



Fakulta elektrotechnická
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Návrh stejnosměrného stroje

Autor práce: Bc. Lukáš Mergl
Vedoucí práce: Doc. Ing. Josef Červený, Ph.D. CSC.

Plzeň 2016

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Bc. Lukáš MERGL
Osobní číslo: E14N0149P
Studijní program: N2612 Elektrotechnika a informatika
Studijní obor: Průmyslová elektronika a elektromechanika
Název tématu: Návrh stejnosměrného stroje
Zadávající katedra: Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Zásady pro vypracování:

1. Navrhněte stejnosměrný motor se sériovým buzením o parametrech: $P = 120\text{kW}$, $U = 440\text{ V}$, $n = 1400\text{ ot/min}$, IP22, IM101
2. Nakreslete schématický podélný a příčný řez stroje.
3. Metodou náhradních tepelných obvodů proveďte výpočet oteplení induktu v ustáleném stavu.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:

1. I.P. Kopylov: Stavba elektrických strojů.
2. L. Cigánek: Stavba elektrických strojů.
3. J.Červený: Stavba elektrických strojů, portál ZČU, Courseware 2012.

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

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2015**
Termín odevzdání diplomové práce: **16. května 2016**


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




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na elektromagnetický výpočet stejnosměrného stroje se sériovým buzením. Dále vypočtený stroj rozkreslit v podélném a příčném řezu v programu AutoCAD. A jako poslední část je uveden výpočet oteplení stroje.

Klíčová slova

stejnsměrný motor, sériové buzení, elektromagnetický návrh, budící póly, pomocné póly, komutátor, kompenzační vinutí, oteplení stroje

Abstract

The master thesis presents an electromagnetic design of a direct current series excited machine. There are drawings of longitudinal and cross section made in AutoCAD. And last part is dedicated to calculation heat up of the machine.

Keywords

direct current motor, series excitation, electromagnetic design, excitation poles, auxiliary poles, commutator, compensating winding, machine heat up

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem svou závěrečnou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 270 trestního zákona č. 40/2009 Sb.

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

V Plzni dne 15. května 2016

Bc. Lukáš Mergl

.....

Podpis

Obsah

Úvod	5
1 Návrh stejnosměrného stroje	6
1.1 Zadání	6
1.2 Výpočet základních parametrů	6
1.3 Návrh vinutí	8
1.4 Délka čela	11
1.5 Návrh magnetického obvodu	12
1.6 Návrh budící cívky	14
1.7 Návrh kompenzačního vinutí	14
1.8 Návrh pomocných pólů	15
1.9 Návrh komutátoru	16
1.10 Návrh kartáčů	17
1.11 Orientační oteplení hlavního pólu	17
1.12 Ztráty	18
2 Oteplení	20
2.1 Střední rychlost proudění vzduchu v radiálním kanálu	20
2.2 Ztráty v uvažovaných úsecích (tekoucích do uzlů)	20
2.3 Určení okolních teplot vymezeného úseku	21
2.4 Tepelné odpory	21
2.5 Soustavy rovnic pro řešení ustáleného stavu	24
2.6 Oteplení čel	25
Závěr	27
Použitá literatura	28
Přílohy	29
A Výkresy	29
A.1 Příčný řez	29
A.2 Podélný řez	30

A.3	Drážky	31
B	Ostatní	32
B.1	Doporučené rozměry kartáčů	32
B.2	Rozměry pasových vodičů	33
B.3	Carterův činitel	34
B.4	Skutečná indukce v zubu	35
B.5	Magnetizační charakteristika dynamového plechu	36
B.6	Určení konstant	37
B.7	Charakteristika naprázdno	38

Seznam symbolů a zkratek

- A ... obvodová proudová hustota
 a_{pp} ... přesahující část pólového nástavce
 a_{kv} ... počet paralelních větví kompenzačního vinutí
 B_{jr} ... magnetická indukce ve jhu rotoru
 B_{δ} ... magnetická indukce ve vzduchové mezeře pod hlavním pólem
 $B_{\delta k}$... magnetická indukce ve vzduchové mezeře pod pomocným pólem
 b ... šířka drážky
 b_p ... šířka hlavního pólu
 b_k ... šířka komutačního pásma
 b_{kp} ... šířka komutačního pólu
 b_{vbc} ... šířka vodiče budící cívky
 $b_{z\frac{1}{3}}$... šířka zubu v jeho $\frac{1}{3}$
 C ... Essonův činitel magnetického využití
 D ... zadaný průměr stroje
 D_i ... vnitřní průměr plechů rotoru
 D_k ... průměr komutátoru
 E ... elektromotorická síla kotvy
 F_r ... magnetomotorická síla reakce kotvy
 F'_{kv} ... magnetomotorická síla reakce kotvy pod pólem
 F_{kv} ... skutečná magnetomotorická síla reakce kotvy pod pólem
 $F_{\delta k}$... magnetické napětí pro vzduchovou mezeru pod pomocným pólem
 f ... kmitočet proudu v rotoru
 f_k ... koeficient tření na komutátoru
 h ... hloubka drážky
 h_{vbp} ... výška vodiče budící cívky
 h_{jr} ... výška jha rotoru
 h_{js} ... výška průřezu kostry statoru
 I_1 ... proud v rotoru
 I_{kv} ... proud ve vodiči kompenzačního vinutí
 I_s ... proud na sadu kartáčů
 IM ... zadané rozložení stroje
 IP ... zadané krytí stroje

- K ... počet lamel komutátoru
 k_c ... Carterův činitel pro vzduchovou mezeru
 L ... celková délka železa (i s radiálními kanály)
 L_e ... efektivní délka železa
 l_{cbc} ... vnější obvod budící cívky
 $l_{\check{c}}$... délka čela v rotoru
 N_b ... počet závitů cívky
 N_{ck} ... počet závitů pólu komutační cívky
 N_s ... počet závitů v sérii v rotoru
 n_d ... počet vodičů v jedné drážce
 n_{kv} ... počet vodičů v drážce kompenzačního vinutí
 O_{bc} ... ochlazovací povrch budící cívky
 $O_{\check{c}}$... ochlazovací povrch čela cívky v rotoru
 P ... zadaný příkon stroje
 P_{Cu1} ... z grafu odečtené ztráty v rotoru
 P_{Cu2} ... z grafu odečtené ztráty ve statoru
 p ... počet pólpárů
 p_k ... přítlačná síla uhlíků na komutátor
 m_{Fe} ... hmotnost zubů
 N_k ... počet kartáčů v sadě
 n ... zadané otáčky stroje
 Q ... počet drážek v rotoru
 Q_{kv} ... počet drážek kompenzačního vinutí
 Q_p ... počet drážek na pól
 Q_{rv} ... střední rychlost proudění v radiálním kanálu
 Q_{r1} ... množství chladiwa na jeden kanál a drážkovou rozteč
 R'_1 ... elektrický odpor odpor v mědi rotoru dle odečtených hodnot z grafu
 R'_2 ... elektrický odpor vinutí hlavního pólu dle odečtených hodnot z grafu
 R_1 ... tepelný odpor z vinutí do ventilačního kanálu
 R_2 ... tepelný odpor z vinutí do vzduchové mezery
 R_3 ... tepelný odpor z vinutí do zubu
 R_4 ... tepelný odpor ze zubu do vzduchové mezery
 R_5 ... tepelný odpor ze zubu do ventilačního kanálu
 R_6 ... tepelný odpor z plechů zubu do plechů jádra
 R_7 ... tepelný odpor z plechů jádra do ventilačního kanálu
 R_8 ... tepelný odpor z plechů jádra do vzduchové mezery
 $R_{\check{c}}$... tepelný odpor čela cívky v rotoru
 S ... průřez vodiče v rotoru
 S_b ... průřez vodiče budící cívky
 S_k ... celkový průřez kartáčů v sadě

S_{kv} ··· průřez vodiče kompenzačního vinutí
 S_{pp} ··· průřez vodiče cívký pomocného pólu
 t_3 ··· rozteč drážek rotoru u vzduchové mezery
 $t_{\frac{1}{3}}$ ··· rozteč drážek rotoru v $\frac{1}{3}$ od kořene zubu
 t_{d1} ··· drážková rozteč na rotoru
 t_k ··· rozteč lamel na komutátoru
 U ··· zadané napětí stroje
 u ··· počet vodičů v jedné drážce
 v_k ··· obvodová rychlost komutátoru
 v_{kj} ··· střední rychlost proudění chladiva v prostoru jádra
 v_{kz} ··· střední rychlost proudění chladiva v prostoru zubů

α ··· pólové krytí
 β ··· počet lamel krytých jedním kartáčem
 δ ··· velikost vzduchové mezery
 δ_k ··· velikost vzduchové mezery pod pomocným pólem
 δ_{ppp} ··· velikost mezery vytvořené nemagnetickými plechy pro ovlivnění pomocných pólů
 ΔP_{Cub} ··· Jouleovy ztráty v budící cívce
 $\Delta P_{Cuč}$ ··· Jouleovy ztráty v čelech rotoru
 ΔP_{Cud1} ··· ztráty pro výpočet oteplení vznikající ve vinutí
 ΔP_{Cukv} ··· Jouleovy ztráty v kompenzačním vinutí
 ΔP_{Cupp} ··· Jouleovy ztráty ve vinutí pomocných pólů
 ΔP_{Cur} ··· Jouleovy ztráty v rotoru
 $\Delta P_{\check{c}}$ ··· Jouleovy ztráty v čelech rotoru
 $\Delta P_{\check{c}}$ ··· ztráty pro výpočet oteplení vznikající v čelech rotoru
 ΔP_{Fe} ··· celkové ztráty v železe
 ΔP_{Fejr} ··· ztráty v železe ve jhu rotoru
 ΔP_{Fej1} ··· ztráty pro výpočet oteplení vznikající ve jhu rotoru
 ΔP_{Fez} ··· ztráty v železe v zubech
 ΔP_{Fez1} ··· ztráty pro výpočet oteplení vznikající v zubech rotoru
 ΔP_k ··· ztráty na komutátoru vlivem přechodu
 ΔP_m ··· mechanické ztráty
 ΔP_{mk} ··· mechanické ztráty vzniklé třením komutátoru
 ΔP_{pov} ··· povrchové ztráty
 ΔP_{pp} ··· přídatné ztráty
 ΔP_{rv} ··· ztráty odváděné rotorovou větví
 ΔP ··· součet ztrát
 η ··· účinnost

- η' ··· předpokládaná účinnost stroje odečtená z grafu
- λ_d ··· rozptylová vodivost drážky
- λ_ξ ··· rozptylová vodivost čel
- λ_z ··· rozptylová vodivost mezi zuby
- v_ξ ··· oteplení mědi v čelech na rotoru
- v_{Cud} ··· oteplení mědi rotoru
- v_j ··· oteplení jha rotoru
- v_z ··· oteplení zubu v rotoru
- v_{01} ··· oteplení chladiwa v okolí jádra rotoru
- v_{02} ··· oteplení chladiwa vstupujícího do kanálu
- v_{03} ··· oteplení chladiwa v okolí zubu kanálu
- v_{04} ··· oteplení chladiwa vystupujícího z kanálu
- ξ ··· rozptylové číslo
- σ_k ··· proudová hustota v kartáčích
- τ_p ··· pólová rozteč
- ϕ ··· magnetický tok hlavního pólu
- ϕ_k ··· magnetický tok komutačního pólu

Úvod

Předmětem této diplomové práce je návrh stejnosměrného motoru se sériovým buzením a jeho tepelný výpočet. V příloze této práce jsou přiloženy nákresy podélného a příčného řezu stroje a také řezy drážek.

Stejnoseměrné stroje jsou nejstarší točivé elektrické stroje. Používaly se jako generátory, kdy přeměňovaly mechanickou energii na elektrickou, mohou pracovat i jako motory, kdy je přeměna energie opačná. S rozvojem výkonové elektroniky byly dříve velice hojně užívané stejnosměrné stroje, které byly vytlačeny do ústraní a dnes je jejich použití velmi malé (např. regulované pohony a to v obráběcích strojích).

Důvod postupné výměny stejnosměrných strojů za pohony s asynchronními pohony je z důvodu složitosti stejnosměrných strojů, kdy tuto hlavní složitost představuje komutátor a uhlíky, které zprostředkovávají kluzný kontakt. A také nutnosti údržby, která u asynchronního stroje s klecí nakrátko téměř odpadá.

Konstrukční uspořádání:

Stator není složen z plechů, ale je z kusu železa. Ke jhu jsou připevněny hlavní póly, na kterých je budící vinutí. Póly jsou tvořeny z vlastního těla pólu a pólového nástavce (rozšíření pólu v prostoru vzduchové mezery). V tomto stroji je v pólovém nástavci umístěno i kompenzační vinutí, které kompenzuje vliv reakce kotvy. Dále se mezi hlavní póly ke jhu statoru připevňují pomocné póly, které kompenzují reaktanční napětí naindukované do právě komutující cívk. Jak kompenzační vinutí tak vinutí pomocných pólů je zapojeno do série s hlavním vinutím hlavního pólu.

Rotor (kotva) je složen ze vzájemně odizolovaných plechů, ve kterých jsou vyraženy drážky, ve kterých je uloženo vinutí rotoru. Jednotlivé cívk jsou přivedeny na komutátor, kde jsou připojeny k měděným lamelám komutátoru, které jsou vzájemně odizolovány. Na jednotlivé lamely dosedají kartáče, kterými se přivádí proud do rotoru.

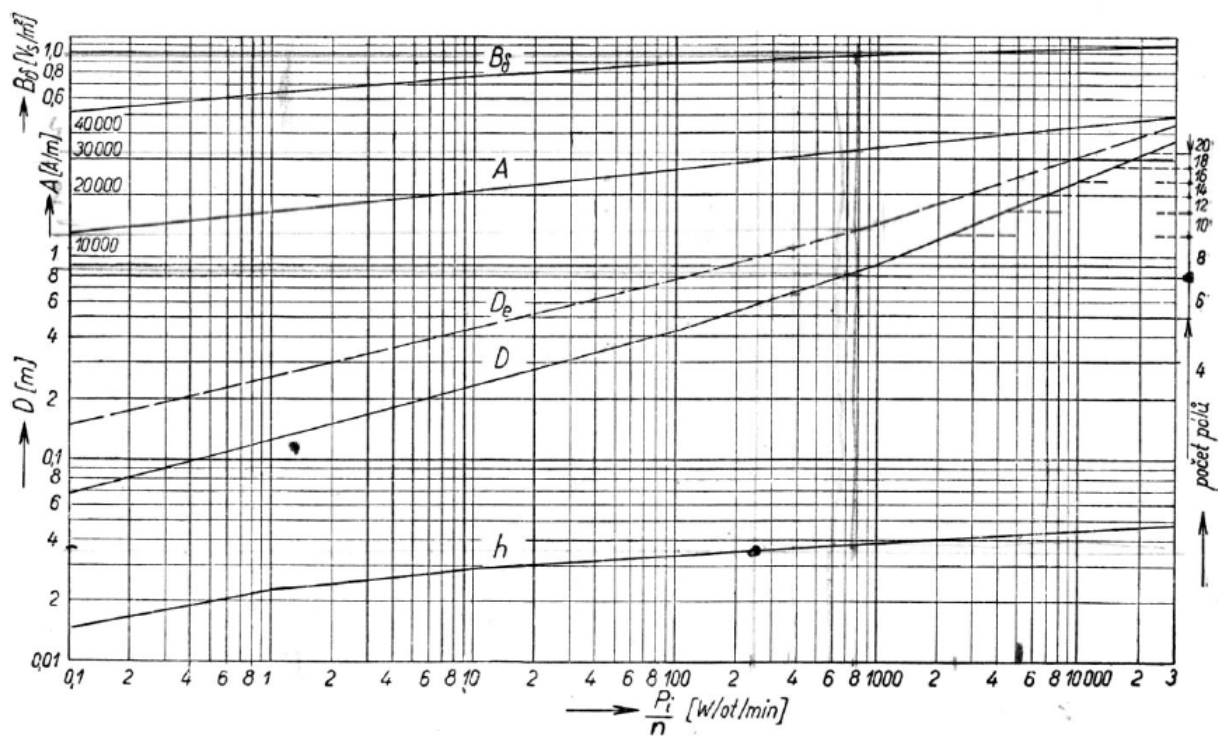
Dle IP jsou větrací otvory na spodní polovině stroje a dle IM bude stroj provozován v horizontální poloze.

1 Návrh stejnosměrného stroje

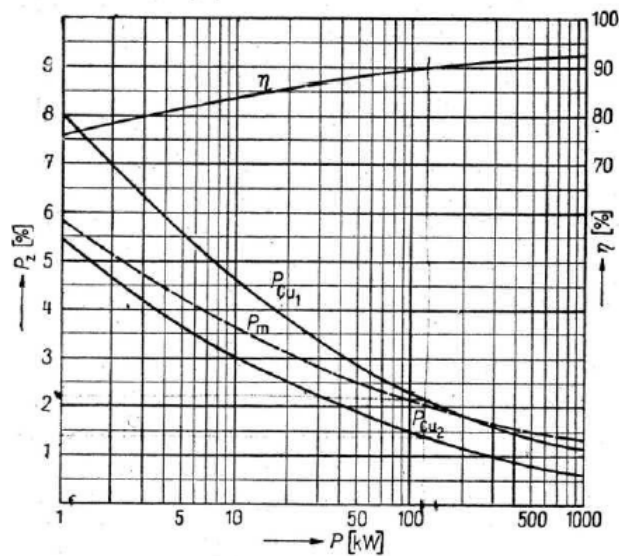
1.1 Zadání

$P = 120 \text{ kW}$
 $U = 440 \text{ V}$
 $n = 1400 \frac{\text{ot}}{\text{min}}$
 $IP = 22$
 $IM = 101$
 sériové buzení

1.2 Výpočet základních parametrů



Obrázek 1.1: Graf rozměrů a využití stroje [1]



Obrázek 1.2: Graf účinností a ztrát stejnosměrného stroje [1]

Odečteno z grafu

$$B_{\delta} = 0,8T$$

$$A = 25400 \frac{A}{m}$$

$$D = 0,37m$$

$$p = 2$$

$$\eta' = 90\%$$

$$P_{Cu1} = 2,3\%$$

$$P_{Cu2} = 1,4\%$$

$$P_m = 2\%$$

Vnitřní výkon kotvy na otáčku

$$\frac{P}{\eta' \cdot n} = \frac{120\,000}{0,90 \cdot 1400} = 95,24 \frac{W}{ot} \quad (1.1)$$

Essonův činitel elektromagnetického využití, volím činitel pólového krytí $\alpha = 0,65$

$$C = \frac{\pi^2}{60} \cdot A \cdot B_{\delta} \cdot \alpha = \frac{\pi^2}{60} \cdot 25\,400 \cdot 0,8 \cdot 0,65 = 2,172 \frac{kW}{m^3 \frac{ot}{min}} \quad (1.2)$$

Proud v kotvě

$$I_1 = \frac{P}{U} = \frac{120\,000}{440} = 272,73A \quad (1.3)$$

Počet závitů v sérii

$$N_s = \frac{\pi \cdot D \cdot A}{2 \cdot I_1} = \frac{\pi \cdot 0,37 \cdot 25\,400}{2 \cdot 272,73} = 54 \quad (1.4)$$

Volba počtu drážek

pro průměr $D = 0,37$ m je doporučený počet drážek $Q = 54$

Drážková rozteč

$$td_1 = \frac{\pi \cdot D}{Q} = \frac{\pi \cdot 0,37}{54} = 0,02153 \text{ m} \quad (1.5)$$

Počet vodičů v jedné drážce

$$n_d = \frac{4 \cdot a \cdot N_s}{Q} = \frac{4 \cdot 2 \cdot 54}{54} = 8 \quad (1.6)$$

Volím počet vodičů v jedné drážce: $n_d = 8$

1.3 Návrh vinutí

zvoleno tyčové vinutí:

$$2u = 8 ; n_d = 8 ; 2p = 4$$

Počet lamel

$$K = Q \cdot u = 54 \cdot 4 = 216 \quad (1.7)$$

Počet drážek na pól

$$Q_p = \frac{Q}{2p} = \frac{54}{4} = 13,5 \quad (1.8)$$

Ztráty v mědi kotvy jsou z grafu 2,3 %

$$P_{Cu1} = 0,023 \cdot \frac{P}{\eta} = 0,023 \cdot \frac{120\,000}{0,9} = 3066,67 \text{ W} \quad (1.9)$$

Odpor kotvy

$$R'_1 = \frac{P_{Cu1}}{I_1^2} = \frac{3066,67}{272,73^2} = 41 \text{ m}\Omega \quad (1.10)$$

Ztráty v mědi magnetů jsou z grafu 1,4 %

$$P_{Cu2} = 0,014 \cdot \frac{P}{\eta} = 0,014 \cdot \frac{120\,000}{0,9} = 1866,67 \text{ W} \quad (1.11)$$

Odpor sériových magnetů %

$$R'_2 = \frac{P_{Cu2}}{I_1^2} = \frac{1866,67}{272,73^2} = 25,1 \text{ m}\Omega \quad (1.12)$$

Celkový odpor

$$R = R'_1 + R'_2 = 41 + 25,1 = 66,1 \text{ m}\Omega \quad (1.13)$$

Elektromotorická síla kotvy

$$E = U - R \cdot I_1 = 440 - 66,1 \cdot 10^{-3} \cdot 272,73 = 422,25 \text{ V} \quad (1.14)$$

Magnetický tok jednoho pólu

$$\phi = \frac{E}{4 \cdot f \cdot N_s} = \frac{422,25}{4 \cdot 46,67 \cdot 62,2} = 0,0418 \text{ Wb} \quad (1.15)$$

Kmitočet střídavého proudu

$$f = \frac{p \cdot n}{60} = \frac{2 \cdot 2}{60} = 46,67 \text{ Hz} \quad (1.16)$$

Pólová rozteč

$$\tau_p = \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot p} = \frac{\pi \cdot 0,37}{4} = 0,29 \text{ m} \quad (1.17)$$

Efektivní délka železa

$$L_e = \frac{P}{C \cdot D^2 \cdot n} = \frac{120}{2,172 \cdot 0,37^2 \cdot 1400} = 0,288 \text{ m} \quad (1.18)$$

Železo se rozdělí na 6 svazků plechů, 5 kanálů po 10mm.

Kontrola magnetického toku

$$\phi = B_\delta \cdot t_p \cdot \alpha \cdot L_e = 0,8 \cdot 0,29 \cdot 0,65 \cdot 0,282 = 0,0425 \text{ Wb} \quad (1.19)$$

Což je hodnota podobná $\phi = 0,0418 \text{ Wb}$, tedy magnetický tok je spočten správně.

Celková délka železa

$$L = L_e + n_k \cdot b_k = 0,282 + 5 \cdot 0,01 = 0,332 \text{ m} \quad (1.20)$$

Pólové krytí

$$\alpha = 0,65 \text{ pro stroje s pomocnými póly}$$

Průřez vodiče

Proudovou hustotu volím 5 A/mm^2

$$S = \frac{I}{2a \cdot \sigma} = \frac{272,73}{4 \cdot 5} = 13,63 \text{ mm}^2 \quad (1.21)$$

Rozteč drážek ve vzduchové mezeře

$$t_3 = \frac{\pi \cdot D}{Q} = \frac{\pi \cdot 0,37}{54} = 21,53 \text{ mm} \quad (1.22)$$

Šířka zubu v $\frac{1}{3}$

$$b_{z\frac{1}{3}} = t_3 \frac{B_\delta}{0,9 \cdot B_{\frac{1}{3}}} = 0,02153 \cdot \frac{0,8}{0,9 \cdot 2} = 9,57 \text{ mm} \quad (1.23)$$

Rozteč v $\frac{1}{3}$ od kořene zubu je

$$t_{\frac{1}{3}} = \frac{\pi(D - \frac{4}{3}h)}{Q} = \frac{\pi(0,37 - \frac{4}{3} \cdot 0,038)}{54} = 21,5 \text{ mm} \quad (1.24)$$

Možná šířka drážky

$$b = t_{\frac{1}{3}} - b_{z\frac{1}{3}} = 21,5 - 9,57 = 11,93 \text{ mm} \quad (1.25)$$

Jedná se o drážku typu N, a dle tabulek volím šířku drážky $b = 10,5 \text{ mm}$.

Šířka izolací v drážce:

izolace drážky: $2 \cdot 0,2 = 0,4 \text{ mm}$

izolace vrstvy: $2 \cdot 0,5 = 1 \text{ mm}$

izolace vodičů: $8 \cdot 0,4 = 3,2 \text{ mm}$

vůle na šířku: $0,3 \text{ mm}$

celkem: $4,9 \text{ mm}$

Na vodiče zbývá

$$11,5 - 4,9 = 6,6 \text{ mm}$$

Volím pásový vodič o rozměrech $1,4 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ (4x)

Výška izolací v drážce:

izolace drážky: $2 \cdot 0,2 = 0,4 \text{ mm}$

izolace vrstvy: $4 \cdot 0,5 = 2 \text{ mm}$

izolace vodičů: $4 \cdot 0,4 = 1,6 \text{ mm}$

vložka mezi vrstvy: 2 mm

vůle na dno: $0,5 \text{ mm}$

vůle pod klín: $0,5 \text{ mm}$

klín: $3,7 \text{ mm}$

celkem: $10,7 \text{ mm}$

Konečné rozměry drážky

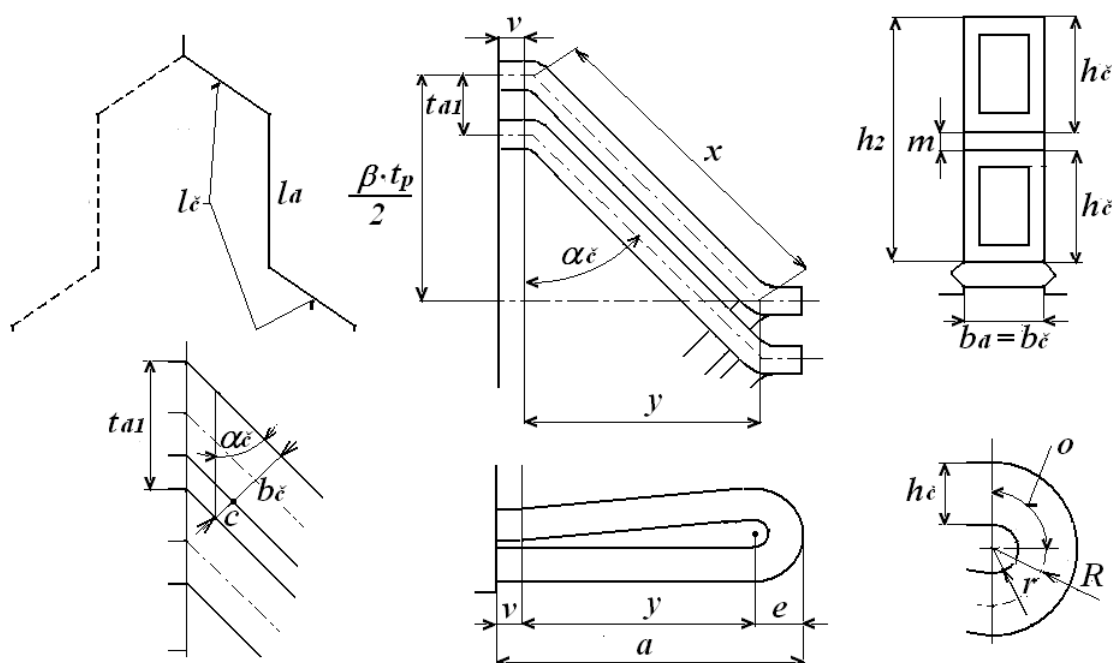
šířka:

$$b = 4,9 + 4 \cdot 1,4 = 10,5 \text{ mm}$$

výška:

$$h = 10,7 + 2 \cdot 10 = 30,7 \text{ mm}$$

1.4 Délka čela



Obrázek 1.3: Rozměry části čel

volím výběh čela z plechového svazku rotoru $v = 20 \text{ mm}$

Výška čela

$$h_\epsilon = h_v + 2 \cdot h_{iz} = 10 + 2 \cdot 0,4 = 10,8 \text{ mm} \quad (1.26)$$

Střední poloměr oka

$$R = r + \frac{h_\epsilon}{2} = 5 + \frac{10,8}{2} = 10,4 \text{ mm} \quad (1.27)$$

vzdálenost mezi čely volím $c = 3 \text{ mm}$

šířku čela volím jako šířku drážky $\check{s}_\epsilon = \check{s}_d = 10,5 \text{ mm}$

Úhel sklonu čel

$$\sin\alpha_{\zeta} = \frac{b_{\zeta} + c}{t_{d1}} = \frac{10,5 + 3}{21,53} = 0,627 \Rightarrow \alpha_{\zeta} = 39^{\circ} \quad (1.28)$$

Délka šroubovice tvořící část čela

$$x = \frac{t_p}{2\cos\alpha_{\zeta}} = \frac{0,29}{2 \cdot \cos(39^{\circ})} = 0,18658 = 186,6 \text{ mm} \quad (1.29)$$

Délka oka

$$o = \frac{\pi \cdot R}{2} = \frac{\pi \cdot 10,4}{2} = 16,34 \text{ mm} \quad (1.30)$$

Délka čela

$$l_{\zeta} = 2 \cdot (v + x + o) = 2 \cdot (20 + 186,6 + 16,34) = 445,88 \Rightarrow 446 \text{ mm} \quad (1.31)$$

1.5 Návrh magnetického obvodu**Výška jha kotvy**

Jho rotoru se sytí $B_{jr} = 1,3 \text{ T}$, jelikož se jedná o stroj s komutačními póly.

$$h_{jr} = \frac{\Phi}{2L_e \cdot 0,9B_{jr}} = \frac{0,0424}{2 \cdot 0,288 \cdot 0,9 \cdot 1,3} = 62,92 \text{ mm} \quad (1.32)$$

Vnitřní průměr plechů

$$D_i = D - 2h - 2h_{jr} = 370 - 2 \cdot 31,2 - 2 \cdot 62,92 = 181,8 \text{ mm} \quad (1.33)$$

Velikost vzduchové mezery

$$\delta = C \cdot 10^{-6} \cdot \tau_p \cdot \frac{A}{B_{\delta}} = 0,3 \cdot 10^{-6} \cdot 0,29 \frac{25400}{0,8} = 2,76 \doteq 3 \text{ mm} \quad (1.34)$$

Velikost vzduchové mezery pod komutačními póly

volím velikost vzduchové mezery $\delta_k = 5 \text{ mm}$

Délka hlavního pólu zvolena

$$L_p = L = 0,322 \text{ m} = 322 \text{ mm} \quad (1.35)$$

Šířka pólu

Rozptyl hlavního pólu odhadnut na 20 %. Indukce v pólu zvolena 1,55 T.

$$b_p = \frac{\phi(1+v)}{B_p \cdot L_p} = \frac{0,0424(1+0,20)}{1,55 \cdot 0,322} = 102 \text{ mm} \quad (1.36)$$

Výška průřezu kostry

Indukce ve jhu zvolena $B_{js} = 1,2 T$.

$$h_{js} = \frac{\phi(1 + v)}{2B_{js}(L_p + B_p)} = \frac{0,0424(1 + 0,20)}{2 \cdot 1,2 \cdot (0,322 + 0,114)} = 48,62 \doteq 49 \text{ mm} \quad (1.37)$$

Carterův činitel pro vzduchovou mezeru

$$k_c = \frac{t_3}{t_3 + \delta - 0,75b} = \frac{21,53}{21,53 + 3 - 0,75 \cdot 10,5} = 1,293 \quad (1.38)$$

Φ	0,0424	D_1	0,3700	t_{d1}	0,0215	z_1	0,0110	k_{z1}	1,12	B'_{z1}	1,70	B_{z1}	1,68	H_{z1}	5500	H_{st}	15000,00	F_z	435,00
		D_2	0,3410	t_{d2}	0,0198	z_2	0,0093	k_{z2}	1,31	B'_{z2}	1,85	B_{z2}	1,82	H_{z2}	14500				
		D_3	0,3120	t_{d3}	0,0182	z_3	0,0077	k_{z3}	1,58	B'_{z3}	2,06	B_{z3}	1,98	H_{z3}	26500				
$k1 \cdot \Phi$	0,0488	B'_{z1}	1,95	B_{z1}	1,91	H_{z1}	19500	H_{st}	34250,00	F_z	993,25								
		B'_{z2}	2,12	B_{z2}	2,03	H_{z2}	32000												
		B'_{z3}	2,37	B_{z3}	2,14	H_{z3}	58000												
$k2 \cdot \Phi$	0,0551	B'_{z1}	2,21	B_{z1}	2,08	H_{z1}	45000	H_{st}	68833,33	F_z	1996,17								
		B'_{z2}	2,40	B_{z2}	2,17	H_{z2}	67000												
		B'_{z3}	2,68	B_{z3}	2,25	H_{z3}	100000												

Tab.1. Magnetická charakteristika v zubové části rotoru

				Φ			$k1 \Phi$			$k2 \Phi$		
				B	H	F	B	H	F	B	H	F
Vzd. Mezera	0,003	m		0,8		2483			2855			3227
zuby	hlava	kz1	B'_{z1}	1,70	5500		1,95	19500		2,21	45000	
			B_{z1}	1,68			1,91			2,08		
	střed	kz2	B'_{z2}	1,85	14500		2,12	32000		2,40	67000	
			B_{z2}	1,82			2,03			2,17		
	pata	kz3	B'_{z3}	2,06	26500		2,37	58000		2,68	100000	
			B_{z3}	1,98			2,14			2,25		
stř hodn	hz	0,029		15000	435		34250	993		68833	1996	
jho rotoru	ljr	0,1339	1,30	640	86	1,50	1600	214	1,69	6200	830,24	
$\Sigma F = F\delta + Fz + Fjr$				3003			4062			6054		
Pól + Nástavec	lp	0,119	1,55	3200	381	1,78	11000	1309	2,02	28900	3439	
Jho statoru	ljs	0,114	1,10	500	57	1,27	1100	125	1,43	1900	217	
$\Sigma F = Fp + Fj$				438			1434			3656		
$\Sigma F = F\delta + Fz + Fji + Fp + Fj$				3441			5497			9709		

Tab.2. Charakteristika magnetického obvodu rotoru

1.6 Návrh budící cívky

Počet závitů cívky

$$N_b = \frac{F_b}{I} = \frac{3441}{272,73} = 12,61 = 13 \text{ závitů} \quad (1.39)$$

Průřez vodiče

proudovou hustotu v budící cívce volím $3,5 \text{ A/mm}^2$

$$S_b = \frac{I}{\sigma_b} = \frac{272,73}{3,5} = 77,92 \text{ mm}^2 \quad (1.40)$$

Volím vodič 3 x 25 mm.

1.7 Návrh kompenzačního vinutí

Reakce kotvy

$$F_r = \frac{1}{2} \cdot A \cdot t_p = \frac{1}{2} \cdot 25400 \cdot 0,29 = 3683 \text{ A} \quad (1.41)$$

Magnetomotorická síla reakce kotvy pod pólem

$$F'_{kv} = \alpha \cdot F_r = 0,65 \cdot 3683 = 2394 \text{ A} \quad (1.42)$$

Volím 14 drážek na pól $Q_{kv} = 14$, počet paralelních větví vinutí $2a_{kv} = 1$

Počet vodičů v drážce

$$n_{kv} = \frac{2 \cdot F'_{kv} \cdot 2a_{kv}}{I \cdot Q_{kv}} = \frac{2 \cdot 2394 \cdot 1}{272,73 \cdot 14} = 1,25 \text{ volím } 1 \quad (1.43)$$

Skutečná kompenzační magnetomotorická síla

$$F_{kv} = \frac{Q_{kv} \cdot I \cdot n_{kv}}{2 \cdot 2a_{kv}} = \frac{14 \cdot 272,73 \cdot 1}{2 \cdot 1} = 1909 \text{ A} \quad (1.44)$$

Poměr vykompenzování

$$\frac{F_{kv}}{F'_{kv}} \cdot 100 = \frac{1909}{2394} \cdot 100 = 80 \% \quad (1.45)$$

Návrh drážky kompenzačního vinutí

Proud vodičem kompenzačního vinutí

$$I_{kv} = \frac{I}{2a_{kv}} = \frac{272,73}{1} = 272,73 \text{ A} \quad (1.46)$$

Potřebný průřez vodiče kompenzačního vinutí

Volím proudovou hustotu 5 A/mm^2

$$S_{kv} = \frac{I_{kv}}{\sigma} = \frac{272,73}{5} = 54,5 \text{ mm}^2 \quad (1.47)$$

Volím vodič 3 x 19 mm.

1.8 Návrh pomocných pólů

Mezera mezi sousedními hlavními póly je

$$(1 - \alpha)t_p = (1 - 0,65) \cdot 0,29 = 101,5 \text{ mm} \quad (1.48)$$

Šířka komutačního pásma, $\beta = 2,5$

$$b_k = t'_1 \left(\beta - \frac{a}{p} + u - \Delta y \right) = 13,5 \left(2,5 - \frac{1}{2} + 2 + \frac{0,5}{13,5} \right) = 54,5 \text{ mm} \quad (1.49)$$

Šířka komutačního pásma je 0,537 této mezery, což je vhodné.

Rozptylová vodivost drážky

$$\lambda_d = 0,6 \cdot \frac{h_d}{\check{s}_d} = 0,6 \cdot \frac{29}{10,2} = 1,71 \quad (1.50)$$

Rozptylová vodivost čel

$$\lambda_c = \frac{l_{\check{c}}}{l_e} = \frac{0,435}{0,288} = 1,51 \cdot 0,45 = 0,68 \quad (1.51)$$

Rozptylová vodivost mezi zuby

$$\lambda_z = \frac{z_3}{2 \cdot \delta_k} = \frac{21,53}{2 \cdot 5} = 2,153 \quad (1.52)$$

Rozptylové číslo

$$\xi = \lambda_d + \lambda_c + \lambda_z = 1,71 + 0,68 + 2,153 = 4,543 \quad (1.53)$$

Střední hodnota reaktančního napětí

$$F_r = 2 \cdot l_e \cdot \xi \cdot v \cdot A \cdot 10^{-6} = 2 \cdot 0,288 \cdot 4,543 \cdot \frac{\pi(0,37 + 2 \cdot 5)1400}{60} \cdot 25400 \cdot 10^{-6} = 1,904 \text{ V} \quad (1.54)$$

Magnetická indukce ve vzduchu pod pomocným pólem, volím $l_{pp} = L = 0,322 \text{ m}$

$$B_{\delta k} = \frac{F_r}{2 \cdot v \cdot l_e} = \frac{1,904}{2 \cdot \frac{\pi \cdot 0,38 \cdot 1400}{60} \cdot 0,322} = 0,106 \text{ T} \quad (1.55)$$

Magnetické napětí pro vzduchovou mezeru pod pomocným pólem, v patě pólu se vloží nemagnetické plechy, které je možno vyměnit za magnetické a tím lehce ovlivnit vliv pomocných pólů $\delta_{ppp} = 2 \text{ mm}$

$$F_{\delta k} = 0,8 \cdot B_{\delta k} \cdot (\delta_{ppp} + \delta_k) \cdot 10^6 = 0,8 \cdot 0,106 \cdot (0,005 + 0,002) \cdot 10^6 = 593,6 \text{ A} \quad (1.56)$$

Magnetomotorická síla kompenzace kotvy

$$F_r = (1 - \alpha) \cdot \frac{1}{2} \cdot A \cdot t_p = 0,35 \cdot 0,5 \cdot 25400 \cdot 0,29 = 1289 \text{ A} \quad (1.57)$$

Počet závitů komutační cívky (magnetické napětí pro cestu železem se zanedbá)

$$N_{ck} = \frac{F_{\delta k} + F_r}{I_1} = \frac{593,6 + 1289}{272,73} = 6,9 \doteq 7 \text{ závitů} \quad (1.58)$$

Magnetický tok komutačního pólu

$$\phi_k = b_k \cdot l_{pp} \cdot B_{\delta kp} = 0,0545 \cdot 0,322 \cdot 0,1187 = 0,00186 \text{ Wb} \quad (1.59)$$

Šířka komutačního pólu

předpokládám činitel rozptylu 4, magnetickou indukci v pólu volím 1,2 T

$$b_{kp} = \frac{\phi_k(1 + \vartheta_\kappa)}{l_{pp} \cdot B_{kp}} = \frac{0,001863(1 + 4)}{0,288 \cdot 1,2} = 0,02406 \doteq 24 \text{ mm} \quad (1.60)$$

Zvolena šířka pólového nástavce pro pomocný pól $b_{pp} = 45 \text{ mm}$

Průřez vodiče pomocného pólu

Volím proudovou hustotu v cívce pomocného pólu $\sigma_{pp} = 5,5 \text{ A/mm}^2$

$$S_{pp} = \frac{I_1}{\sigma_{pp}} = \frac{272,73}{5,5} = 49,59 \text{ mm}^2 \quad (1.61)$$

Zvolen vodič 2,8 x 18 mm.

1.9 Návrh komutátoru

Průměr komutátoru

$$D_k \text{ volím } 320 \text{ mm}$$

Počet lamel

$$K = Q \cdot u = 54 \cdot 4 = 216 \quad (1.62)$$

Lamelová rozteč

$$t_k = \frac{\pi \cdot D_k}{K} = \frac{\pi \cdot 0,32}{216} = 4,65 \text{ mm} \quad (1.63)$$

Obvodová rychlost komutátoru

$$v_k = \frac{\pi \cdot D_k \cdot n}{60} = \frac{\pi \cdot 0,32 \cdot 1440}{60} = 24,13 \text{ m/s} \quad (1.64)$$

Mezilamelové napětí

$$u_k = \frac{2p \cdot U}{K} = \frac{4 \cdot 440}{216} = 8,15 \text{ V} \quad (1.65)$$

1.10 Návrh kartáčů

Proud na sadu kartáčů

$$I_s = \frac{I_1}{p} = \frac{272,73}{2} = 136,37 \text{ A} \quad (1.66)$$

Celkový průřez kartáčů v sadě, volím proudovou hustotu pro kartáče komutátoru

$$\sigma_k = 10 \text{ A/mm}^2$$

$$S_k = \frac{I_s}{\sigma_k} = \frac{136,37}{10} = 13,64 \text{ cm}^2 \quad (1.67)$$

Počet kartáčů v sadě, volím kartáče o rozměrech $l_k \times b_k = 1,25 \times 3,2 \text{ cm}$

$$N_k = \frac{13,64}{3,2 \cdot 1,25} = 3,41 \Rightarrow 4 \text{ sady kartáčů} \quad (1.68)$$

Skutečná proudová hustota v kartáčích

$$\sigma_k = \frac{I}{N_k \cdot l_k \cdot b_k} = \frac{136,37}{4 \cdot 1,25 \cdot 3,2} = 8,52 \text{ A/cm}^2 \quad (1.69)$$

1.11 Orientační oteplení hlavního pólu

Přesahující část pólového nástavce

$$a_{pp} = \frac{b_{nbp} + b_{bp}}{2} = \frac{0,174 - 0,102}{2} = 0,036 \text{ m} \quad (1.70)$$

Vnější obvod budící cívky

$$l_{cbc} = 2 \cdot (L_p + b_p + h_{vbp} + b_{vbp} + 4 \cdot a) = 2 \cdot (0,332 + 0,102 + 0,003 + 0,025 + 4 \cdot 0,036) = 1,212 \text{ m} \quad (1.71)$$

Ochlazovací povrch všech cívek

$$O_{bc} = h_c \cdot l_{be} \cdot 2p = N_b \cdot h_{vbp} \cdot l_{be} \cdot 2p = 13 \cdot 0,003 \cdot 1,212 \cdot 4 = 0,189 \text{ m}^2 \quad (1.72)$$

Ztráty v budícím vinutí

$$\Delta P_{Cub} = 958,37 \text{ W}$$

Oteplení cívky, $\alpha = 80 \text{ W/}^\circ\text{Cm}^2$

$$\Delta v_{bp} = \frac{1,18 \cdot \Delta P_{Cub}}{\alpha \cdot O_{bc}} = \frac{1,18 \cdot 958,37}{80 \cdot 0,189} = 74,8 \text{ }^\circ\text{C} \quad (1.73)$$

1.12 Ztráty

Jouleovy ztráty v rotoru

$$\Delta P_{Cur} = R_{rot} \cdot I^2 = \frac{L \cdot Q}{48 \cdot u \cdot S_{rot}} \cdot I^2 = \frac{0,332 \cdot 54}{48 \cdot 4 \cdot (1,4 \cdot 10)} \cdot 272,73^2 = 469,9 \text{ W} \quad (1.74)$$

Jouleovy ztráty v čelech vinutí

$$\Delta P_{\check{c}} = R_{\check{c}} \cdot I^2 = \frac{l_{\check{c}} \cdot Q}{48 \cdot u \cdot S_{rot}} \cdot I^2 = \frac{0,446 \cdot 54}{48 \cdot 4 \cdot (1,4 \cdot 10)} \cdot 272,73^2 = 666,45 \text{ W} \quad (1.75)$$

Jouleovy ztráty v budícím vinutí

$$\Delta P_{Cub} = R_{bc} \cdot I^2 = \frac{2(L + b_p) \cdot N_b \cdot 2p}{48 \cdot S_{bc}} \cdot I^2 = \frac{2(0,332 + 0,114) \cdot 13 \cdot 4}{48 \cdot (3 \cdot 25)} = 958,37 \text{ W} \quad (1.76)$$

Jouleovy ztráty ve vinutí pomocných pólů

$$\Delta P_{Cupp} = R_{pp} \cdot I^2 = \frac{2(L + b_{kp}) \cdot N_{ck} \cdot 2p}{48 \cdot S_{pp}} \cdot I^2 = \frac{2(0,332 + 0,027) \cdot 7 \cdot 4}{48 \cdot (2,8 \cdot 18)} \cdot 272,73^2 = 618,13 \text{ W} \quad (1.77)$$

Jouleovy ztráty v kompenzačním vinutí

$$\Delta P_{Cukv} = R_{kv} \cdot I^2 = \frac{2(L + l_{ckv}) \cdot Q_{kv} \cdot 2p}{48 \cdot S_{kv}} \cdot I^2 = \frac{2(0,332 + 0,234) \cdot 14 \cdot 4}{48 \cdot (3 \cdot 19)} \cdot 272,73^2 = 1723,39 \text{ W} \quad (1.78)$$

Ztráty v železe ve jhu rotoru, volím plechy: $\Delta p_{Fe} = 1,8 \text{ W/kg}$

$$\begin{aligned} \Delta P_{Fejr} &= 1,8 \cdot \Delta p_{Fe} \cdot \frac{\pi}{4} ((D - 2h_d)^2 - D_i^2) \cdot l_{Fe} \cdot \rho_{Fe} \cdot B^2 \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} = \quad (1.79) \\ &= 1,8 \cdot 1,8 \cdot \frac{\pi}{4} ((0,370 - 2 \cdot 0,0312)^2 - 0,1818^2) \cdot 0,288 \cdot 7870 \cdot 1,3^2 \cdot \left(\frac{46,67}{50}\right)^{1,3} = 555,28 \text{ W} \end{aligned}$$

Hmotnost zubů

$$\begin{aligned} m_{Fe} &= S_z \cdot l_{Fe} \cdot \rho_{Fe} \cdot Q = \left(\frac{\pi \cdot (D - h_d)}{Q} - b_d \right) \cdot h_d \cdot l_{Fe} \cdot \rho_{Fe} \cdot Q = \quad (1.80) \\ &= \left(\frac{\pi \cdot (0,37 - 0,0312)}{54} - 0,0105 \right) \cdot 0,0312 \cdot 0,288 \cdot 7870 \cdot 54 = 35,1 \text{ kg} \end{aligned}$$

Ztráty v železe v zubech rotoru, volím plechy: $\Delta p_{Fe} = 1,8 \text{ W/kg}$

$$\Delta P_{Fez} = 2 \cdot \Delta p_{Fe} \cdot m_{Fez} \cdot B^2 \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} \cdot Q = 2 \cdot 1,8 \cdot 35,1 \cdot 1,82^2 \cdot \left(\frac{46,67}{50}\right)^{1,3} \cdot 54 = 382,68 \text{ W} \quad (1.81)$$

Celkové ztráty v železe

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_{Fejr} + \Delta P_{Fez} = 555,28 + 382,68 = 938 \text{ W} \quad (1.82)$$

Ztráty povrchové, volím $k_0 = 4,6, \beta' = 0,24$

$$\begin{aligned} \Delta P_{pov} &= \frac{\pi}{2} \cdot D \cdot \alpha \cdot L \cdot k_0 \cdot \left(\frac{Q \cdot n}{10\,000} \right)^{1,5} \cdot (t_d \cdot \beta \cdot B_\delta \cdot k_c \cdot 1000)^2 \quad (1.83) \\ &= \frac{\pi}{2} \cdot 0,37 \cdot 0,65 \cdot 0,332 \cdot 4,6 \cdot \left(\frac{54 \cdot 1400}{10\,000} \right)^{1,5} \cdot (0,02153 \cdot 0,24 \cdot 0,8 \cdot 1,293 \cdot 1000)^2 = 342,61 \text{ W} \end{aligned}$$

Přídavné ztráty

$$\Delta P_{pp} = \Delta p \cdot P = 0,01 \cdot 120\,000 = 1200 \text{ W} \quad (1.84)$$

Mechanické ztráty

$$\Delta P_m = 4 \cdot P_{[kW]}^{0,9} \cdot n^{0,25} = 4 \cdot 120^{0,9} \cdot 1400^{0,25} = 1819,01 \text{ W} \quad (1.85)$$

Mechanické ztráty třením komutátoru, volím přitlačnou sílu $p = 0,25 \text{ kg/cm}^2$ a součinitel tření $f = 0,16$

$$\Delta P_{mk} = g \cdot v_k \cdot S_k \cdot p \cdot f = 9,81 \cdot \frac{\pi \cdot 0,320 \cdot 1400}{60} \cdot 8 \cdot 0,25 \cdot 0,16 = 73,64 \text{ W} \quad (1.86)$$

Mechanické ztráty na komutátoru vlivem přechodu, úbytek napětí na uhlíkách je $\Delta U = 2,5 \text{ V}$

$$\Delta P_k = \Delta U \cdot I = 2,5 \cdot 272,73 = 681,83 \text{ W} \quad (1.87)$$

Součet ztrát

$$\Sigma \Delta P = \Delta P_{Cur} + \Delta P_{\check{c}} + \Delta P_{Cub} + \Delta P_{Cupp} + \Delta P_{Cukv} + \Delta P_{Fe} + \Delta P_{pov} + \Delta P_{pp} + \Delta P_m + \Delta P_{mk} + \Delta P_k = \quad (1.88)$$

$$\begin{aligned} &= 469,9 + 666,45 + 958,37 + 618,13 + 1723,39 + 741,28 + 342,61 + 1200 + 1819,01 + 73,64 + 681,83 = \\ &= 9294,61 \text{ W} \end{aligned}$$

Účinnost

$$\eta = \frac{P}{P + \Sigma \Delta P} = \frac{120000}{120000 + 9264,61} = 92,81 \% \quad (1.89)$$

2 Oteplení

2.1 Střední rychlost proudění vzduchu v radiálním kanálu

Ztráty odváděné rotorovou větví

$$\Delta P_{rv} = \Delta P_{Cur} + \Delta P_{Fej} + \Delta P_{Fez} = 470 + 383 + 556 = 1409 \text{ W} \quad (2.1)$$

Střední rychlost proudění v radiálním kanálu

$$Q_{rv} = \frac{\Delta P_{rv}}{c_v \cdot \Delta v} = \frac{1409}{1250 \cdot 15} = 0,0751 \text{ m}^3/\text{s} \quad (2.2)$$

Množství na jeden kanál a drážkovou rozteč

$$Q_{r1} = \frac{Q_{rv}}{Q \cdot i} = \frac{0,0751}{54 \cdot 5} = 0,000278 \text{ m}^3/\text{s} \quad (2.3)$$

Střední rychlost proudění v prostoru zubů

$$v_{kz} = \frac{Q_{r1}}{\check{s}_{z3} \cdot \check{s}_k} = \frac{0,000278}{0,0074 \cdot 0,01} = 3,75 \text{ m/s} \quad (2.4)$$

Střední rychlost proudění v prostoru jádra

$$v_{kj} = \frac{Q_{r1}}{\check{s}_{j2} \cdot \check{s}_k} = \frac{0,000278}{0,01424 \cdot 0,01} = 1,95 \text{ m/s} \quad (2.5)$$

2.2 Ztráty v uvažovaných úsecích (tekoucích do uzlů)

vinutí

$$\Delta P_{Cud1} = \frac{\Delta P_{Cur}}{2 \cdot Q \cdot i} = \frac{469,9}{2 \cdot 54 \cdot 5} = 0,8702 \text{ W} \quad (2.6)$$

zub

$$\Delta P_{Fez1} = \frac{\Delta P_{Fez}}{2 \cdot Q \cdot i} = \frac{383}{2 \cdot 54 \cdot 5} = 0,709 \text{ W} \quad (2.7)$$

jádro kotvy

$$\Delta P_{Fej1} = \frac{\Delta P_{Fej}}{2 \cdot Q \cdot i} = \frac{555}{2 \cdot 54 \cdot 5} = 1,028 \text{ W} \quad (2.8)$$

2.3 Určení okolních teplot vymezeného úseku

Oteplení vstupujícího do kanálu

$$v_{02} = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Oteplení chladiva v okolí jádra kotvy

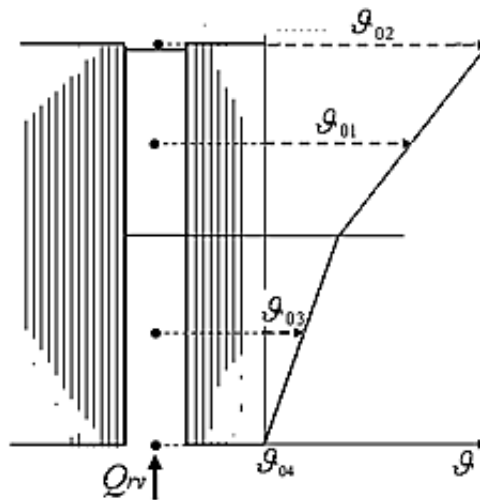
$$v_{01} = \frac{\Delta P_{Fej}}{c_v \cdot Q_{rv}} = 5551250 \cdot 0,0751 = 1,96 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2.9)$$

Oteplení chladiva v okolí zuby kanálu

$$v_{02} = \frac{\Delta P_{Fej} + 0,5 \cdot (\Delta P_{Fesz} + \Delta P_{Cur})}{c_v \cdot Q_{rv}} = \frac{555 + 0,5 \cdot (383 + 0,5 \cdot 470)}{1250 \cdot 0,0751} = 10,45 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2.10)$$

Oteplení chladiva vystupujícího z kanálu

$$v_{02} = \frac{\Delta P_{Fej} + \Delta P_{Fesz} + \Delta P_{Cur}}{c_v \cdot Q_{rv}} = \frac{(555 + 383 + 470)}{1250 \cdot 0,0751} = 15 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2.11)$$



Obrázek 2.1: Řez kanálem pro výpočet oteplení v jednotlivých úsecích

2.4 Tepelné odpory

Z vinutí do ventilačního kanálu

$$R_1 = \frac{\delta_{iz}}{\lambda_{iz} \cdot O_{iz} \cdot \frac{\check{s}_k}{2}} + \frac{\delta_{vzd}}{\lambda_{vzd} \cdot O_{iz} \cdot \frac{\check{s}_k}{2}} + \frac{1}{\alpha_z \cdot O_{iz} \cdot \frac{\check{s}_k}{2}} = \quad (2.12)$$

$$= \frac{0,00245}{0,23 \cdot 0,0824 \cdot \frac{0,01}{2}} + \frac{0,0001}{0,026 \cdot 0,0824 \cdot \frac{0,0001}{2}} + \frac{1}{80 \cdot 0,0824 \cdot \frac{0,0001}{2}} = 89,13 \frac{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

Z vinutí do vzduchové mezery

$$R_2 = \frac{\delta'_{iz}}{\lambda_{iz} \cdot b_d \cdot \frac{\check{s}_t}{2}} + \frac{\delta_{vzd}}{\lambda_{vzd} \cdot b_d \cdot \frac{\check{s}_t}{2}} + \frac{1}{\alpha_\delta \cdot b_d \cdot \frac{\check{s}_t}{2}} = \quad (2.13)$$

$$= \frac{0,006}{0,23 \cdot 0,0105 \cdot \frac{0,57}{2}} + \frac{0,0001}{0,026 \cdot 0,0105 \cdot \frac{0,57}{2}} + \frac{1}{50 \cdot 0,0105 \cdot \frac{0,57}{2}} = 538,62 \frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W}$$

Z vinutí do zubu

$$R_3 = \frac{\delta_{iz}}{\lambda_{iz} \cdot O_{iz} \cdot \frac{\check{s}_p}{2}} + \frac{\delta_{vzd}}{\lambda_{vzd} \cdot O_{iz} \cdot \frac{\check{s}_p}{2}} + \frac{\frac{z_2}{2}}{3\lambda_{Fed} \cdot O_{iz} \cdot \frac{\check{s}_p}{2}} = \quad (2.14)$$

$$= \frac{0,00245}{0,23 \cdot 0,0824 \cdot \frac{0,047}{2}} + \frac{0,01}{0,026 \cdot 0,0824 \cdot \frac{0,047}{2}} + \frac{0,00922}{2 \cdot 3 \cdot 45 \cdot 0,0824 \cdot \frac{0,047}{2}} = 7,5 \frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W}$$

Ze zubu do vzduchové mezery

$$R_4 = \frac{\frac{h_d}{2}}{3\lambda_{Fed1} \cdot z_{1s} \cdot \frac{\check{s}_p}{2}} + \frac{1}{\alpha_\delta \cdot z_1 \cdot \frac{\check{s}_p}{2}} = \quad (2.15)$$

$$= \frac{0,0307}{2 \cdot 3 \cdot 1 \cdot 0,01013 \cdot \frac{0,047}{2}} + \frac{1}{80 \cdot 0,00838 \cdot \frac{0,047}{2}} = 84,97 \frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W}$$

Ze zubu do vzduchového kanálu

$$R_5 = \frac{\frac{\check{s}_p}{2}}{3\lambda_{Feq} \cdot z_2 \cdot h_d} + \frac{1}{\alpha_z \cdot z_2 \cdot h_d} = \quad (2.16)$$

$$= \frac{0,047}{2 \cdot 3 \cdot 45 \cdot 0,00922 \cdot 0,0307} + \frac{1}{45 \cdot 0,00922 \cdot 0,0307} = 106,18 \frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W}$$

Ze plechů zubu do plechů jádra

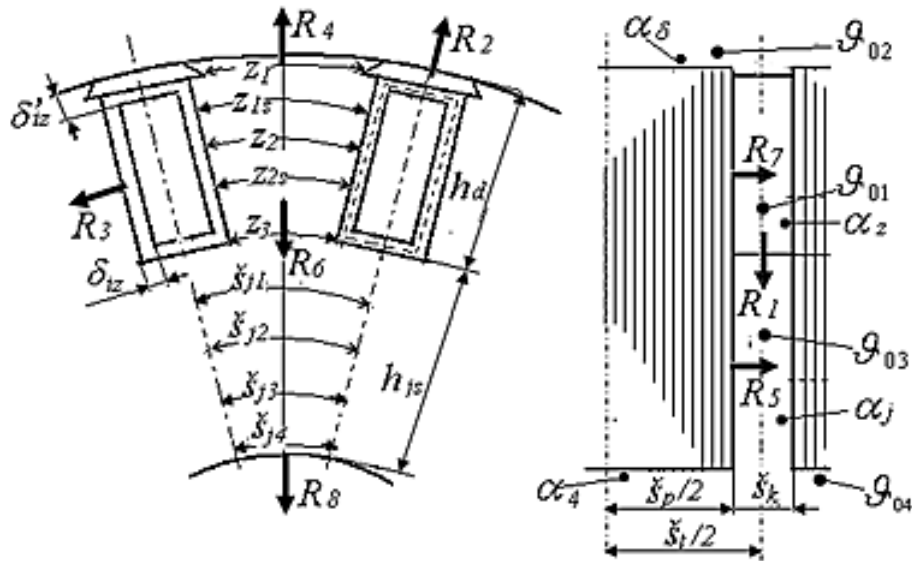
$$\begin{aligned}
 R_6 &= \frac{\frac{h_d}{2}}{3\lambda_{Fed} \cdot z_{2s} \cdot \frac{\check{s}_p}{2}} + \frac{\frac{h_{js}}{2}}{3\lambda_{Fed} \cdot \check{s}_{j1} \cdot \frac{\check{s}_p}{2}} = \\
 &= \frac{\frac{0,0307}{2}}{3 \cdot 45 \cdot 0,00831 \cdot \frac{0,047}{2}} + \frac{\frac{0,06292}{2}}{3 \cdot 45 \cdot 0,01607 \cdot \frac{0,047}{2}} = 1,2 \frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W}
 \end{aligned} \tag{2.17}$$

Ze plechů jádra do ventilačního kanálu

$$\begin{aligned}
 R_7 &= \frac{\frac{\check{s}_p}{2}}{3\lambda_{Feq} \cdot \check{s}_{j2} \cdot h_{js}} + \frac{1}{\alpha_j \cdot \check{s}_{j2} \cdot h_{js}} = \\
 &= \frac{\frac{0,047}{2}}{3 \cdot 1 \cdot 0,01424 \cdot 0,06292} + \frac{1}{50 \cdot 0,01424 \cdot 0,06292} = 31,06 \frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W}
 \end{aligned} \tag{2.18}$$

Ze plechů jádra do vzduchové mezery

$$\begin{aligned}
 R_8 &= \frac{\frac{h_{js}}{2}}{3\lambda_{Fel} \cdot \check{s}_{j3} \cdot \frac{\check{s}_p}{2}} + \frac{1}{\alpha_4 \cdot \check{s}_{j4} \cdot \frac{\check{s}_p}{2}} = \\
 &= \frac{\frac{0,06292}{2}}{3 \cdot 45 \cdot 0,01241 \cdot \frac{0,047}{2}} + \frac{1}{80 \cdot 0,01058 \cdot \frac{0,047}{2}} = 51,07 \frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W}
 \end{aligned} \tag{2.19}$$



Obrázek 2.2: Rozměry pro tepelné odpory, tepelné odpory a chladivosti

2.5 Soustavy rovnic pro řešení ustáleného stavu

$$\frac{v_{Cud} - v_{01}}{R_1} + \frac{v_{Cud} - v_{02}}{R_2} + \frac{v_{Cud} - v_z}{R_3} = \Delta P_{Cud}$$

$$\frac{v_z - v_{Cud}}{R_3} + \frac{v_z - v_{02}}{R_4} + \frac{v_z - v_{01}}{R_5} + \frac{v_z - v_j}{R_6} = \Delta P_{Fez1}$$

$$\frac{v_j - v_z}{R_6} + \frac{v_j - v_{03}}{R_7} + \frac{v_j - v_{04}}{R_8} = \Delta P_{Fej1}$$

$$v_{Cud} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) - \frac{v_z}{R_3} = \Delta P_{Cud1} + \frac{v_{01}}{R_1} + \frac{v_{02}}{R_2}$$

$$-\frac{v_{Cud}}{R_3} + v \left(\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_6} \right) - \frac{v_j}{R_6} = \Delta P_{Fez1} + \frac{v_{02}}{R_4} + \frac{v_{01}}{R_5}$$

$$v_z \left(\frac{1}{R_6} + \frac{1}{R_7} + \frac{1}{R_8} \right) - \frac{v_z}{R_6} = \Delta P_{Fej1} + \frac{v_{03}}{R_7} + \frac{v_{04}}{R_8}$$

$$v_{Cud} \left(\frac{1}{89,13} + \frac{1}{538,62} + \frac{1}{7,5} \right) - \frac{v_z}{7,5} = 4,25 + \frac{8,79}{84,97} + \frac{15}{538,62}$$

$$-\frac{v_{Cud}}{7,5} + v \left(\frac{1}{7,5} + \frac{1}{84,97} + \frac{1}{106,18} + \frac{1}{1,2} \right) - \frac{v_j}{1,2} = 0,71 + \frac{15}{84,97} + \frac{8,79}{106,18}$$

$$v_z \left(\frac{1}{1,2} + \frac{1}{31,06} + \frac{1}{51,07} \right) - \frac{v_z}{1,6} = 1,03 + \frac{1,29}{31,06} + \frac{0}{51,07}$$

$$0,1463v_{Cud} - 0,1332v_z + 0v_j = 0,9034$$

$$-0,1332v_{Cud} + 0,9882v_z - 0,83383v_j = 0,0,7371$$

$$0v_{Cud} - 0,8338v_z + 0,8856v_j = 1,3649$$

$$v_{Cud} = 38,4144 \Rightarrow 38,4 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$v_z = 35,2513 \Rightarrow 35,3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$v_j = 34,7306 \Rightarrow 34,7 \text{ } ^\circ\text{C}$$

2.6 Oteplení čel

Ztráty v čelech

$$\Delta P_{\check{c}} = 666.45 \text{ W}$$

Ztráty vtékající do uzlu

$$\Delta P_{\check{c}1} = \frac{\Delta P_{\check{c}}}{2 \cdot Q} = \frac{666,45}{2 \cdot 54} = 5,537 \text{ W} \quad (2.20)$$

Obvod vodiče čela

$$O_{\check{c}} = 2 \cdot (h_{\check{c}} + b_{\check{c}}) = 2 \cdot (10,8 + 10,5) = 0,0426 \text{ m} \quad (2.21)$$

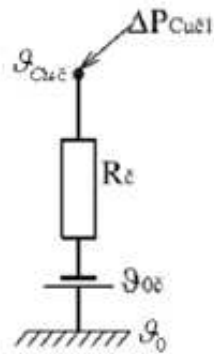
Tepelný odpor čela

$$R_{\check{c}} = \frac{\delta_{iz}}{\lambda_{iz} \cdot O_{\check{c}} \cdot l_{\check{c}}} + \frac{\delta_{vzd}}{\lambda_{vzd} \cdot O_{\check{c}} \cdot l_{\check{c}}} + \frac{1}{\alpha_{\check{c}} \cdot k \cdot O_{\check{c}} \cdot l_{\check{c}}} = \quad (2.22)$$

$$= \frac{0,00245}{0,23 \cdot 0,0426 \cdot 0,446} + \frac{0,0001}{0,026 \cdot 0,0426 \cdot 0,446} + \frac{1}{50 \cdot 0,6 \cdot 0,0426 \cdot 0,446} = 2,807 \frac{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

Oteplení čela

$$v_{\zeta} = R_{\zeta} \cdot \delta P_{\zeta 1} = 2,807 \cdot 5,537 = 15,5423 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (2.23)$$



Obrázek 2.3: Tepelný obvod pro výpočet oteplení v čelech

oteplení uzlů nad teplotu okolí (40°C)	Zaokrouhleno
$v_{Cud} = 38,4144 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$v_{Cud} = 38,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$
$v_z = 35,2513 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$v_z = 35,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$
$v_j = 34,7306 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$v_j = 34,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$
$v_{\zeta} = 15,5423 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$v_{\zeta} = 15,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Závěr

Ve své diplomové práci jsem navrhl stejnosměrný stroj dle zadání. Vypočetl jsem, že účinnost stroje je 92,8 % oproti původně odhadovaným 90 %.

Velikost elektromagnetického využití, tedy Essonova činitele, jsem zvolil 2,172, což je relativně malá hodnota, která se ještě zmenšila tím, když jsem vypočetl počet vodičů v drážce a zaokrouhlil toto číslo dolů na osm, čímž se lehce snížila obvodová proudová hustota.

Toto vše zapříčinilo velice nízké hodnoty oteplení mědi a železa v zubové části rotoru a také nízké hodnoty oteplení čel v rotoru. Což může být zapříčiněno relativně tenkou použitou izolací a poměrně vysokými pracovními otáčkami stroje. Z hodnot oteplení tedy vyplývá, že na rotoru může být použita izolace tepelné třídy A. Větší elektromagnetické využití stroje by vyústilo ve vyšší hodnoty oteplení stroje a použití vyšší tepelné třídy izolace.

V přílohách této práce jsou přiloženy výkresy s hlavními kótami. Tyto výkresy byly provedeny v programu AutoCAD a jedná se o podélný a příčný řez navrženého stroje.

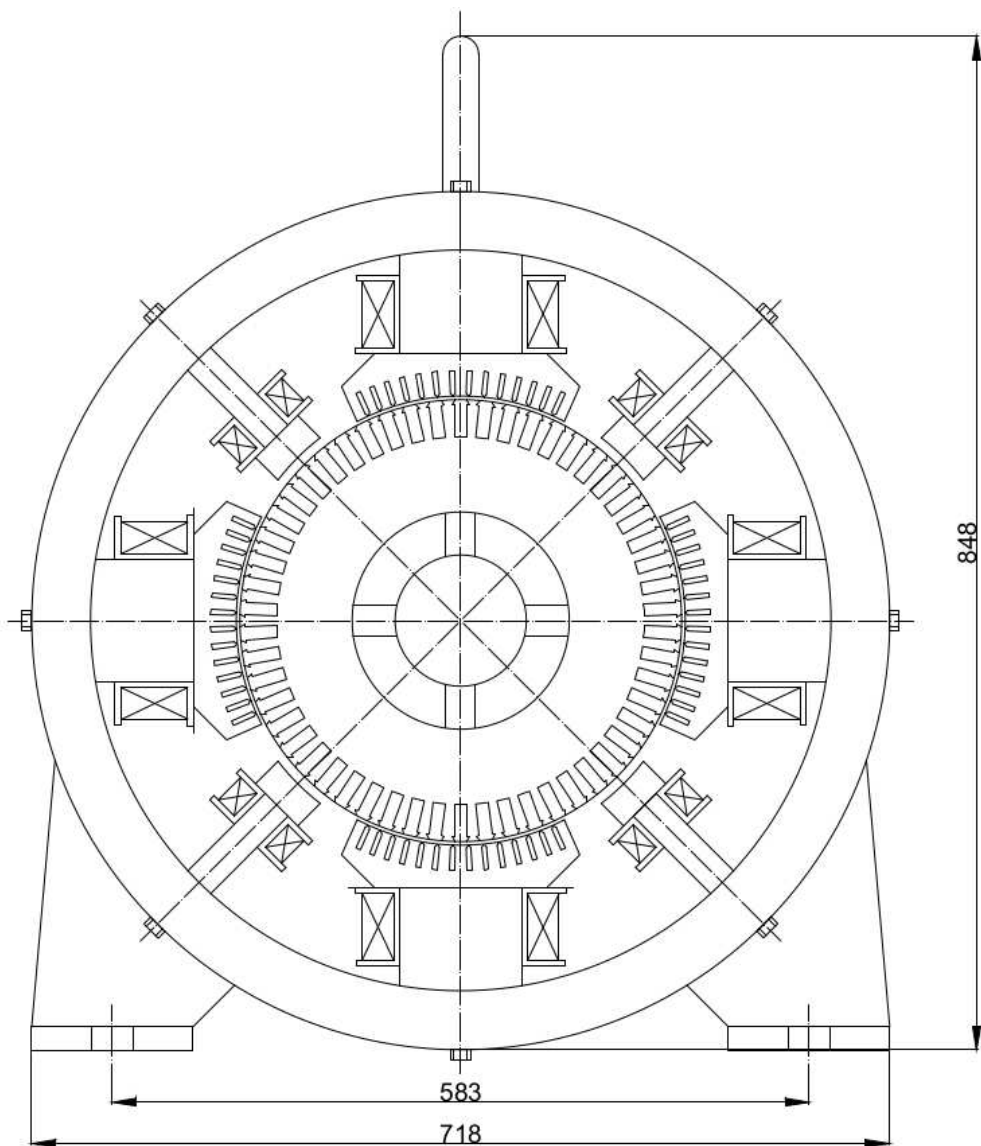
V této práci jsem využil svých znalostí nabytých v průběhu studia.

Literatura

- [1] Cigánek L. *Stavba elektrických strojů*. Nakladatelství technické literatury: Praha, 1958. 714 s.
- [2] Kopylov I. P. a Kol. *Stavba elektrických strojů*. Nakladatelství technické literatury: Praha, 1988. 685 s.
- [3] Červený J. *Stavba elektrických strojů*. Plzeň, 2012. 148s.

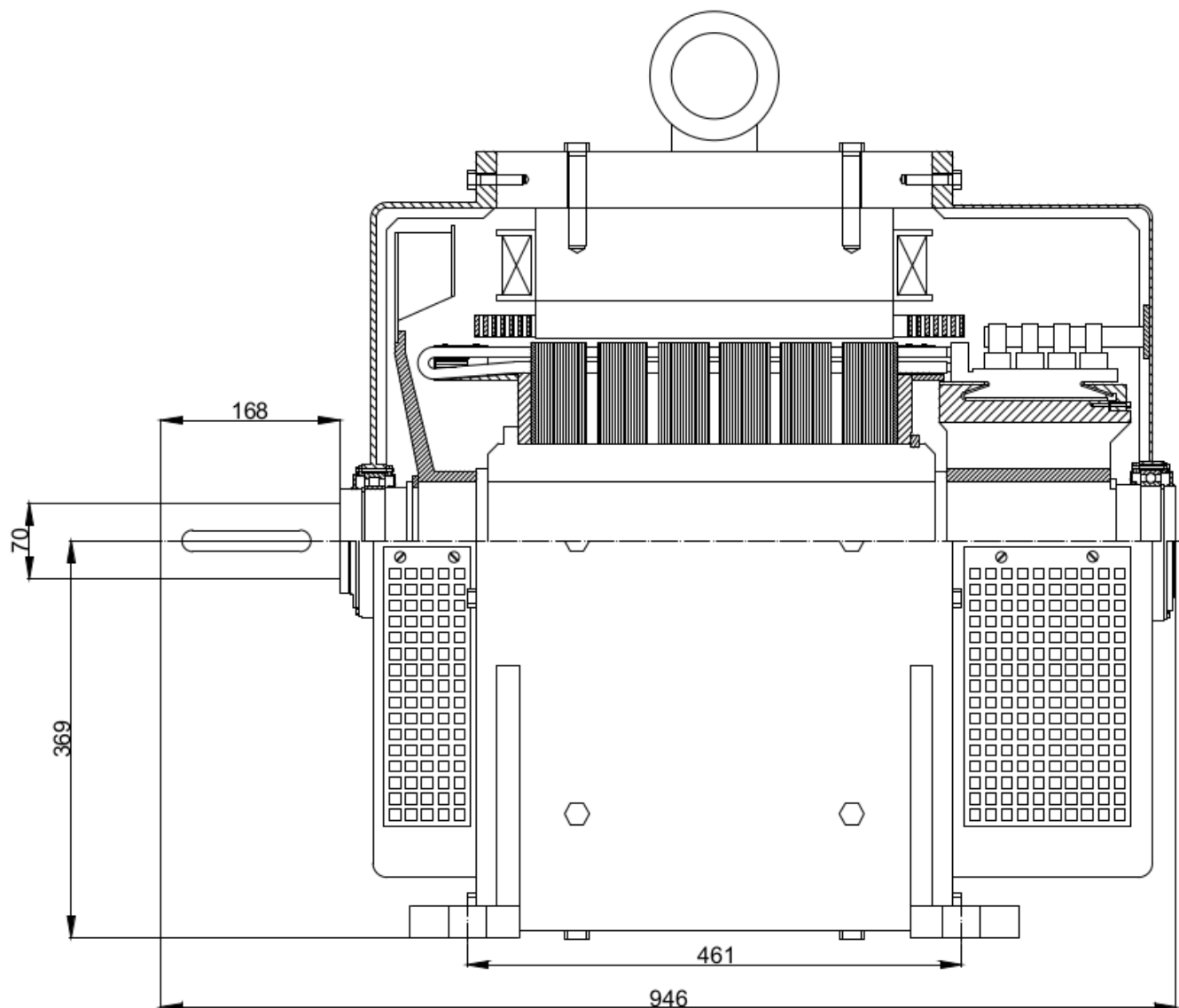
A Výkresy

A.1 Příčný řez



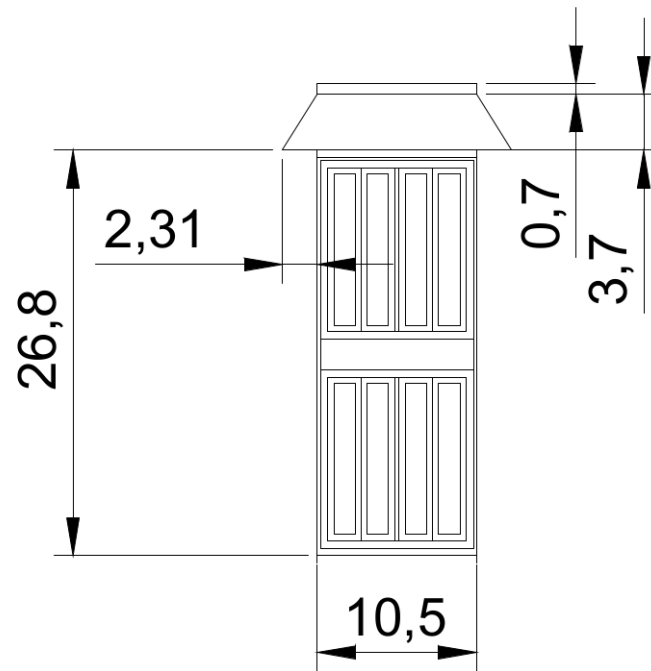
Obrázek A.1: Příčný řez stroje

A.2 Podélný řez

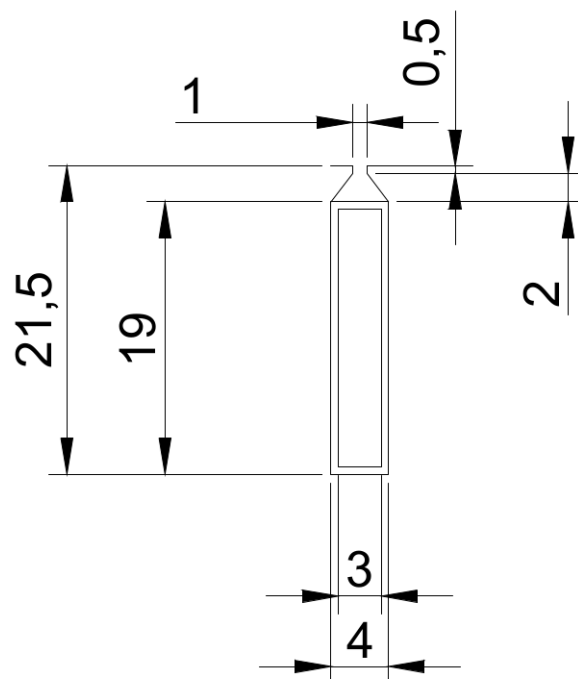


Obrázek A.2: Podélný řez stroje

A.3 Drážky



Obrázek A.3: Průřez drážkou vinutí rotoru



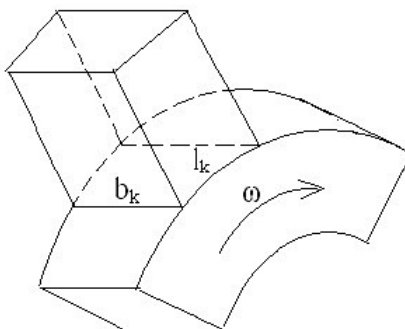
Obrázek A.4: Drážka kompenzačního vinutí na hlavním pólu

B Ostatní

B.1 Doporučené rozměry 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

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

B.2 Rozměry pasových vodičů

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

Ybřr z ĆSN 42 8808-1959 Rozměry měděných pásů

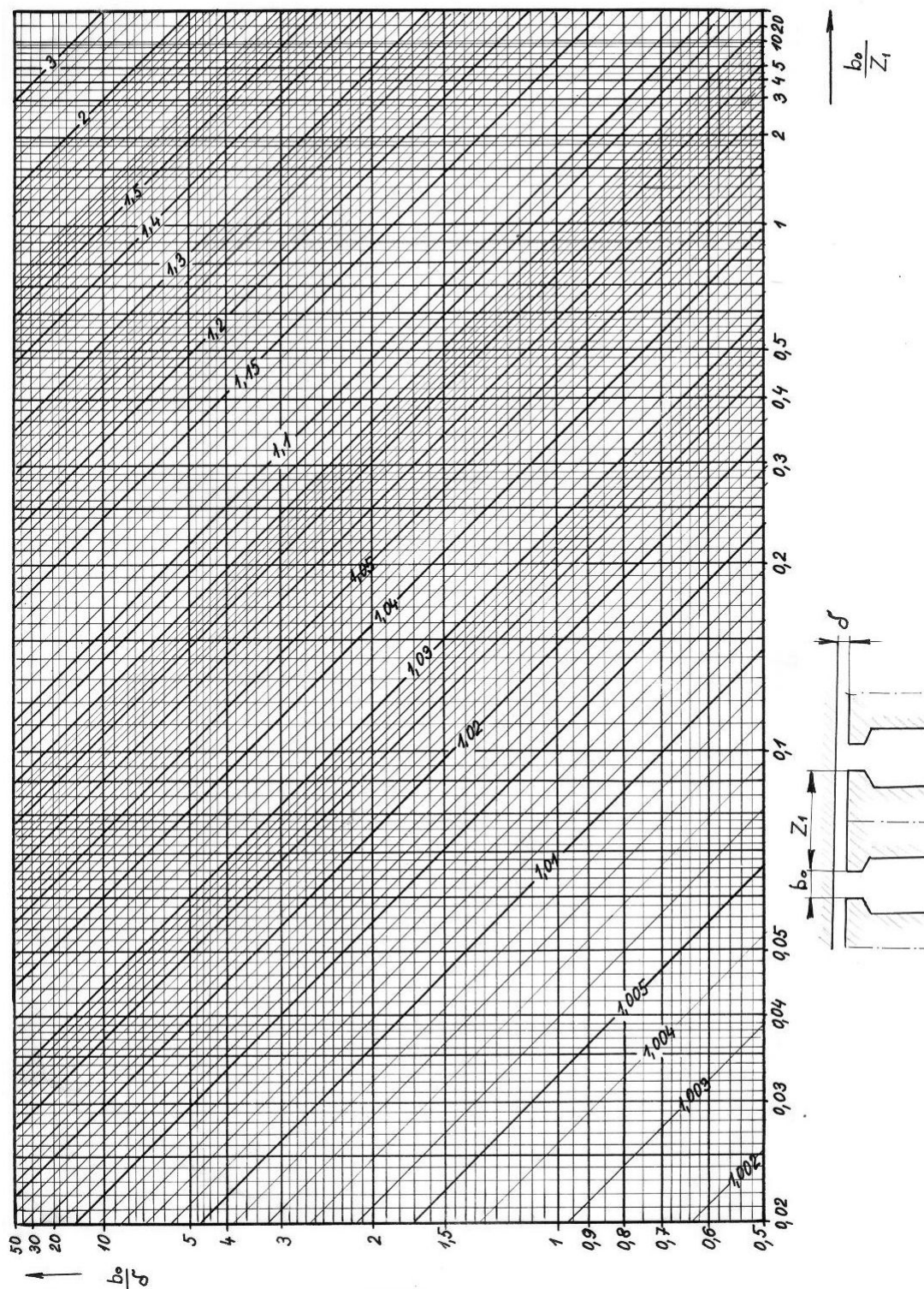
Jmenovitá tloušťka [mm]	Rozměry izolovaného pásu												
	3,0	(3,2)	3,5	4	4,5	5	5,5	6	(6,5)	7	8	9	10
11,4													
12,9			13,5										
14,4			16,6	19,1									
15,9			18,4	21,1									
17,4			20,1	23,1									
18,9	19,9		21,9	25,1									
20,4	21,4	23,6	27,1	30,3	33,8								
23,4	24,7	27,1	31,1	34,8	38,8	42,8	46,8						
26,4	27,9	30,6	35,1	39,3	43,8	48,3	52,5						
29,4	31,1	34,1	39,1	43,8	48,8	53,8	58,5						
32,4	34,3	37,6	43,1	48,3	53,8	59,3	64,5						
35,4	37,5	41,1	47,1	52,8	58,8	64,8	70,5			93,8			
38,4	40,7	44,6								101,8			
41,4	43,9	48,1	55,1	61,8	68,8	75,8	82,5			109,8			
44,4	47,1	51,6	59,1	66,3						117,8			147,8
47,4	50,3	55,1	63,1	70,8	78,8	86,8	94,5	102,5	110,5	125,8			157,8
53,4	56,7	62,1	71,1	79,8	88,8	97,8	106,5	115,5	124,5	141,8	159,8	177,8	
59,4	63,1	69,1	79,1	88,8	98,8	108,8	118,8	128,8	138,5	157,8	178,8	197,8	
74,4	79,1	86,6	99,1	111,3	123,8	136,3	148,5	161,0	173,5	197,8	222,8	247,8	
89,4	95,1	104,1	119,1	133,8	148,8	163,8	178,5	193,5	208,5	237,8	267,8	297,8	

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

Obrázek B.1: Rozměry pasových vodičů

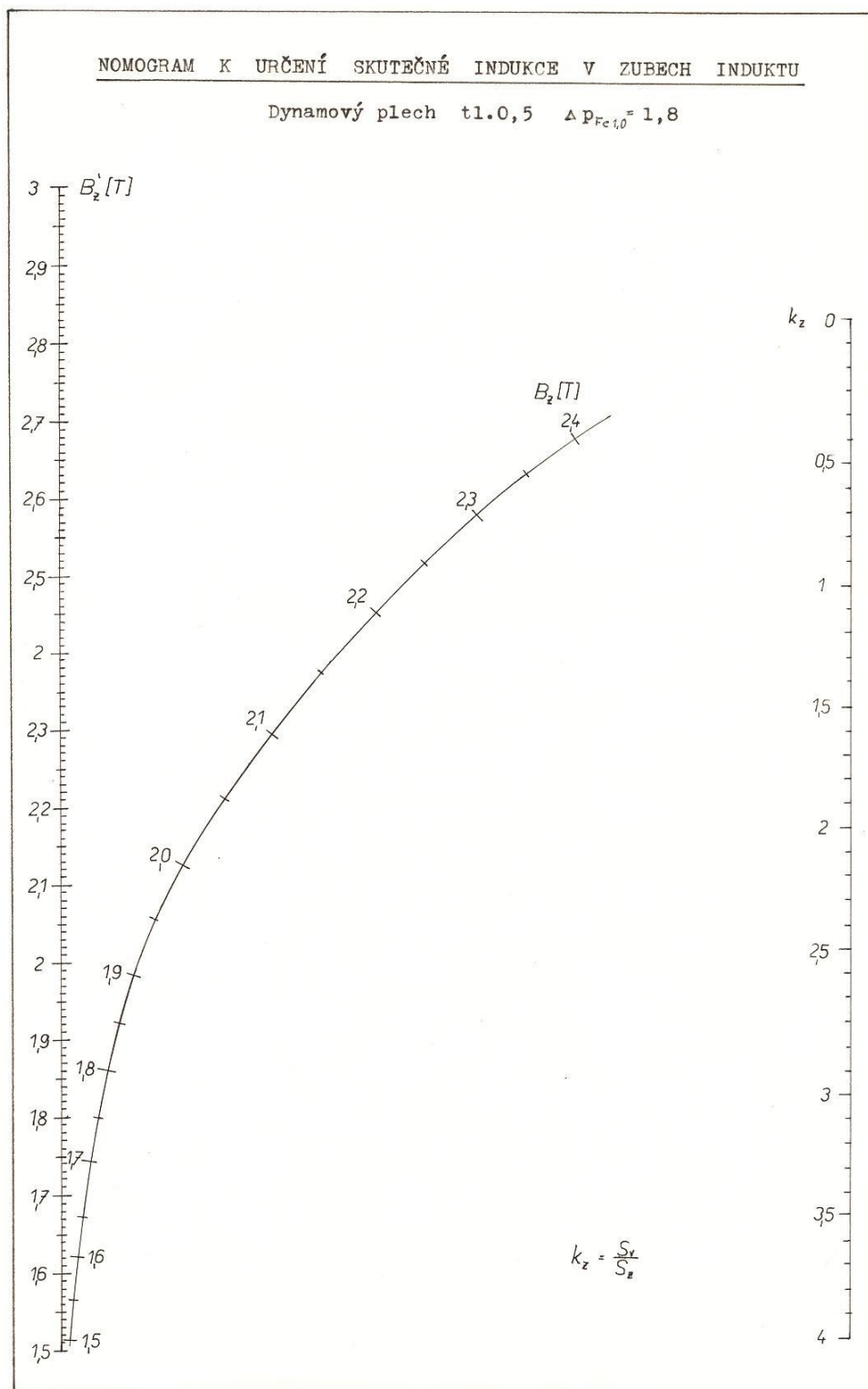
B.3 Carterův činitel

CARTERŮV ČINITEL NA DRÁŽKOVÁNÍ



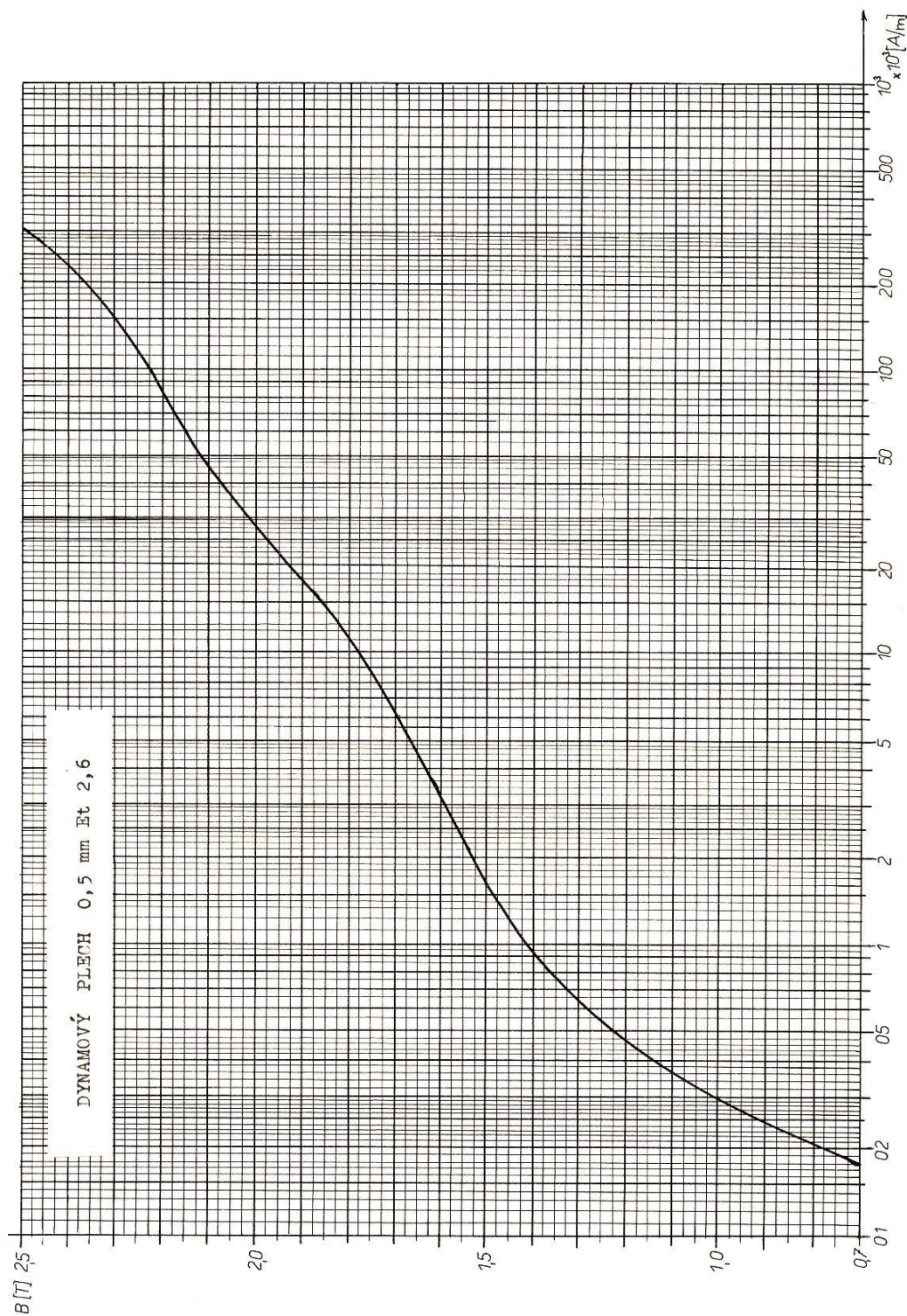
Obrázek B.2: Nomogram pro určení Carterova činitele

B.4 Skutečná indukce v zubu



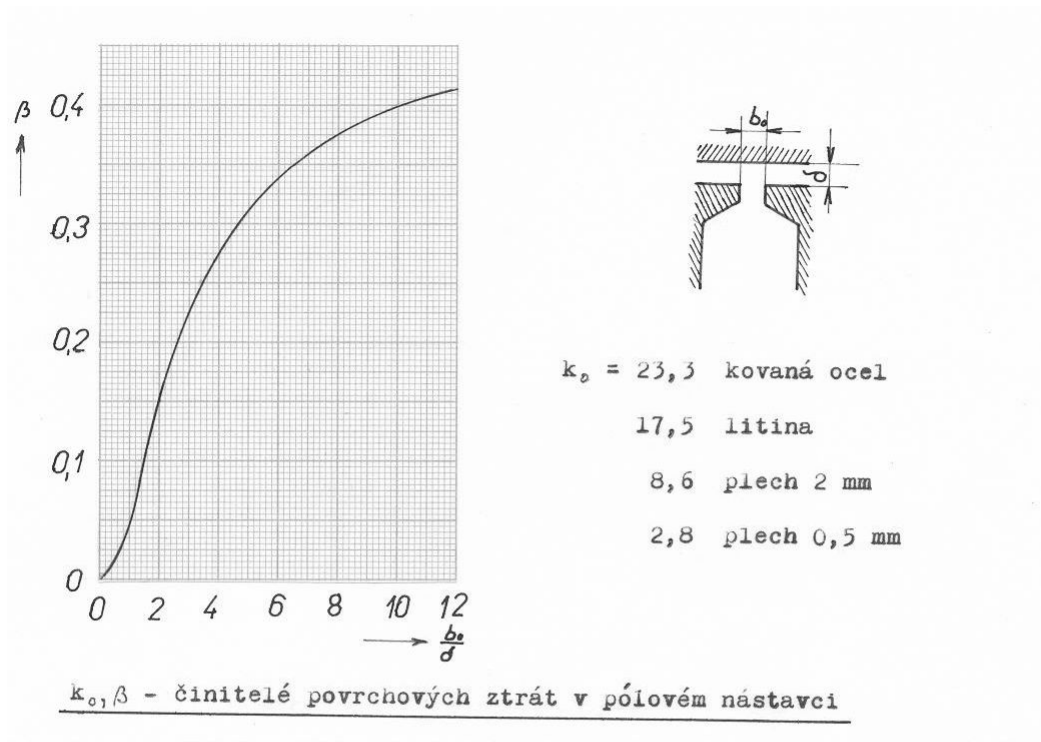
Obrázek B.3: Nomogram pro určení skutečné indukce v zubu

B.5 Magnetizační charakteristika dynamového plechu



Obrázek B.4: Magnetizační charakteristika dynamového plechu

B.6 Určení konstant

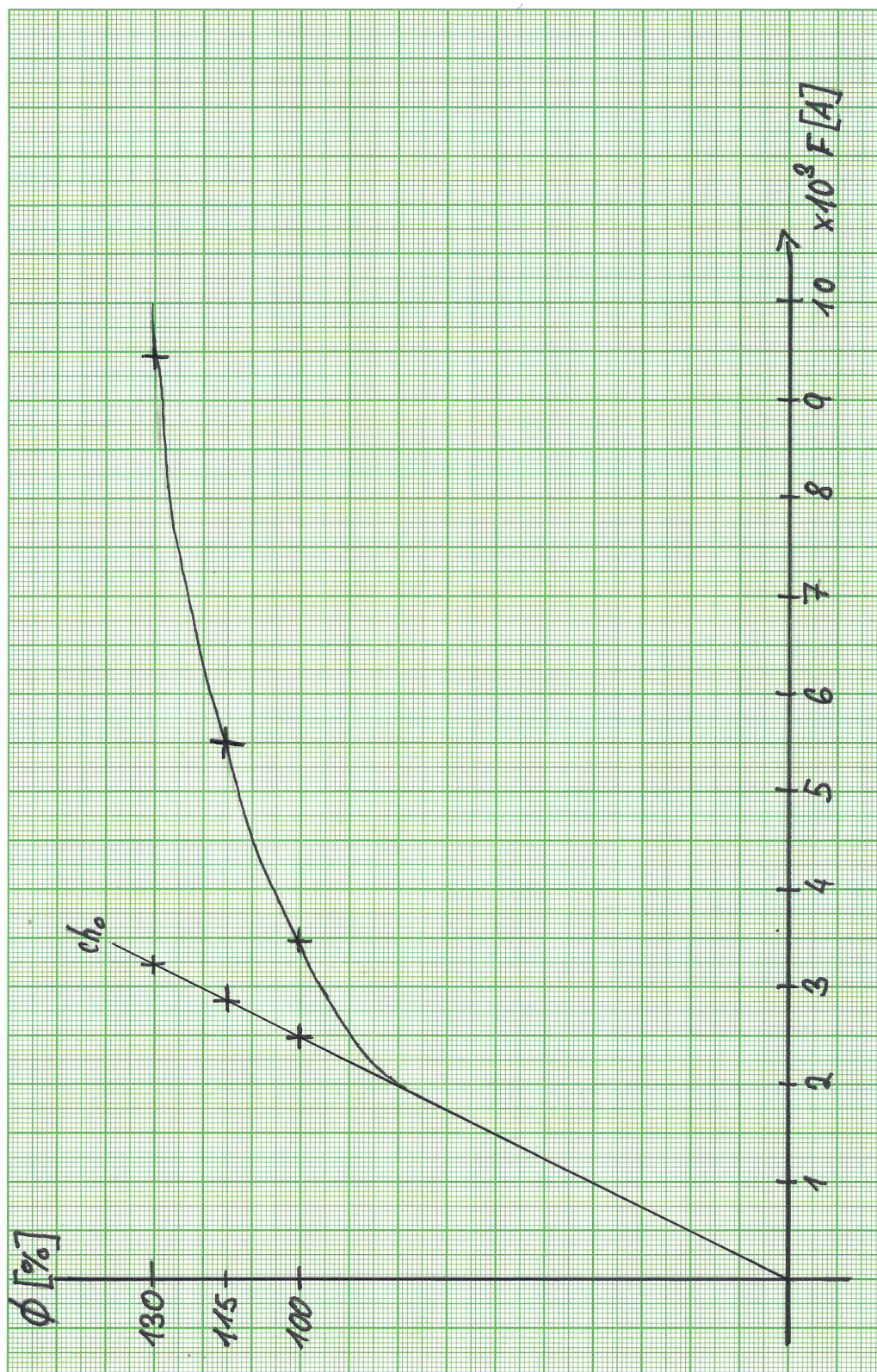


Činitel mechanických ztrát :

A = 1,1 ÷ 1,5	pomalub. alternátor
0,8 ÷ 1,1	rychlloběžné alt.
0,8 ÷ 1	turboalternátor

Obrázek B.5: Nomogram pro určení konstant k_0 a β pro výpočet povrchových ztrát

B.7 Charakteristika naprázdno



Obrázek B.6: Charakteristika naprázdno a charakteristika magnetického obvodu rotoru