Jouleovy ztráty

v rotoru $\Delta P_{ja} = 16\,151$ W. Tyto ztráty tak mají největší vliv na poměrně nízkou účinnost stroje, jež vychází pouze 91,6 %.

Po dokončení elektromagnetického výpočtu stroje jsem provedl orientační tepelný výpočet induktu stroje. Pro tepelný výpočet jsem použil metodu náhradních tepelných obvodů. Oteplení, které nám po výpočtu konečných hodnot oteplení induktu vychází, je nepatrně větší, než je dovolené oteplení u uvažované izolace třídy B ([1], str. 48), a ve stroji by se proto musela použít izolace třídy F. Jelikož je však výpočet oteplení induktu proveden pouze orientačně a kompletní ventilační výpočet stroje je nad rámec této práce, nejsou tedy známy přesné tepelné poměry na jednotlivých částech induktu. Tak se může stát, že se skutečné hodnoty jednotlivých součinitelů přestupu tepla α budou lišit od námi stanovených hodnot.

Na závěr práce jsem nakreslil schématický příčný a podélný řez stroje.

Mnou navržený stejnosměrný stroj může být dále upravován a zdokonalován. Například by bylo možné na základě přesného ventilačního výpočtu provést konstrukční změny ve stroji, které by vedly k lepšímu odvodu tepla od kritických částí a tím k zlepšení chlazení celého stroje.

4 Použitá literatura

Knihy a publikace

[1] KOPYLOV, Igor Petrovič. Stavba elektrických strojů. 1. vyd. Praha: SNTL, 1988. 688 s.

[2] CIGÁNEK, Ladislav. Stavba elektrických strojů. 1. vyd. Praha: SNTL, 1958. 714 s.

Elektronické zdroje

[3] Přednášky předmětu SES1,2 [online]. 2013 [cit. 10. 4. 2013] Dostupné z:

http://portal.zcu.cz/wps/portal/!ut/p/c5/04_SB8K8xLLM9MSSzPy8xBz9CP0os3hvH1clF2cLEwMDI1BLA08Dfy9nXxc3QwN_I_1wkA6zeGd3Rw8Tcx8DA3dzl1MDIz_TYCNfzxADA09jiLwBDuBooO_nkZ-bql-QnZ3m6KioCADyuoy7/dl3/d3/L3dDb0EvUU5RTGtBISEvWUZSdndBISEvNI83T1FHM1BEMjBHSTI3MDI1MIROUUtEMTAwMA!!/

5 Přílohy

Příloha č.1: Rozměry měděných pásů

Příloha č.2: Graf k určení Carterova činitele respektující vliv drážkování

Příloha č.3: Závislost $B = f(H)$ dynamového plechu 0,5mm, Et 2,6

Příloha č.4: Závislost $B = f(H)$ pro konstrukční ocel

Příloha č.5: Nomograf pro určení skutečné indukce v zubové vrstvě indultu

Příloha č.6: Magnetizační tabulka zubové vrstvy

Příloha č.7: Magnetizační tabulka celého magnetického obvodu

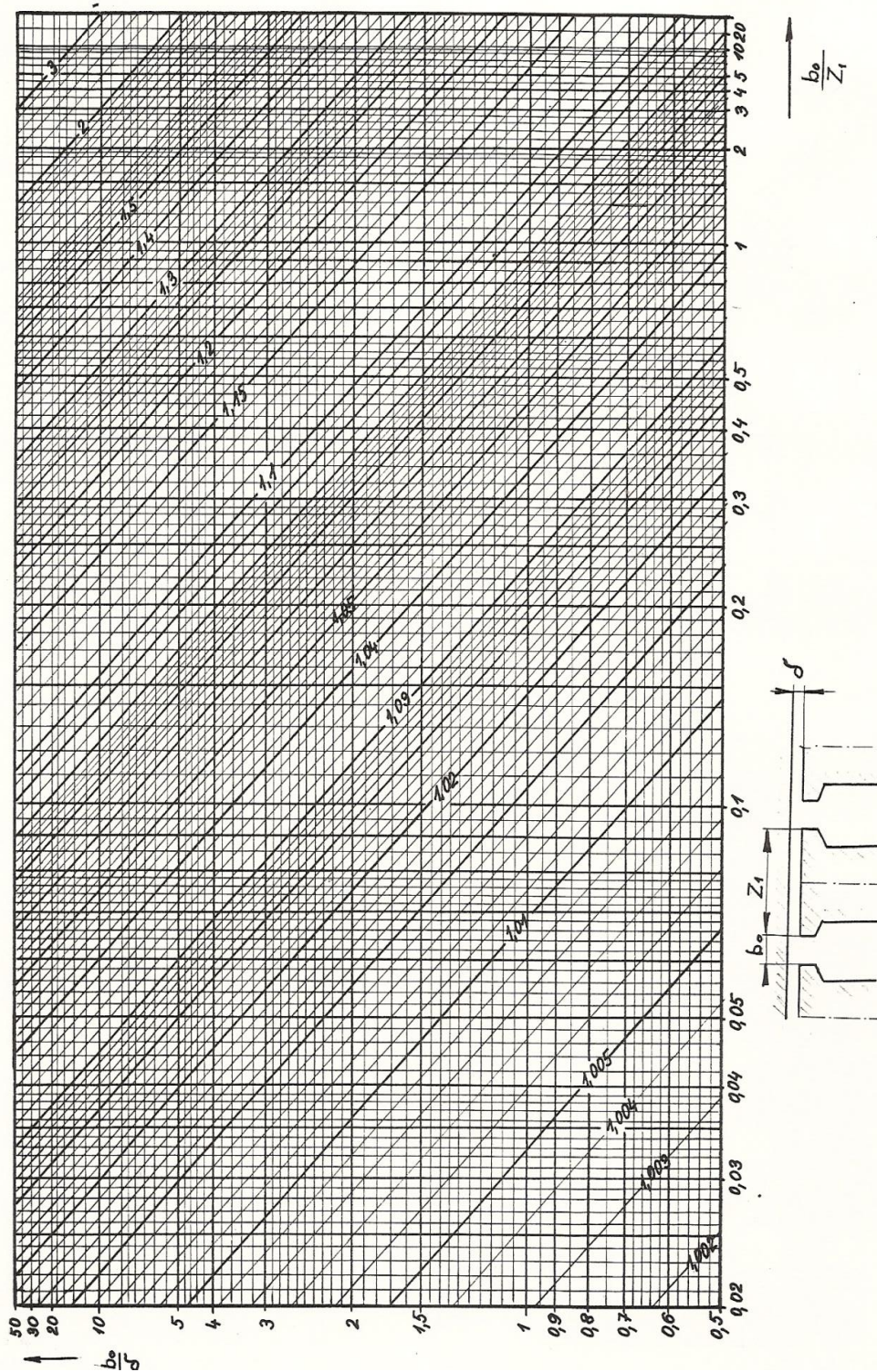
Příloha č.8: Magnetizační charakteristika naprázdno

Příloha č.9: Příčný řez stroje

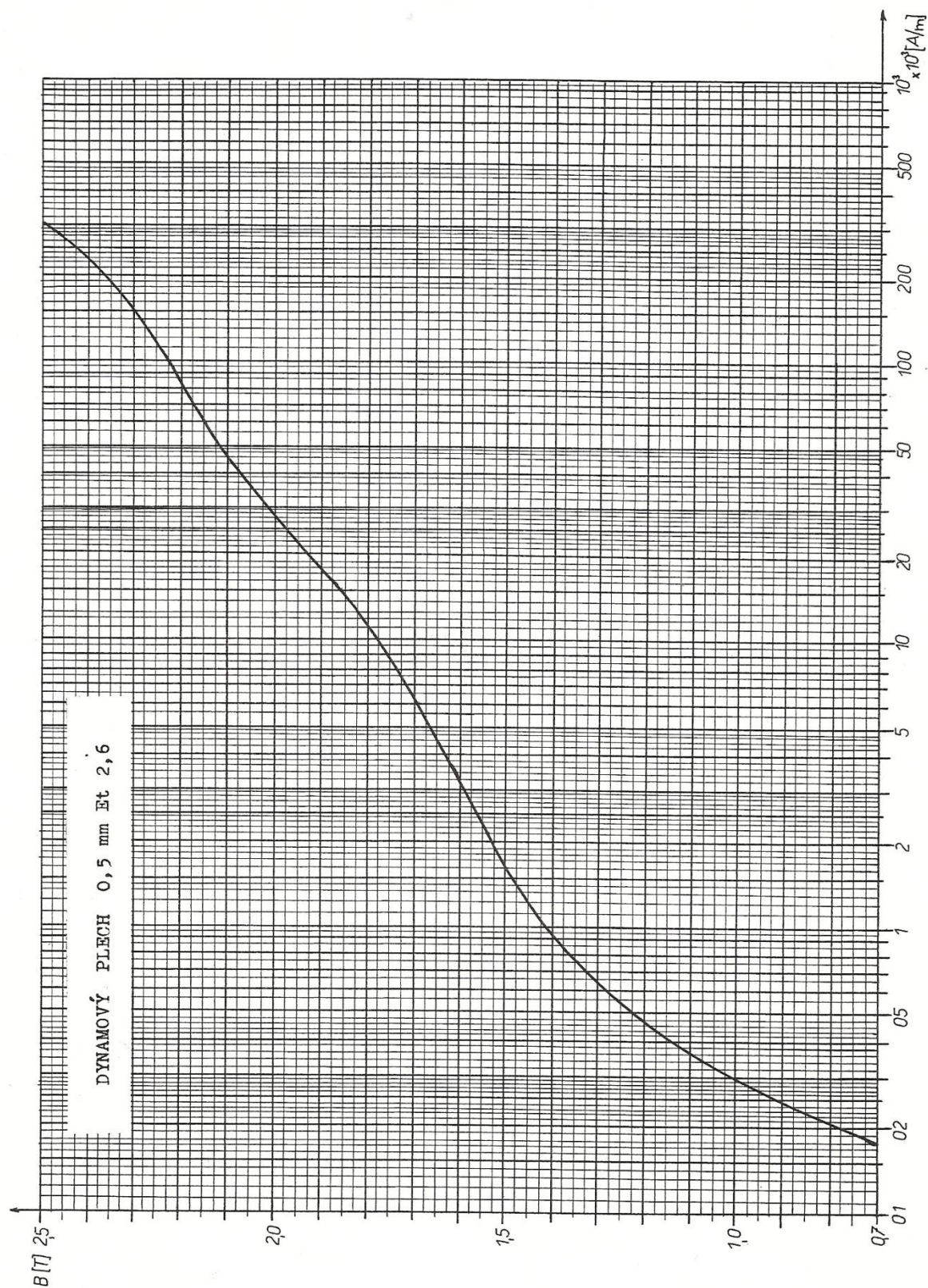
Příloha č.10: Podélný řez stroje

Příloha č.2:

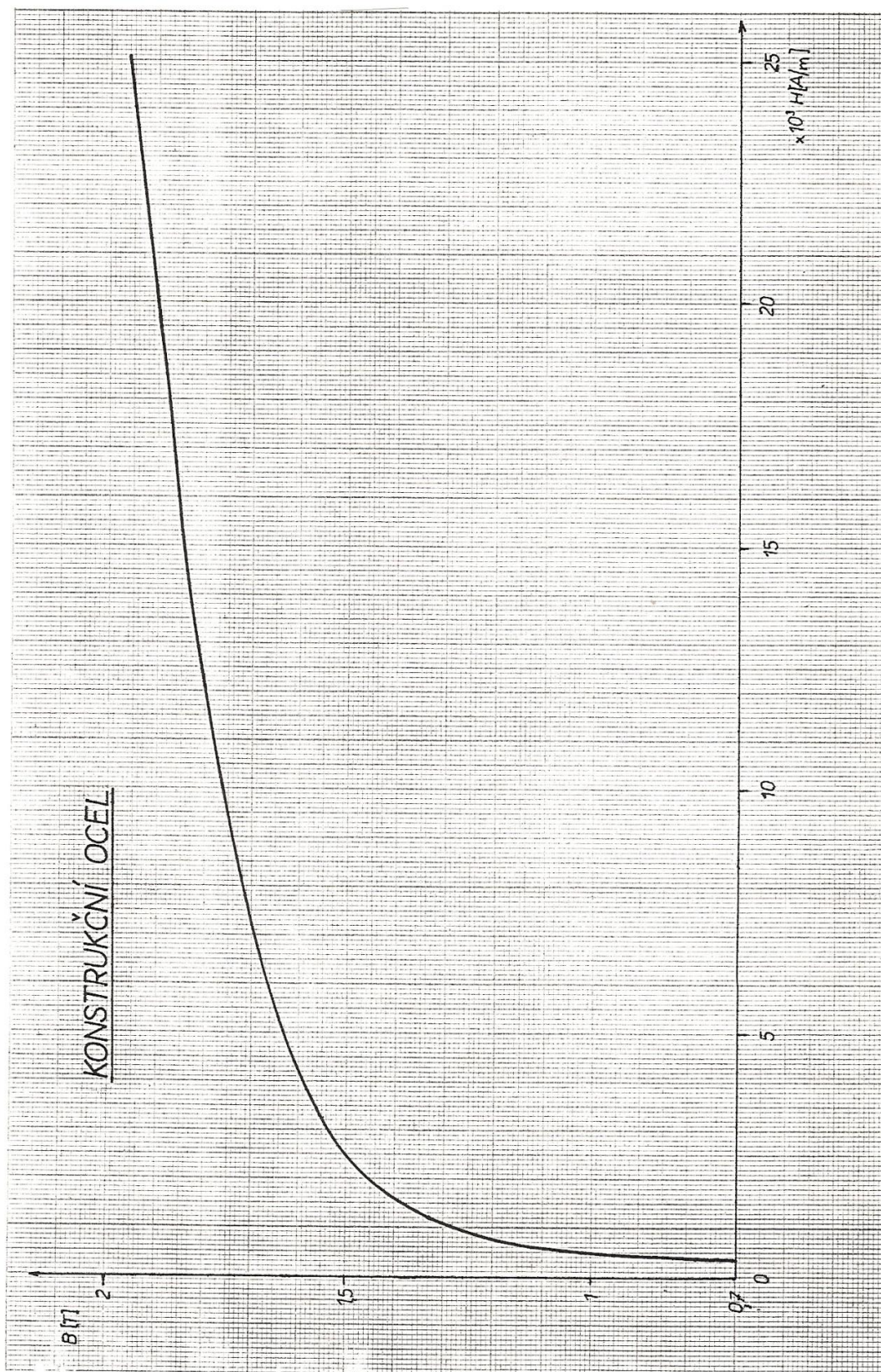
CARTERŮV ČINITEL NA DRÁŽKOVÁNÍ



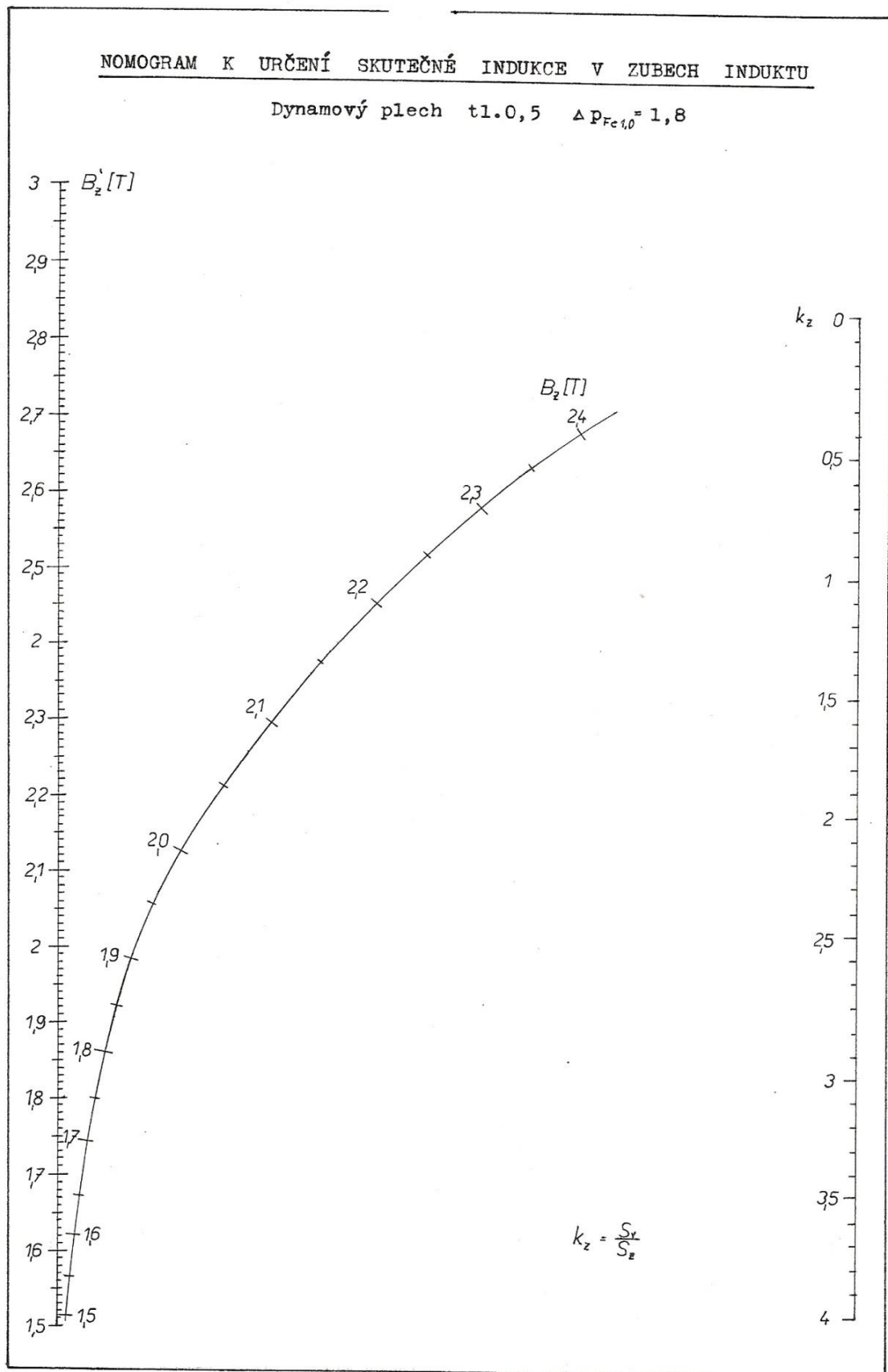
Příloha č.3:



Příloha č. 4:



Příloha č. 5:



Příloha č.6:

Magnetizační charakteristika zubové vrstvy:

D1	D1=650m	td1=27,23	z1=14,23	kz1=1,06	B'z1=1,77	Bz1=1,76	Hz1=9000	Hzstr=14917	Fz=589
D1-hd	D2=610,5m	td2=25,57	z2=12,57	kz2=1,19	B'z2=1,88	Bz2=1,85	Hz2=14500		
D1-2hd	D3=571m	td3=23,92	z3=10,92	kz3=1,36	B'z3=2,03	Bz3=1,96	Hz3=22500		
	i=1,2,3								
k1=0,8	+ stator	$td_i = \frac{\pi \cdot D_i}{Q}$ $z_i = id_i - b_d$ $k_{zi} = \frac{id_i}{z_i \cdot k_{Fe}} - 1$		k1.φ	B'z1=1,42 B'z2=1,5 B'z3=1,62	Bz1=1,42 Bz2=1,5 Bz3=1,62	Hz1=1000 Hz2=1600 Hz3=2150	Hzstr=1592	Fz=63
k2=1,15	- rotor	$B'z_i = \frac{B_g \cdot id_i}{z_i \cdot k_{Fe}}$ $Hz_{zv} = \frac{Hz_1 + 4 \cdot Hz_2 + Hz_3}{6}$ $Fz = Hz_{zv} \cdot hd$		k2.φ	B'z1=2,04 B'z2=2,16 B'z3=2,33	Bz1=1,97 Bz2=2,05 Bz3=2,13	Hz1=23000 Hz2=35000 Hz3=53000	Hzstr=36000	Fz=1422
K3=1,3				k3.φ	B'z1=2,3 B'z2=2,44 B'z3=2,64	Bz1=2,14 Bz2=2,18 Bz3=2,25	Hz1=55000 Hz2=74000 Hz3=115000	Hzstr=77667	Fz=3068

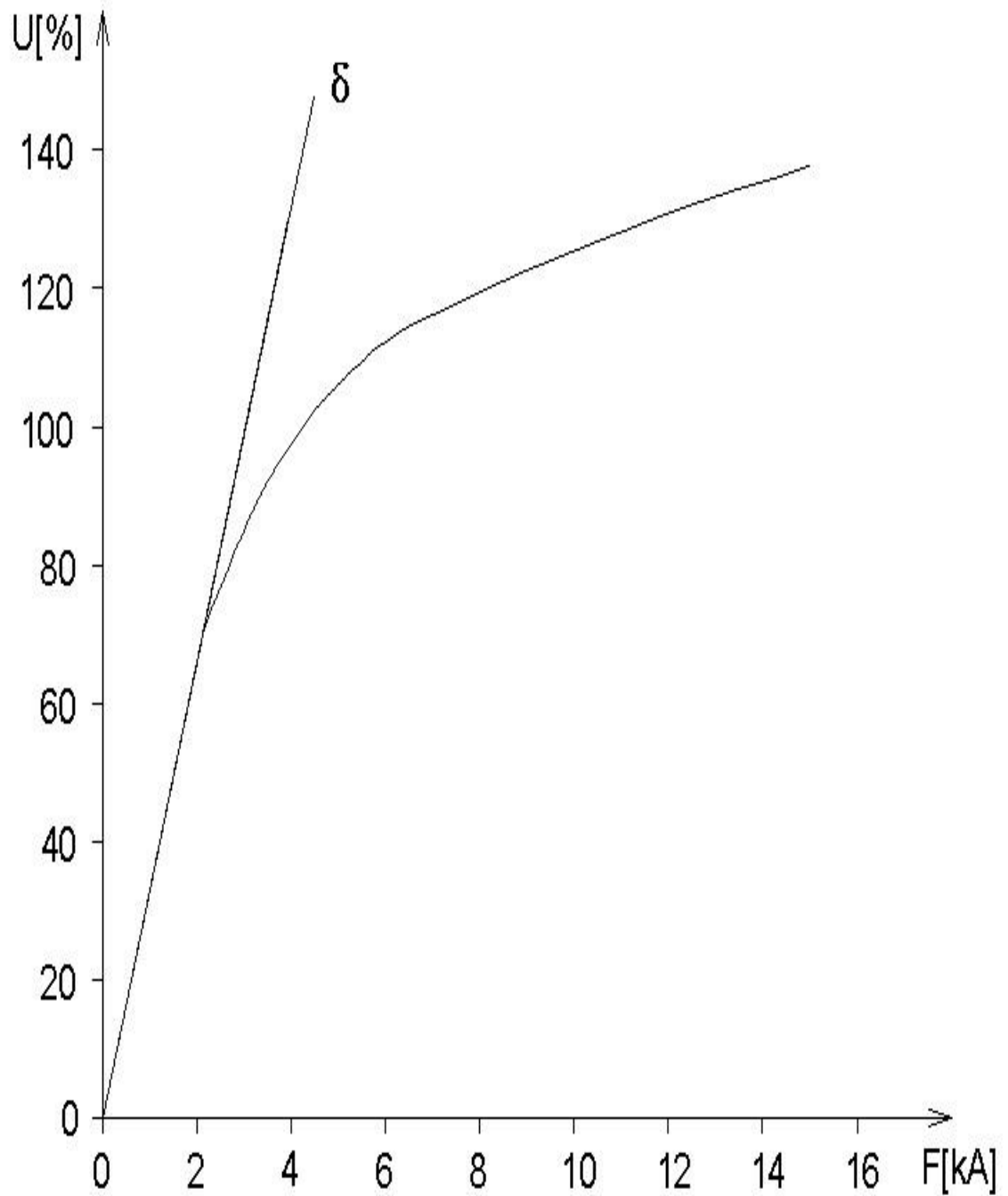
Příloha č.7:

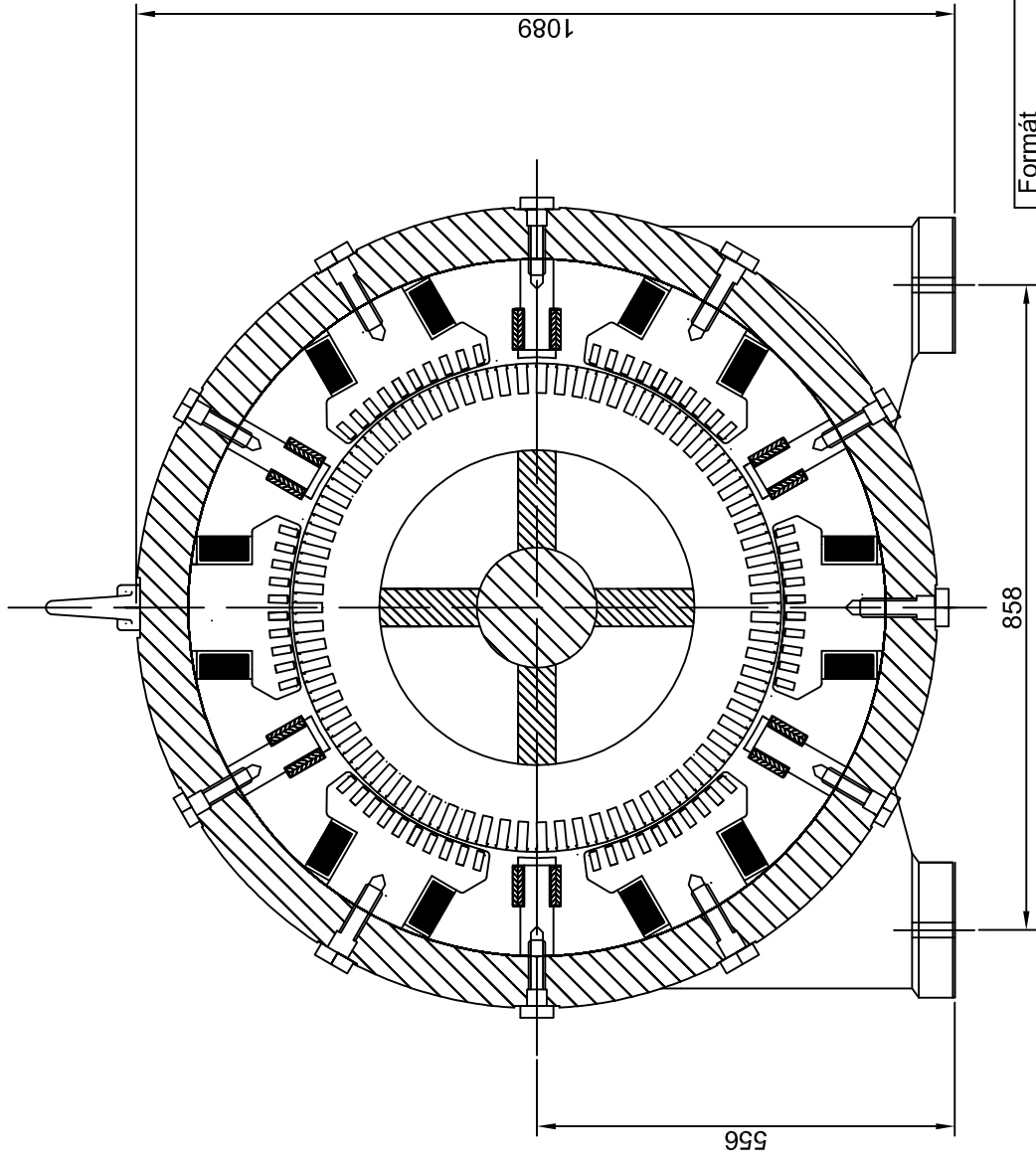
Magnetizační charakteristika celého magnetického obvodu

	Φ			$0,8 \cdot \Phi$			$1,15 \cdot \Phi$			$1,3 \cdot \Phi$		
	B	H	F	B	H	F	B	H	F	B	H	F
Vzd. mezera $\delta = 0,004$	0,86		3027			2422			3481			3935
Hlava	B_{z1}	1,77		1,42	1000		2,04	23000		2,3	55000	
	B_{z1}	1,76		1,42			1,97			2,14		
Střed	B_{z2}	1,88		1,5	1600		2,16	35000		2,44	74000	
	B_{z2}	1,85		1,5			2,05			2,18		
Pata	B_{z3}	2,03		1,62	2150		2,33	53000		2,64	115000	
	B_{z3}	1,96		1,62			2,13			2,25		
Stř. hodnota			589		1592	63		36000	1422		77667	3068
Jádro induktu	1,3	630	69	1,04	320	35	1,495	1600	176	1,69	6000	660
$\sum F = F_e + F_z + F_{\beta}$		3685			2520			5079			7663	
Pól	1,55	3250	429	1,24	700	92	1,78	10000	1320	2	27100	3577
Jho	1,1	600	145	0,88	400	96	1,265	950	229	1,43	1800	434
$\sum F = F_y + F_j$		574			188			1549			4011	
$\sum F = F_e + F_z + F_{\beta} + F_y + F_j$		4259			2708			6628			11674	

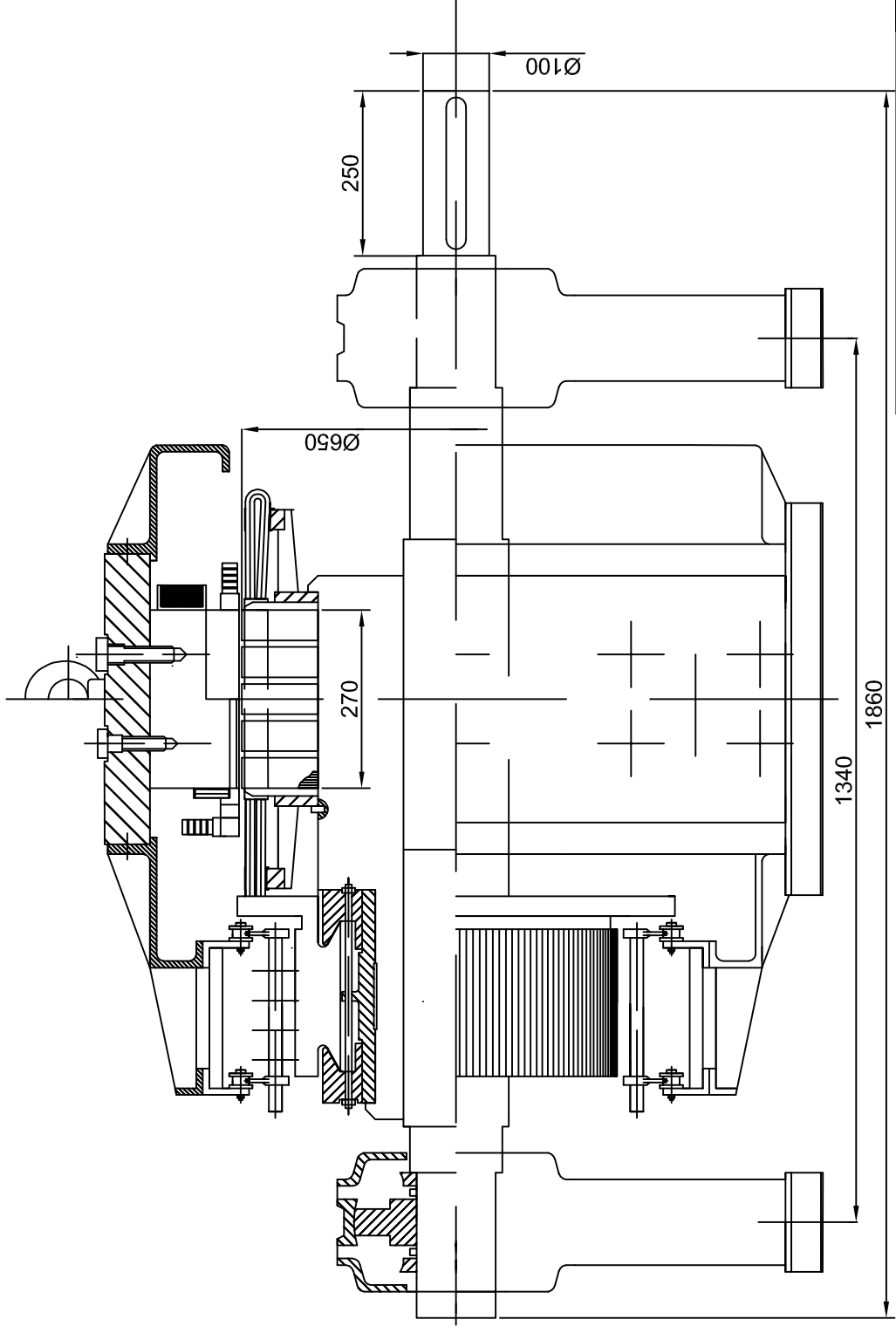
Příloha č.8:

Magnetizační charakteristika naprázdno





Formát	A4	Název	Příčný řez stroje
Vypracoval	Bc. Karel Houška	Číslo přílohy	9
Měřítko	1:10		
Datum vydání	20.4.2013		



Formát	A4	Název	Podélný řez stroje
Vypracoval	Bc. Karel Houška	Číslo přílohy	10
Měřítiko	1:10		
Datum vydání	20.4.2013		