

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Vliv velikosti průměru kotvy synchronního stroje na jeho
vlastnosti**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2016/2017

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

Jméno a příjmení: **Bc. Vojtěch JOHN**
Osobní číslo: **E15N0055P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Průmyslová elektronika a elektromechanika**
Název tématu: **Vliv velikosti průměru kotvy synchronního stroje na jeho vlastnosti.**
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 synchronního generátoru s parametry: $S=8000$ kVA; $U_s=6300$ V; $2p=10$; $m=3$; $f=50$ Hz; $\cos\phi = 0,8$.
2. Metodou náhradních tepelných obvodů proveďte výpočet oteplení kotvy.
3. Proveďte výpočet pro stejný stroj, ale s odlišným průměrem kotvy. U obou variant by se nemělo příliš lišit oteplení kotvy.
4. Nakreslete schematický příčný a podélný řez obou strojů.
5. Proveďte porovnání a vyhodnocení obou variant.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. L.Cigánek: Stavba elektrických strojů.
2. I.P.Kopylov: Stavba elektrických strojů.
3. J.Červený: Stavba elektrických strojů, portál ZCU, Courseware 2016.
4. J.Červený: Stavba Postup při návrhu synchronního stroje, portál ZCU, Courseware 2016.

Vedoucí diplomové práce:

Doc. Ing. Josef Červený, CSc.

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání diplomové práce: 14. října 2016

Termín odevzdání diplomové práce: 19. května 2017

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



Prof. Ing. Václav Kús, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2016

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá návrhem dvou variant synchronního stroje, je zde zjišťováno jaký vliv má průměr induktu na vlastnosti stroje. Je zde proveden elektromagnetický návrh, návrh některých konstrukčních částí a výpočet oteplení. Byly také vytvořeny příčné a podélné řezy obou variant. Na konci práce je provedeno porovnání a vyhodnocení

Klíčová slova

Synchronní stroj, elektromagnetický návrh, výpočet oteplení, konstrukční výpočty, příčný řez, podélný řez

Abstract

This diploma thesis deals with the design of two variants of the synchronous machine, there is investigated what influence the diameter of the stator have for machine characteristics. There is an electromagnetic suggestion, suggestion of some construction parts and calculation of temperature rise. Transverse and longitudinal sections of both variants were also created. At the end of the work, comparison and evaluation are performed

Key words

Synchronous machine, electromagnetic suggestion, calculation of warming, construction calculations, transverse section, longitudinal section

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 diplomové práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 17.5.2017

Vojtěch John

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval mému vedoucímu práce, panu Doc. Ing. Josefu Červenému, CSc., za cenné rady a čas, který mi věnoval při konzultacích. Děkuji

Obsah

Obsah	7
Seznam symbolů a zkratk.....	9
Úvod	11
1. Elektromagnetický výpočet.....	12
1.1. Zadané hodnoty	12
1.2. Základní hodnoty	12
2. Výpočet první varianty.....	14
2.1. Návrh vinutí induktu	14
2.1.1. Parametry vinutí.....	14
2.1.2. Návrh drážky.....	18
2.1.3. Vyložení čel	19
2.1.4. Odpor a rozptylová reaktance vinutí.....	21
2.2. Návrh magnetického obvodu	22
2.2.1. Magnetické napětí reakce kotvy	22
2.2.2. Dimenzování magnetického obvodu	24
2.2.3. Charakteristika naprázdno	25
2.2.4. Návrh budícího vinutí	26
2.2.5. Orientační výpočet oteplení budící cívky	28
2.2.6. Mezipólový rozptyl.....	29
2.3. Výpočet ztrát a účinnosti.....	30
2.4. Konstrukční výpočty	32
2.4.1. Návrh hřídele	32
2.4.2. Připevnění pólů	32
2.4.3. Kroužky a kartáče	36
2.4.4. Návrh tlumiče	37
2.4.5. Určení počtu mezipólových rozpěrek	37
2.5. Výpočet oteplení kotvy	38
2.5.1. Drážková část.....	38
2.5.2. Čela vinutí.....	44
3. Výpočet druhé varianty.....	45
3.1. Návrh vinutí induktu	45
3.1.1. Parametry vinutí.....	45
3.1.2. Návrh drážky.....	49
3.1.3. Vyložení čel	50
3.1.4. Odpor a rozptylová reaktance vinutí.....	52
3.2. Návrh magnetického obvodu	53
3.2.1. Magnetické napětí reakce kotvy	53
3.2.2. Dimenzování magnetického obvodu	55
3.2.3. Charakteristika naprázdno	56
3.2.4. Návrh budícího vinutí	57
3.2.5. Orientační výpočet oteplení budící cívky	59
3.2.6. Mezipólový rozptyl.....	60
3.3. Výpočet ztrát a účinnosti.....	61
3.4. Konstrukční výpočty	63
3.4.1. Návrh hřídele	63
3.4.2. Připevnění pólů	63
3.4.3. Kroužky a kartáče	67
3.4.4. Návrh tlumiče	68

3.4.5.	Určení počtu mezipólových rozpěrek	68
3.5.	Výpočet oteplení kotvy	69
3.5.1.	Drážková část.....	69
3.5.2.	Čela vinutí.....	75
4.	Porovnání a vyhodnocení	76
5.	Závěr	80
	Seznam literatury a informačních zdrojů	81
	Seznam příloh.....	82
	Seznam obrázků.....	82
	Seznam tabulek	82
	Přílohy	1

Seznam symbolů a zkratk

S	Zdánlivý výkon [kVA]
P	Činný výkon [kW]
$\cos\varphi$	Účinitel [-]
U	Sdružené napětí [V]
U_f	Fázové napětí [V]
I_1	Fázový proud [A]
I_b	Budící proud [A]
$2p$	Počet pólů [-]
m	Počet fází [-]
f	Frekvence [f]
n_s	Synchronní rychlost [min^{-1}]
D_1	Průměr induktu [m]
A	Obvodová proudová hustota [A/m]
B	Indukce [T]
t_{d1}	Drážková rozteč [mm]
t_p	Pólová rozteč [mm]
Q	Počet drážek induktu [-]
a	Počet paralelních větví [-]
q	Počet drážek na pól a fázi [-]
N_s	Počet závitů jedné fáze v sérii [-]
n_d	Počet vodičů v drážce [-]
y	Cívkový krok [-]
β	Poměrné zkrácení kroku [-]
$k_{\nu\nu}$	Činitel vinutí ν -té harmonické [-]
$k_{r\nu}$	Činitel rozlohy ν -té harmonické [-]
$k_{y\nu}$	Činitel kroku ν -té harmonické [-]
C	Essonův činitel [$kVA/m^3 \text{min}^{-1}$]

l_e	Efektivní délka induktu [m]
L	Celková délka induktu [m]
b_d	Šířka drážky [mm]
h_d	Hloubka drážky [mm]
b_v	Šířka vodiče induktu [mm]
h_v	Výška vodiče induktu [mm]
S_{Cu1}	Průřez vodičů tvořící jeden závit [mm ²]
$R_{1/75}$	Odpor vinutí při 75 °C [Ω]
u_R	Procentní hodnota úbytku napětí na ohmickém odporu [%]
$u_\sigma = x_\sigma$	Procentní hodnota úbytku napětí na rozptylové reaktanci [%]
Φ	Magnetický tok [Vs]
δ	Vzduchová mezera [m]
F	Amplituda základní harmonické magnetického napětí [A]
k_{cd}	Cartéřův činitel respektující vliv drážkování induktu [-]
k_{ck}	Cartéřův činitel respektující vliv radiálních ventilačních kanálů [-]
k_c	Výsledná hodnota Cartérova činitele [-]
b_{vb}	Šířka vodiče budícího vinutí [mm]
h_{vb}	Výška vodiče budícího vinutí [mm]
S_{Cub}	Průřez vodiče budící cívky [mm ²]
N_b	Počet závitů budící cívky [-]
ΔP	Ztráty [W]
η	Účinnost [%]
$\Delta \vartheta$	Oteplení části stroje [°C]
ϑ	Oteplení chladiva [°C]
α	Součinitel přestupu tepla [W / °Cm ²]
R	Tepelný odpor [°C / W]

Úvod

Tato diplomová práce se zabývá návrhem dvou variant synchronního generátoru. Tyto dvě varianty mají shodné vstupní hodnoty, ale liší se od sebe vnitřním průměrem induktu (statoru). Obě varianty mají zadaný shodný zdánlivý výkon, sdružené napětí, počet pólů, fází a účinník.

Hned na začátku práce jsou určeny další shodné základní parametry obou variant a to činný výkon, fázové napětí a proud, synchronní rychlost, obvodová proudová hustota a indukce ve vzduchové mezeře. A také je určen průměr stroje, který je určen jak pomocí empirického vztahu pro výpočet, tak pomocí grafu. Aby bylo možné výsledky obou variant porovnávat, tak byly vybrány hodnoty odlišné od vypočtené a to nižší hodnota u první varianty a vyšší hodnota u druhé varianty.

Poté je proveden elektromagnetický výpočet obou variant. Na začátku se navrhují drážky a vinutí induktu. Následuje výpočet magnetického napětí reakce kotvy a grafické zpracování charakteristiky naprázdno, dále návrh magnetického obvodu rotoru, budící cívky a mezipólového rozptylu. Elektromagnetický výpočet končí výpočtem ztrát a účinnosti stroje.

Následují konstrukční výpočty, kde je proveden návrh hřídele, připevnění pólů, návrh kroužků a kartáčů, tlumiče a určení počtu mezipólových rozpěrek. Konec návrhu je věnován výpočtu oteplení, pomocí náhradních tepelných odporů některých částí stroje. Jsou zde sestrojeny také výkresy příčného a podélného řezu u obou variant.

Na konci práce je provedeno porovnání a vyhodnocení obou variant. Porovnávání jak hlavních tak vedlejších parametrů je provedeno pomocí tabulky. Byly porovnávány parametry, které by mohli mít vliv na výběr vhodnější varianty.

1. Elektromagnetický výpočet

1.1. Zadané hodnoty

Zdánlivý výkon:

$$S = 8000kVA \quad (1.1)$$

Sdružené napětí:

$$U = 6300V \quad (1.2)$$

Počet pólů:

$$2p = 10 \quad (1.3)$$

Počet fází:

$$m = 3 \quad (1.4)$$

Frekvence:

$$f = 50Hz \quad (1.5)$$

Účinník:

$$\cos\varphi = 0,8 \quad (1.6)$$

1.2. Základní hodnoty

Tyto hodnoty jsou shodné pro obě dvě varianty počítané v této diplomové práci.

Činný výkon:

$$P = S \cdot \cos\varphi = 8000 \cdot 0,8 = 6400kW \quad (1.7)$$

Fázové napětí:

$$U_f = \frac{U}{\sqrt{3}} = \frac{6300}{\sqrt{3}} = 3637V \quad (1.8)$$

Fázový proud:

$$I_1 = \frac{S}{U_s \sqrt{3}} = \frac{8000 \cdot 10^3}{6300 \cdot \sqrt{3}} = 733A \quad (1.9)$$

Počet pólpárů:

$$p = \frac{2p}{2} = \frac{10}{2} = 5 \quad (1.10)$$

Synchronní rychlost:

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{5} = 600\text{min}^{-1} \quad (1.11)$$

Průměr induktu ve vzduchové mezeře:

a) Podle empirického vztahu:

$$D_1 = 0,08 \cdot (2p)^{0,625} \cdot S^{0,185} = 0,08 \cdot 10^{0,625} \cdot 8000^{0,185} = 1,79m \quad (1.12)$$

b) Z grafu (Příloha 1):

$$D_1 = 1,95m \quad (1.13)$$

Pro první variantu jsem, po dohodě s vedoucím práce, zvolil průměr $D_1 = 1,6m$ a pro druhou variantu průměr $D_1 = 2,3m$.

Předběžná obvodová proudová hustota (Příloha 2):

$$A' = 65000A/m \quad (1.14)$$

Indukce ve vzduchové mezeře (Příloha 2):

$$B_\delta = 0,85T \quad (1.15)$$

[2]

2. Výpočet první varianty

2.1. Návrh vinutí induktu

2.1.1. Parametry vinutí

Pólová rozteč:

$$t_p = \frac{\pi \cdot D_1}{2p} = \frac{\pi \cdot 1600}{10} = 502 \text{ mm} \quad (2.1)$$

Volíme drážkovou rozteč:

$$t_{d1} = 40 \text{ mm} \quad (2.2)$$

Počet drážek induktu:

$$Q = \frac{\pi \cdot D_1}{t_{d1}} = \frac{\pi \cdot 1600}{40} = 125,7 \quad (2.3)$$

Volím počet paralelních větví a , ten se musí rovnat celému číslu a zároveň musí být dělitelný počtem pólů $p = 5$. Může tedy nabývat hodnot $a = 5; 10; 15$. Pro $a > 5$ by vycházel malý proud paralelní větví a měl bych zbytečně mnoho paralelních větví. Volím tedy $a = 5$

Pro zvolení počtu drážek induktu musím vycházet z toho, že Q musí být celé číslo a zároveň také $\frac{Q}{m \cdot a} = \frac{Q}{3 \cdot 5}$ musí být celé číslo. Q tedy může být jakékoliv celé číslo dělitelné 15. Jako hodnoty podobné vypočtené hodnotě jsem vybral $Q = 120; 135; 150$.

Pro potlačení vyšších harmonických je nutné snížit činitele rozlohy k_{rv} vyšších harmonických. To lze zvýšením počtu drážek na pól a fázi q , ale tím bych i příliš zvyšoval počet drážek Q . Volím tedy zlomkové q . A tím i počet drážek Q .

Počet drážek induktu:

$$Q = 135 \quad (2.4)$$

Počet drážek na pól a fázi:

$$q = \frac{Q}{2p \cdot m} = \frac{135}{10 \cdot 3} = \frac{9}{2} \quad (2.5)$$

Dále musí platit, že $\frac{2p}{a \cdot c}$ je celé číslo, kde c je jmenovatel zlomkového q .

$$\frac{2p}{a \cdot c} = \frac{10}{5 \cdot 2} = 1 \quad (2.6)$$

Podmínka je splněna.

Počet drážek na fázi se také musí rovnat celé číslo:

$$Q_f = \frac{Q}{m} = \frac{135}{3} = 45 \quad (2.7)$$

Podmínka také splněna.

[1]

Rozklad Q na činitele:

$$Q = 135 = 3 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 5 \quad (2.8)$$

Překladové číslo:

$$k = 3 \quad (2.9)$$

Počet segmentů:

$$n_{seg} = 9 \quad (2.10)$$

Počet drážek na překlad:

$$Q_{př} = 6 \quad (2.11)$$

Počet závitů jedné fáze v sérii:

$$N_s = \frac{\pi \cdot D_1 \cdot A}{2 \cdot m \cdot I_1} = \frac{\pi \cdot 1,6 \cdot 65000}{2 \cdot 3 \cdot 733} = 74,29 \quad (2.12)$$

Počet vodičů v drážce:

$$n_d = \frac{a \cdot N_s}{p \cdot q} = \frac{5 \cdot 74,29}{5 \cdot \frac{9}{2}} = 16,5 \quad (2.13)$$

Počet vodičů v drážce dvouvrstvého vinutí musí být sudé číslo, volím tedy $n_d = 16$.

Skutečná hodnota počtu závitů jedné fáze v sérii:

$$N_s = \frac{n_d \cdot p \cdot q}{a} = \frac{16 \cdot 5 \cdot \frac{9}{2}}{5} = 72 \quad (2.14)$$

Skutečná hodnota obvodové proudové hustoty:

$$A = \frac{2 \cdot m \cdot I_1}{\pi \cdot D_1} \cdot N_s = \frac{2 \cdot 3 \cdot 733}{\pi \cdot 1,6} \cdot 72 = 62997 \text{ A/m} \quad (2.15)$$

Počet drážek na pól:

$$Q_p = \frac{Q}{2p} = \frac{135}{10} = 13,5 \quad (2.16)$$

Volíme cívkový krok, který musí být celé číslo:

$$y_{1d} = (0,8 \div 0,86)Q_p \quad (2.17)$$

$$y_{1d} = 11 \quad (2.18)$$

Poměrné zkrácení kroku:

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

Matematický počet fází:

$$m' = 2 \cdot m = 2 \cdot 3 = 6 \quad (2.20)$$

Jelikož máme smyčkové nekřížené vinutí ($\Rightarrow \varepsilon = 0 \wedge \oplus$), tak se fiktivní krok na komutátoru vypočte takto:

$$y_k = \frac{\varepsilon \cdot K \pm a}{p} = \frac{0 \cdot K + 5}{5} = \frac{5}{5} = 1 \quad (2.21)$$

Přední cívkový krok v počtu cívkových stran:

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

Zadní cívkový krok v počtu cívkových stran:

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

Rozstříhání vinutí

Počet skupin vinutí:

$$S_c = a \cdot m' = 5 \cdot 6 = 30 \quad (2.24)$$

Počet skupin v jedné fázi:

$$S_f = \frac{S_c}{m} = \frac{30}{3} = 10 \quad (2.25)$$

Počet cívek ve skupině:

$$K_1 = \frac{Q}{S_c} = \frac{135}{30} = \frac{9}{2} \quad (2.26)$$

Vzorec pro výpočet činitelů:

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

Činitel vinutí základní harmonické:

$$k_{v1} = k_{y1} \cdot k_{r1} = \sin\left(1 \cdot \beta \cdot \frac{\pi}{2}\right) \cdot \frac{\sin\left(1 \cdot \frac{\pi}{m'}\right)}{n \cdot \sin\left(1 \cdot \frac{\pi}{m' \cdot n}\right)} = \quad (2.28)$$

$$\sin\left(1 \cdot 0,8148 \cdot \frac{\pi}{2}\right) \cdot \frac{\sin\left(1 \cdot \frac{\pi}{6}\right)}{9 \cdot \sin\left(1 \cdot \frac{\pi}{6 \cdot 9}\right)} = 0,9173$$

Činitelé vinutí dalších harmonických:

$$k_{v5} = 0,0225 \quad (2.29)$$

$$k_{v7} = -0,063 \quad (2.30)$$

$$k_{v11} = -0,0929 \quad (2.31)$$

$$k_{v13} = -0,0649 \quad (2.32)$$

Essonův činitel:

$$C = \frac{\pi^2}{60 \cdot \sqrt{2}} \cdot A \cdot B_{\delta} \cdot k_{v1} = \quad (2.33)$$

$$\frac{\pi^2}{60 \cdot \sqrt{2}} \cdot 62,996 \cdot 0,85 \cdot 0,9173 = 5,71 \text{ kVA} / \text{m}^3 \text{ min}^{-1}$$

Efektivní délka induktu:

$$l_e = \frac{S}{C \cdot D_1^2 \cdot n} = \frac{8000}{5,7 \cdot 1,6^2 \cdot 600} = 0,904 \text{ m} \approx 0,9 \text{ m} \quad (2.34)$$

Volíme šířku paketu a šířku chladicího kanálu:

$$\check{s}_p = 0,05 \text{ m} \quad (2.35)$$

$$\check{s}_k = 0,01 \text{ m} \quad (2.36)$$

Počet paketů:

$$i_p = \frac{l_e}{\check{s}_p} = \frac{0,9}{0,05} = 18 \quad (2.37)$$

Počet kanálů:

$$i_k = i_p - 1 = 18 - 1 = 17 \quad (2.38)$$

Celková délka induktu (včetně radiálních kanálů):

$$L = l_e + \check{s}_k \cdot i_k = 0,9 + 0,01 \cdot 17 = 1,07 \text{ m} \quad (2.39)$$

[2]

2.1.2. Návrh drážky

Velikost skutečné drážkové rozteče na vnitřním průměru induktu:

$$t_{d1} = \frac{\pi \cdot D_1}{Q} = \frac{\pi \cdot 1600}{135} = 37,23 \text{ mm} \quad (2.40)$$

Šířka zubu:

$$z_1 = \frac{B_\delta \cdot t_{d1}}{B'_{z1} \cdot k_{Fe}} = \frac{0,85 \cdot 37,23}{1,7 \cdot 0,92} = 20,23 \text{ mm} \quad (2.41)$$

Šířka drážky:

$$b_d = t_{d1} - z_1 = 37,23 - 20,23 = 17 \text{ mm} \quad (2.42)$$

Nejbližší normalizovaná šířka drážky pro tvar drážky M (Příloha 3) odpovídá b_d (Příloha 4):

$$b_d = 17 \text{ mm} \quad (2.43)$$

Konstanta K určená podle napětí (Příloha 5):

$$K = 190 \quad (2.44)$$

Přibližná tloušťka izolace na šířku drážky:

$$\sum_{izš} = 8 \text{ mm} \quad (2.45)$$

Šířka vodiče:

$$b_v = b_d - \sum_{izš} = 17 - 8 = 9 \text{ mm} \quad (2.46)$$

Předběžná proudová hustota ve vodiči:

$$\sigma'_{Cul} = \sqrt{\frac{K}{b_v}} = \sqrt{\frac{190}{9}} = 4,6 \text{ A/mm}^2 \quad (2.47)$$

Předběžný průřez vodiče:

$$S'_{Cul} = \frac{I_1}{a \cdot \sigma'_{Cul}} = \frac{733}{5 \cdot 4,6} = 31,8 \text{ mm}^2 \quad (2.48)$$

Předběžná výška vodiče:

$$h'_v = \frac{S'_{Cul}}{b_v} = \frac{31,86}{9} = 3,54 \text{ mm} \quad (2.49)$$

Abych nenavýšoval proudovou hustotu, zvolil jsem

$$h'_v = 4 \text{ mm}.$$

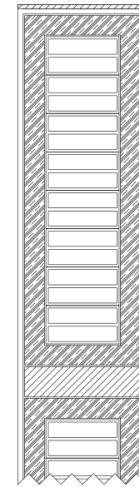
Zvolil jsem také počet vodičů na výšce $i = 2$ a počet

vodičů na šířku $j = 1$.

Takže konečný rozměr vodičů je (Příloha 6):

$$h_v = 2 \text{ mm} \quad (2.50)$$

$$b_v = 9 \text{ mm} \quad (2.51)$$



Obr. 1 – Uložení vodičů v drážce

Skutečný průřez jednoho vodiče je (Příloha 6):

$$S_1 = 17,4 \text{ mm}^2 \quad (2.52)$$

Výsledný průřez vodičů tvořící jeden závit je:

$$S_{Cul} = j \cdot i \cdot S_1 = 1 \cdot 2 \cdot 17,4 = 34,8 \text{ mm}^2 \quad (2.53)$$

Skutečná proudová hustota:

$$\sigma_{Cul} = \frac{I_1}{a \cdot S_{Cul}} = \frac{733}{5 \cdot 34,8} = 4,21 \text{ A/mm}^2 \quad (2.54)$$

Výpočet drážky jsem provedl v tabulce (Příloha 7).

Hodnota hloubky drážky, kterou jsem vypočítal:

$$h_d = 115 \text{ mm} \quad (2.55)$$

[2]

2.1.3. Vyložení čel

Rozměry vyložení čel jsou okótované v příloze (Příloha 23)

Výběh cívky z drážky v volím podle napětí (Příloha 8):

$$v = 55 \text{ mm} \quad (2.56)$$

Dále volím vnitřní poloměr oka r , který je závislý především na rozměrech vodiče:

$$r = 10 \text{ mm} \quad (2.57)$$

Výška čela:

$$h_{\varepsilon} = \frac{1}{2}(h_2 - m) = \frac{1}{2}(108 - 4) = 52 \text{ mm} \quad (2.58)$$

Střední poloměr oka:

$$R = r + \frac{h_{\varepsilon}}{2} = 10 + \frac{52}{2} = 36 \text{ mm} \quad (2.59)$$

Vzdálenost mezi čely:

$$c = 4 + \frac{U}{2} = 4 + \frac{6,3}{2} = 7,15 \text{ mm} \quad (2.60)$$

Úhel sklonu čel válcového vinutí:

$$\sin \alpha_{\varepsilon} = \frac{b_{\varepsilon} + c}{t_{d1}} = \frac{17 + 7,15}{37,23} = 0,648 \quad (2.61)$$

$$\alpha_{\varepsilon} = \arcsin 0,648 = 40,4^{\circ} \quad (2.62)$$

Délka šroubovice tvořící část čela:

$$x = \frac{\beta \cdot t_p}{2 \cdot \cos \alpha_{\varepsilon}} = \frac{0,81 \cdot 502}{2 \cdot \cos 40,4^{\circ}} = 267 \text{ mm} \quad (2.63)$$

Délka oka:

$$o = \frac{\pi \cdot R}{2} = \frac{\pi \cdot 36}{2} = 56,5 \text{ mm} \quad (2.64)$$

Délka čela:

$$l_{\varepsilon} = 2 \cdot (v + x + o) = 2 \cdot (55 + 267 + 56,5) = 757 \text{ mm} \quad (2.65)$$

Délka vodiče:

$$l_v = L_p + l_{\varepsilon} = 1070 + 757 = 1827 \text{ mm} \quad (2.66)$$

Délka oka v podélném směru:

$$e = h_{\varepsilon} + r = 52 + 10 = 62 \text{ mm} \quad (2.67)$$

Průmět x do osového směru:

$$y = \frac{\beta \cdot t_p}{2} \cdot \operatorname{tg} \alpha_\xi = \frac{0,81 \cdot 502}{2} \cdot \operatorname{tg} 40,4^\circ = 171 \text{ mm} \quad (2.68)$$

Celkové vyložení:

$$a_v = v + y + e = 55 + 171 + 62 = 288 \text{ mm} \quad (2.69)$$

[2]

2.1.4. Odpor a rozptylová reaktance vinutí

Elektrický odpor pro stejnosměrný proud při 20°C :

$$R'_{1/20} = \rho_{Cu} \frac{2 \cdot l_v \cdot N_s}{a \cdot S_{Cul}} = \frac{1}{56} \cdot \frac{2 \cdot 1,827 \cdot 72}{5 \cdot 34,8} = 0,027 \Omega \quad (2.70)$$

Vliv skin efektu

Náhradní výška vodiče:

$$\begin{aligned} \xi &= 2 \cdot \pi \cdot h_v \cdot \sqrt{\frac{j \cdot b_v \cdot f}{b_d \cdot \rho_{Cu}} \cdot 10^{-7}} = \\ &= 2 \cdot \pi \cdot 2 \cdot \sqrt{\frac{1 \cdot 9 \cdot 50}{17 \cdot \frac{1}{56}} \cdot 10^{-7}} = 0,15 \text{ mm} \end{aligned} \quad (2.71)$$

Celkový počet vodičů v drážce nad sebou:

$$g = i \cdot n_d = 2 \cdot 16 = 32 \quad (2.72)$$

Činitel zvýšení elektrického odporu:

$$k_{Cu} = \frac{g^2 - 0,2}{9} \cdot \xi^4 = \frac{32^2 - 0,2}{9} \cdot 0,15^4 = 0,06 \quad (2.73)$$

Odpor pro střídavý proud při 20°C :

$$R_{1/20} = (1 + k_{Cu}) \cdot R'_{1/20} = (1 + 0,06) \cdot 0,027 = 0,0286 \Omega \quad (2.74)$$

Odpor pro střídavý proud při 75°C :

$$R_{1/75} = 1,22 \cdot R_{1/20} = 1,22 \cdot 0,0286 = 0,0349 \Omega \quad (2.75)$$

Procentní hodnota úbytku napětí na ohmickém odporu:

$$u_R = \frac{R_{1/75} \cdot I_1}{U_f} \cdot 100 = \frac{0,0349 \cdot 733}{3637} \cdot 100 = 0,7\% \quad (2.76)$$

Rozptylová reaktance statorového vinutí:

$$\begin{aligned}
 X_{\sigma} &= \frac{(4 \cdot \pi)^2 \cdot f \cdot N_s^2 \cdot l_e}{p \cdot q} \cdot \left[\left(\frac{h'_2}{3 \cdot b_d} + \frac{h'_1}{b_d} \right) + \frac{l_{\xi}}{l_e} \cdot q \cdot \left(0,187 + 0,166 \cdot \frac{t_p}{l_{\xi}} \cdot \beta \right) \right] + \ln \left(1 + \frac{\pi \cdot z_1}{2 \cdot b_d} \right) \cdot 10^{-7} = \\
 &= \frac{(4 \cdot \pi)^2 \cdot 50 \cdot 72^2 \cdot 0,9}{5 \cdot 4,5} \cdot \left[\left(\frac{99,85}{3 \cdot 17} + \frac{10,5}{17} \right) + \frac{0,757}{0,9} \cdot 4,5 \cdot \left(0,187 + 0,166 \cdot \frac{0,502}{0,757} \cdot 0,81 \right) \right] + \\
 &\quad + \ln \left(1 + \frac{\pi \cdot 20,23}{2 \cdot 17} \right) \cdot 10^{-7} = 0,7654 \, \Omega
 \end{aligned} \tag{2.77}$$

Procentní hodnota úbytku napětí na rozptylové reaktanci:

$$u_{\sigma} = x_{\sigma} = \frac{X_{\sigma} \cdot I_1}{U_f} \cdot 100 = \frac{0,7654 \cdot 733}{3637} \cdot 100 = 15,4\% \tag{2.78}$$

[2]

2.2. Návrh magnetického obvodu

2.2.1. Magnetické napětí reakce kotvy

Magnetický tok:

$$\Phi = \frac{U_f}{4,44 \cdot f \cdot N_s \cdot k_{v1}} = \frac{3637}{4,44 \cdot 50 \cdot 72 \cdot 0,9153} = 0,249Vs \tag{2.79}$$

Kontrola podle rozměrů stroje:

$$\Phi = \frac{2}{\pi} \cdot t_p \cdot l_e \cdot B_{\delta} = \frac{2}{\pi} \cdot 0,502 \cdot 0,9 \cdot 0,85 = 0,245Vs \tag{2.80}$$

Hodnoty jsou téměř totožné, takže kontrola proběhla v pořádku, dále budu používat hodnotu magnetického toku $\Phi = 0,249Vs$

Procentní hodnotu nesyčené synchronní reaktance volím podle počtu pólů (Příloha 9):

$$x_d = 127\% \tag{2.81}$$

Velikost vzduchové mezery:

$$\delta = k \cdot \frac{A \cdot t_p}{B_{\delta}} \cdot \frac{10^{-6}}{x_d - x_{\sigma}} = 47 \cdot \frac{62997 \cdot 0,502}{0,85} \cdot \frac{10^{-6}}{127 - 15,4} = 0,0157m \tag{2.82}$$

Volím velikost vzduchové mezery zaokrouhlenou na 0,5mm:

$$\delta \approx 0,0155m = 15,5mm \tag{2.83}$$

Velikost vzduchové mezery na kraji pólu:

$$\delta_{\max} = 1,5 \cdot \delta = 1,5 \cdot 15,5 = 23 \text{ mm} \quad (2.84)$$

Pro výpočet amplitudy základní harmonické reakce kotvy F'_a , potřebuji nejdříve určit činitele základní harmonické magnetické indukce C_1 . Pro určení potřebuji několik hodnot, které využiji k odečtu hodnot z grafů:

$$\frac{\delta}{t_p} = \frac{15,7}{502} = 0,031 \quad (2.85)$$

$$\frac{\delta_{\max}}{\delta} = 1,5 \quad (2.86)$$

$$\alpha = 0,65 \quad (2.87)$$

Určení hodnot a a b (Příloha 10):

$$\frac{\delta}{t_p} \wedge \alpha \Rightarrow a = 1,14 \quad (2.88)$$

$$\frac{\delta}{t_p} \wedge \frac{\delta_{\max}}{\delta} \Rightarrow b = 0,905 \quad (2.89)$$

Činitel základní harmonické magnetické indukce:

$$C_1 = a \cdot b = 1,14 \cdot 0,905 = 1,0317 \quad (2.90)$$

Amplituda základní harmonické reakce kotvy:

$$\begin{aligned} F'_a &= \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{1}{C_1} \cdot A \cdot t_p \cdot k_{v1} = \\ &= \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{1}{1,0317} \cdot 62997 \cdot 0,502 \cdot 0,9153 = 12630 \text{ A} \end{aligned} \quad (2.91)$$

Pro výpočet amplitudy základní harmonické reakce kotvy v podélném F_{d1} a příčném F_{q1} směru, potřebuji nejdříve určit deformační činitele magnetického napětí v podélném C_{d1} a příčném C_{q1} směru.

Určení hodnot e , f , g a h (Příloha 11):

$$\frac{\delta}{t_p} \wedge \frac{\delta_{\max}}{\delta} \Rightarrow e = 0,81 \quad (2.92)$$

$$\alpha \wedge \frac{\delta_{\max}}{\delta} \Rightarrow f = 1,06 \quad (2.93)$$

$$\frac{\delta}{t_p} \wedge \alpha \Rightarrow g = 1,42 \quad (2.94)$$

$$\frac{\delta}{t_p} \wedge \frac{\delta_{\max}}{\delta} \Rightarrow h = 0,305 \quad (2.95)$$

Deformační činitel magnetického napětí v podélném směru:

$$C_{d1} = e \cdot f = 0,81 \cdot 1,06 = 0,8586 \quad (2.96)$$

Deformační činitel magnetického napětí v příčném směru:

$$C_{q1} = g \cdot h = 1,42 \cdot 0,305 = 0,4331 \quad (2.97)$$

Amplituda základní harmonické magnetického napětí v podélném směru:

$$F_{d1} = C_{d1} \cdot F'_a = 0,8586 \cdot 12630 = 10844A \quad (2.98)$$

Amplituda základní harmonické magnetického napětí v příčném směru:

$$F_{q1} = C_{q1} \cdot F'_a = 0,4331 \cdot 12630 = 5470A \quad (2.99)$$

[2]

2.2.2. Dimenzování magnetického obvodu

Výška těla pólu:

$$h_p = 0,3 \cdot t_p = 0,3 \cdot 0,502 = 0,151m \quad (2.100)$$

Výška pólového nástavce:

$$h_{n1} = 0,1 \cdot t_p = 0,1 \cdot 0,502 = 0,05m \quad (2.101)$$

Šířka těla pólu:

$$b_p = \frac{(1+\nu) \cdot \Phi}{B_p \cdot L_p} = \frac{(1+0,15) \cdot 0,249}{1,4 \cdot 1,07} = 0,191m \quad (2.102)$$

Šířka pólového nástavce:

$$b_n = \alpha \cdot t_p = 0,65 \cdot 0,502 = 0,326m \quad (2.103)$$

Výška jha rotoru:

$$h_{jr} = \frac{(1+\nu) \cdot \Phi}{2 \cdot B_{jr} \cdot L_r} = \frac{(1+0,15) \cdot 0,249}{2 \cdot 1,1 \cdot 1,205} = 0,146m \quad (2.104)$$

Výška jádra induktu:

$$h_{js} = \frac{\Phi}{2 \cdot B_{js} \cdot k_{Fe} \cdot l_e} = \frac{0,249}{2 \cdot 1,3 \cdot 0,92 \cdot 0,9} = 0,116m \quad (2.105)$$

Délka střední siločáry pólu:

$$l_p = h_p + h_{n1} = 0,151 + 0,05 = 0,201m \quad (2.106)$$

Délka střední siločáry jha rotoru:

$$\begin{aligned} l_r &= \frac{\pi \cdot [D_1 - 2 \cdot (\delta + l_p)]}{4 \cdot p} \\ &= \frac{\pi \cdot [1,6 - 2 \cdot (0,0155 + 0,201)]}{4 \cdot 5} = 0,183m \end{aligned} \quad (2.107)$$

Délka střední siločáry jádra induktu:

$$\begin{aligned} l_s &= \frac{\pi \cdot [D_1 + 2 \cdot (h_d + h_{js})]}{4 \cdot p} \\ &= \frac{\pi \cdot [1,6 + 2 \cdot (0,115 + 0,116)]}{4 \cdot 5} = 0,324m \end{aligned} \quad (2.108)$$

[2]

2.2.3. Charakteristika naprázdno

Pro výpočet Cartérova činitele k_c , potřebuji nejdříve určit Cartérova činitele respektujícího drážkování induktu k_{cd} . Pro určení potřebuji několik hodnot, které využiji k odečtu hodnot z grafů:

$$\frac{b_d}{z_1} = \frac{17}{20,23} = 0,84 \quad (2.109)$$

$$\frac{b_d}{\delta} = \frac{17}{15,5} = 1,1 \quad (2.110)$$

Cartérův činitel respektující vliv drážkování induktu určen z grafu (Příloha 12):

$$\frac{b_d}{z_1} \wedge \frac{b_d}{\delta} \Rightarrow k_{cd} = 1,082 \quad (2.111)$$

Cartérův činitel respektující vliv radiálních ventilačních kanálů:

$$k_{ck} = \frac{1}{1 + \frac{\delta}{2 + \delta} \cdot \frac{\check{s}_k \cdot i_p}{l_e}} = \frac{1}{1 + \frac{15,7}{2 + 15,7} \cdot \frac{10 \cdot 18}{900}} = 0,849 \quad (2.112)$$

Výsledná hodnota Cartérova činitele:

$$k_c = k_{cd} \cdot k_{ck} = 1,082 \cdot 0,849 = 0,918 \quad (2.113)$$

Magnetické napětí na vzduchové mezeře:

$$F_\delta = 0,8 \cdot k_c \cdot \delta \cdot B_\delta \cdot 10^6 = 0,8 \cdot 0,918 \cdot 0,0155 \cdot 0,85 \cdot 10^6 = 9801A \quad (2.114)$$

Vztahy použité pro výpočet hodnot charakteristiky naprázdno v tabulkách (Příloha 18):

$$t_{di} = \frac{\pi \cdot D_i}{Q} \quad (2.115)$$

$$z_i = t_{di} - b_d \quad (2.116)$$

$$k_{zi} = \frac{t_{di}}{z_i \cdot k_{Fe}} - 1 \quad (2.117)$$

$$B'_{zi} = \frac{B_\delta \cdot t_{di}}{z_i \cdot k_{Fe}} \quad (2.118)$$

$$H_{zstř} = \frac{H_{z1} + 4 \cdot H_{z2} + H_{z3}}{6} \quad (2.119)$$

$$F_z = H_{zstř} \cdot h_d \quad (2.120)$$

K výpočtu v tabulkách jsem použil nomogram k určení skutečné indukce v zubech induktu (Příloha 13) a graf závislosti magnetické indukce a intenzity magnetického pole (Příloha 14).

Zjištění budícího magnetického napětí jsem provedl grafickým způsobem (Příloha 20):

$$F_b = 22000A \quad (2.121)$$

[2]

2.2.4. Návrh budícího vinutí

Přesahující část pólového nástavce:

$$a = \frac{b_n - b_p}{2} = \frac{0,326 - 0,191}{2} = 0,067m \quad (2.122)$$

Střední délka závitu cívky:

$$l_{bs} = 2 \cdot (L_p + b_p + 2 \cdot a) = 2 \cdot (1,07 + 0,191 + 2 \cdot 0,067) = 2,79m \quad (2.123)$$

Předběžný průřez vodiče budící cívky:

$$S'_{Cub} = \frac{\rho_{Cu} \cdot l_{bs} \cdot 2p \cdot F_b}{0,9 \cdot U_b} = \frac{1}{56} \cdot 2,79 \cdot 10 \cdot 22000}{0,9 \cdot 65} = 200,2 \text{ mm}^2 \quad (2.124)$$

Volím rozměr vodiče:

$$b_{vb} \times h_{vb} = 60 \times 3,3 \text{ mm}^2 \quad (2.125)$$

Konečný průřez vodiče budící cívky:

$$S_{Cub} = b_{vb} \cdot h_{vb} = 60 \cdot 3,3 = 198 \text{ mm}^2 \quad (2.126)$$

Volím izolaci mezi vodiči:

$$t_i = 0,4 \text{ mm} \quad (2.127)$$

Volím proudovou hustotu:

$$\sigma_{Cub} = 2,25 \text{ A/mm}^2 \quad (2.128)$$

Budící proud:

$$I_b = \sigma_{Cub} \cdot S_{Cub} = 2,25 \cdot 198 = 445,5 \text{ A} \quad (2.129)$$

Počet závitů budící cívky:

$$N_b = \frac{F_b}{I_b} = \frac{22000}{445,5} = 52,75 \approx 53 \quad (2.130)$$

Výška cívky:

$$h_c = N_b \cdot h_{vb} + (N_b - 1) \cdot t_i = 53 \cdot 3,3 + (53 - 1) \cdot 0,4 = 195,7 \text{ mm} \quad (2.131)$$

Volím tloušťku kostřičky cívky:

$$t_k = 6 \text{ mm} \quad (2.132)$$

Výsledná výška těla pólu:

$$h_p = h_c + 2 \cdot t_k = 195,7 + 2 \cdot 6 = 207,7 \text{ mm} \quad (2.133)$$

[2]

2.2.5. Orientační výpočet oteplení budící cívky

Vnější obvod budící cívky:

$$l_{be} = 2 \cdot (L_p + b_p + 4 \cdot a) = 2 \cdot (1,07 + 0,191 + 4 \cdot 0,067) = 3,058m \quad (2.134)$$

Ochlazovací povrch všech cívek:

$$O_{2pc} = h_c \cdot l_{be} \cdot 2p = 0,2077 \cdot 3,058 \cdot 10 = 5,985m^2 \quad (2.135)$$

Odpor všech cívek budícího vinutí:

$$R_{b/75} = 1,22 \cdot \rho \cdot \frac{l_{bs} \cdot N_b \cdot 2p}{S_{Cub}} = 1,22 \cdot \frac{1}{56} \cdot \frac{2,79 \cdot 53 \cdot 10}{198} = 0,178\Omega \quad (2.136)$$

Ztráty v budícím vinutí:

$$\Delta P_{Cub} = R_{b/75} \cdot I_b^2 = 0,178 \cdot 445,5^2 = 35328W \quad (2.137)$$

Obvodová rychlost rotoru:

$$v_r = \frac{\pi \cdot D_1 \cdot n}{60} = \frac{\pi \cdot 1,6 \cdot 600}{60} = 50,27m/s \quad (2.138)$$

Třetina obvodové rychlosti rotoru:

$$\frac{v_r}{3} = \frac{50,27}{3} = 16,76m/s \quad (2.139)$$

Pro třetinovou obvodovou rychlost rotoru vychází součinitel přestupu tepla (Příloha 15).

$$\alpha_\delta = 95W/^\circ C m^2 \quad (2.140)$$

Oteplení cívky:

$$\vartheta_{Cub} = \frac{1,18 \cdot \Delta P_{Cub}}{\alpha_\delta \cdot O_{2pc}} = \frac{1,18 \cdot 35328}{95 \cdot 5,985} = 73,3^\circ C \quad (2.141)$$

[2]

2.2.6. Mezipólový rozptyl

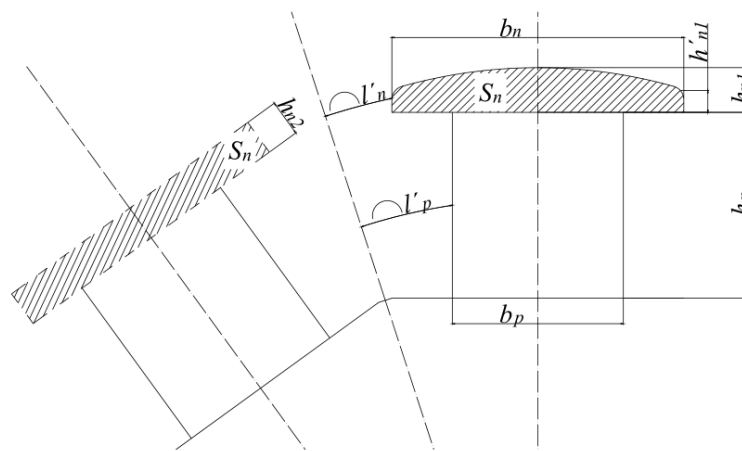
Hodnoty zjištěné z výkresové dokumentace (Příloha 24):

$$l'_p = 0,104m \quad (2.142)$$

$$l'_n = 0,074m \quad (2.143)$$

$$h'_{n1} = 0,026m \quad (2.144)$$

$$S_n = 0,01335 m^2 \quad (2.145)$$



Obr. 2 – Rozměry k určení mezipólového rozptylu

Náhradní výška pólového nástavce:

$$h_{n2} = \frac{S_n}{b_n} = \frac{0,01335}{0,326} = 0,041m \quad (2.146)$$

Délka pólu se započítanou šířkou cívky:

$$L_n = L_p + (b_n - b_p) = 1,07 + (0,326 - 0,191) = 1,205m \quad (2.147)$$

Magnetická vodivost rozptylového toku mezi boky pólových nástavců:

$$\Lambda_{\sigma bn} = \mu_0 \cdot \frac{h'_{n1} \cdot L_n}{l'_n} = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{0,026 \cdot 1,205}{0,074} = 5,21 \cdot 10^{-7} \quad (2.148)$$

Magnetická vodivost rozptylového toku mezi boky pólů:

$$\Lambda_{\sigma bp} = \frac{1}{2} \cdot \mu_0 \cdot \frac{h_p \cdot L_p}{l'_p} = \frac{1}{2} \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{0,208 \cdot 1,07}{0,104} = 13,38 \cdot 10^{-7} \quad (2.149)$$

Magnetická vodivost rozptylového toku mezi čely pólových nástavců:

$$\begin{aligned}\Lambda_{\sigma_{cn}} &= \mu_0 \cdot \frac{2}{\pi} \cdot h_{n2} \cdot \ln \frac{\pi \cdot \frac{b_n}{4} + l'_n}{l'_n} = \\ &= 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{2}{\pi} \cdot 0,041 \cdot \ln \frac{\pi \cdot \frac{0,326}{4} + 0,074}{0,074} = 0,49 \cdot 10^{-7}\end{aligned}\quad (2.150)$$

Magnetická vodivost rozptylového toku mezi čely pólů:

$$\begin{aligned}\Lambda_{\sigma_{cp}} &= \frac{\mu_0}{\pi} \cdot h_p \cdot \ln \frac{\pi \cdot \frac{b_p}{4} + l'_p}{l'_p} = \\ &= \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}}{\pi} \cdot 0,211 \cdot \ln \frac{\pi \cdot \frac{0,191}{4} + 0,104}{0,104} = 0,74 \cdot 10^{-7}\end{aligned}\quad (2.151)$$

Výsledná magnetická vodivost rozptylového toku:

$$\begin{aligned}\Lambda_{\sigma} &= 2 \cdot \Lambda_{\sigma_{cn}} + 2 \cdot \Lambda_{\sigma_{cp}} + 4 \cdot \Lambda_{\sigma_{cn}} + 4 \cdot \Lambda_{\sigma_{cp}} = \\ &= (2 \cdot 5,21 + 2 \cdot 13,38 + 4 \cdot 0,49 + 4 \cdot 0,74) \cdot 10^{-7} = 42,09 \cdot 10^{-7}\end{aligned}\quad (2.152)$$

Rozptylový magnetický tok:

$$\Phi_{\sigma} = F_{\sigma} \cdot \Lambda_{\sigma} = 10416 \cdot 42,09 \cdot 10^{-7} = 0,044 \text{Vs} \quad (2.153)$$

Činitel rozptylu:

$$\nu = \frac{\Phi_{\sigma}}{\Phi} = \frac{0,044}{0,249} = 0,176 = 17,6\% \quad (2.154)$$

[2]

2.3. Výpočet ztrát a účinnosti

Jouleovy ztráty ve vinutí induktu:

$$\Delta P_{Cul} = m \cdot R_{l/75} \cdot I_1^2 = 3 \cdot 0,0349 \cdot 733^2 = 56254 \text{W} \quad (2.155)$$

Jouleovy ztráty v budícím vinutí:

$$\Delta P_{Cub} = R_{b/75} \cdot I_b^2 = 0,178 \cdot 445,5^2 = 35328 \text{W} \quad (2.156)$$

Ztrátové číslo plechů:

$$\Delta p_{Fe} = 1,8 \text{W} / \text{kg} \quad (2.157)$$

Vnější průměr induktu:

$$D_{je} = D_1 + 2 \cdot (h_d + h_{js}) = 1,6 + 2 \cdot (0,115 + 0,1157) = 2,061m \quad (2.158)$$

Střední průměr induktu:

$$D_3 = D_1 + 2 \cdot h_d = 1,6 + 2 \cdot 0,115 = 1,83m \quad (2.159)$$

Hmotnost jádra induktu:

$$\begin{aligned} m_{Fej} &= \frac{\pi}{4} \cdot (D_{je}^2 - D_3^2) \cdot l_e \cdot k_{Fe} \cdot \rho_{Fe} = \\ &= \frac{\pi}{4} \cdot (2,061^2 - 1,83^2) \cdot 0,9 \cdot 0,92 \cdot 7800 = 4559kg \end{aligned} \quad (2.160)$$

Ztráty v železe v jádře induktu:

$$\begin{aligned} \Delta P_{Fej} &= 1,8 \cdot \Delta p_{Fe} \cdot B_{js}^2 \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} \cdot m_{Fej} = \\ &= 1,8 \cdot 1,8 \cdot 1,3^2 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1,3} \cdot 4559 = 24963W \end{aligned} \quad (2.161)$$

Hmotnost zubů induktu:

$$\begin{aligned} m_{Fez} &= Q \cdot z_2 \cdot h_d \cdot l_e \cdot k_{Fe} \cdot \rho_{Fe} = \\ &= 135 \cdot 0,02291 \cdot 0,115 \cdot 0,9 \cdot 0,92 \cdot 7800 = 2297kg \end{aligned} \quad (2.162)$$

Ztráty v železe v zubech induktu:

$$\begin{aligned} \Delta P_{Fez} &= 2 \cdot \Delta p_{Fe} \cdot B_{z2}^2 \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} \cdot m_{Fez} = \\ &= 2 \cdot 1,8 \cdot 1,61^2 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1,3} \cdot 2297 = 21434W \end{aligned} \quad (2.163)$$

Drážková frekvence:

$$f_d = \frac{Q \cdot n}{60} = \frac{135 \cdot 600}{60} = 1350Hz \quad (2.164)$$

Povrchové ztráty:

$$\Delta P_p = f_d^{1,5} \cdot B_\delta^2 = 1350^{1,5} \cdot 0,85^2 = 35837W \quad (2.165)$$

Mechanické ztráty:

$$\Delta P_m = v_r^{2,5} \cdot D_1 \cdot \sqrt{l_e} = 50,27^{2,5} \cdot 1,6 \cdot \sqrt{0,9} = 27197W \quad (2.166)$$

Přídavné ztráty:

$$\Delta P_{př} = 0,003 \cdot S = 0,003 \cdot 8000 \cdot 10^3 = 24000W \quad (2.167)$$

Celkové ztráty:

$$\begin{aligned} \Delta P &= \Delta P_{Cu1} + \Delta P_{Cu2} + \Delta P_{Fej} + \Delta P_{Fez} + \Delta P_p + \Delta P_m + \Delta P_{př} = \\ &= 56254 + 35328 + 24963 + 21434 + 35837 + 27197 + 24000 = \\ &= 225013W \end{aligned} \quad (2.168)$$

Účinnost:

$$\eta = 100 \cdot \left(1 - \frac{\Delta P}{P + \Delta P} \right) = 100 \cdot \left(1 - \frac{225013}{6,4 \cdot 10^6 + 225013} \right) = 96,36\% \quad (2.169)$$

[2]

2.4. Konstrukční výpočty

2.4.1. Návrh hřídele

Pevnostní kritérium:

$$d_{HP} = 0,135 \cdot \sqrt[3]{\frac{P}{n_s}} = 0,135 \cdot \sqrt[3]{\frac{6400}{600}} = 0,297m \quad (2.170)$$

Deformační kritérium:

$$d_{HD} = 0,135 \cdot \sqrt[4]{\frac{P}{n_s}} = 0,135 \cdot \sqrt[4]{\frac{6400}{600}} = 0,244m \quad (2.171)$$

Pro návrh hřídele použijí pevnostní kritérium $d_{H1} = d_{HP}$.

Hlavní průměr hřídele:

$$D_{H1} = 1,3 \cdot d_{H1} = 1,3 \cdot 0,297 = 0,386m \quad (2.172)$$

[2]

2.4.2. Připevnění pólů

Poloměr otáčení jha rotoru v ose pólu:

$$\begin{aligned} r_2 &= \frac{D_1}{2} - \delta - h_{n1} - h_p = \\ &= \frac{1,6}{2} - 0,0155 - 0,05 - 0,2077 = 0,5268m \end{aligned} \quad (2.173)$$

Poloměr otáčení těžiště těla pólu a budícího vinutí:

$$r_p = r_v = r_2 + \frac{h_p}{2} = 0,5268 + \frac{0,2077}{2} = 0,6307m \quad (2.174)$$

Poloměr otáčení těžiště pólového nástavce:

$$r_{n2} = r_2 + h_p + \frac{h_{n2}}{2} = 0,5268 + 0,2077 + \frac{0,041}{2} = 0,755m \quad (2.175)$$

Objem těla pólu:

$$V_p = S_p \cdot L_p = h_p \cdot b_p \cdot L_p = 0,2077 \cdot 0,191 \cdot 1,07 = 0,0424469m^3 \quad (2.176)$$

Objem budícího vinutí:

$$\begin{aligned} V_v &= S_v \cdot l_{bs} = S_{Cub} \cdot N_b \cdot l_{bs} = \\ &= 0,000198 \cdot 53 \cdot 2,79 = 0,02927826m^3 \end{aligned} \quad (2.177)$$

Objem pólového nástavce:

$$\begin{aligned} V_n &= S_n \cdot l_n = S_n \cdot (L_p + 2a) = \\ &= 0,01335 \cdot (1,07 + 2 \cdot 0,0675) = 0,01608675m^3 \end{aligned} \quad (2.178)$$

Hmotnost těla pólu:

$$m_p = \rho_{Fe} \cdot V_p = 7800 \cdot 0,0424469 = 331,086kg \quad (2.179)$$

Hmotnost budícího vinutí:

$$m_{Cub} = \rho_{Cu} \cdot V_v = 8900 \cdot 0,02927826 = 260,577kg \quad (2.180)$$

Hmotnost pólového nástavce:

$$m_n = \rho_{Fe} \cdot V_n = 7800 \cdot 0,01608675 = 125,477kg \quad (2.181)$$

Maximální otáčky:

$$n_{MAX} = 1,2 \cdot n_s = 1,2 \cdot 600 = 720 \text{ ot} / \text{min} \quad (2.182)$$

Maximální úhlová rychlost:

$$\omega_{MAX} = \frac{\pi \cdot n_{MAX}}{30} = \frac{\pi \cdot 720}{30} = 75,398 \text{ rad} / \text{s} \quad (2.183)$$

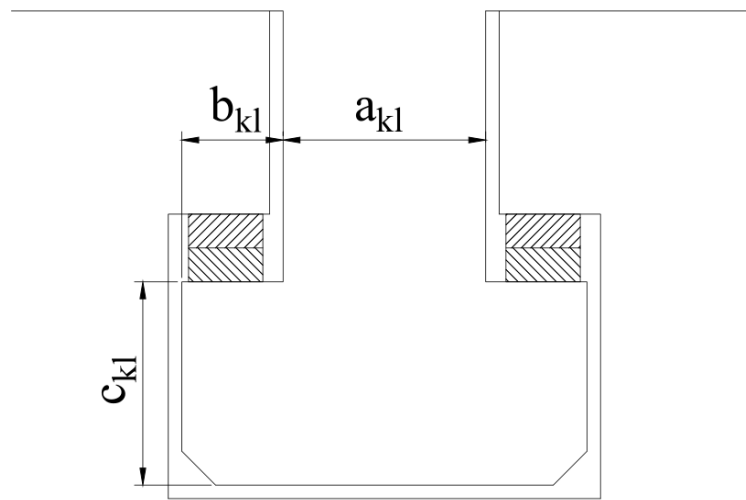
Velikost odstředivé síly pólu s cívkou:

$$\begin{aligned} F_p &= \omega_{MAX}^2 \cdot [(m_p + m_{Cub}) \cdot r_p + m_n \cdot r_n] = \\ &= 75,398^2 \cdot [(331,086 + 260,577) \cdot 0,6307 + 125,477 \cdot 0,755] = \\ &= 2\,659\,928\,N \end{aligned} \quad (2.184)$$

Síla na jednotku délky:

$$F_{p1} = \frac{F_p}{L_p} = \frac{2,659\,928 \cdot 10^6}{1,07} = 2,486 \cdot 10^6 \, N/m \quad (2.185)$$

$F_{p1} > (2 \div 2,5) \cdot 10^6 \, N/m \Rightarrow$ k připevnění použijí kladiva.



Obr. 3 – Rozměry kladiva

Návrh kladiva:

Šířka krčku:

$$a_{kl} = \frac{F_{p1}}{\sigma_{dov}} = \frac{2,486 \cdot 10^6}{130 \cdot 10^6} = 0,019\,m \quad (2.186)$$

Šířka přesahující části:

$$b_{kl} = \frac{a_{kl}}{2} = \frac{0,019}{2} = 0,0095\,m \quad (2.187)$$

Výška kladiva:

$$c_{kl} \approx a_{kl} = 0,019\,m \quad (2.188)$$

Kontrola kombinovaného namáhání:

$$\begin{aligned}\sigma_{c \max} &= \frac{F_{p1}}{c_{kl}} \cdot \left[\frac{3 \cdot b_{kl}}{4 \cdot c_{kl}} + \sqrt{1 + \left(\frac{3 \cdot b_{kl}}{4 \cdot c_{kl}} \right)^2} \right] = \\ &= \frac{2,486 \cdot 10^6}{0,019} \cdot \left[\frac{3 \cdot 0,0095}{4 \cdot 0,019} + \sqrt{1 + \left(\frac{3 \cdot 0,0095}{4 \cdot 0,019} \right)^2} \right] = 189 \cdot 10^6 \text{ Pa}\end{aligned}\quad (2.189)$$

Jelikož je $\sigma_{c \max} > \sigma_{dov} \Rightarrow$ musel jsem zvětšit rozměry kladiva, abych nepřekračoval dovolené namáhání.

Volím:

$$a_{kl} = 0,03 \text{ m} \quad (2.190)$$

Další rozměry:

$$b_{kl} = \frac{a_{kl}}{2} = \frac{0,03}{2} = 0,015 \text{ m} \quad (2.191)$$

$$c_{kl} \approx a_{kl} = 0,03 \text{ m} \quad (2.192)$$

Kontrola kombinovaného namáhání:

$$\begin{aligned}\sigma_{c \max} &= \frac{F_{p1}}{c_{kl}} \cdot \left[\frac{3 \cdot b_{kl}}{4 \cdot c_{kl}} + \sqrt{1 + \left(\frac{3 \cdot b_{kl}}{4 \cdot c_{kl}} \right)^2} \right] = \\ &= \frac{2,486 \cdot 10^6}{0,03} \cdot \left[\frac{3 \cdot 0,015}{4 \cdot 0,03} + \sqrt{1 + \left(\frac{3 \cdot 0,015}{4 \cdot 0,03} \right)^2} \right] = 120 \cdot 10^6 \text{ Pa}\end{aligned}\quad (2.193)$$

Kontrola proběhla v pořádku, protože $\sigma_{c \max} < \sigma_{dov}$, mohu pro kladiva použít tyto rozměry.

[2]

2.4.3. Kroužky a kartáče

Pro kartáče jsem použil materiál zvaný elektrografit, který má parametry popsané v tabulce (Příloha 16).

Celkový průřez kartáčů jedné polaroty:

$$S_k = \frac{I_b}{\sigma_k} = \frac{445,5}{10} = 44,55 \text{ cm}^2 = 4455 \text{ mm}^2 \quad (2.194)$$

Volím rozměry kartáčů z tabulky (Příloha 17).

$$b_k = 40 \text{ mm} \quad (2.195)$$

$$l_k = 20 \text{ mm} \quad (2.196)$$

Průřez jednoho kartáče:

$$S_{k1} = b_k \cdot l_k = 40 \cdot 20 = 800 \text{ mm}^2 \quad (2.197)$$

Počet kartáčů jedné polaroty na obvodu kroužku:

$$i_k = \frac{S_k}{S_{k1}} = \frac{4455}{800} = 5,57 \Rightarrow 6 \quad (2.198)$$

Vnější průměr kroužků volíme:

$$D_k = 1,3 \cdot d_{H1} = 1,3 \cdot 0,297 = 0,386 \text{ m} \quad (2.199)$$

Kontrola obvodové rychlosti kroužků:

$$v_k = \frac{\pi \cdot D_k \cdot n_{MAX}}{60} = \frac{\pi \cdot 0,386 \cdot 720}{60} = 14,55 \text{ m/s} \quad (2.200)$$

Kontrola proběhla v pořádku, protože $v_k < v_{MAX}$.

Kontrola rozteče kartáčů:

$$t_k = \frac{\pi \cdot D_k}{2 \cdot i_k} = \frac{\pi \cdot 0,386}{2 \cdot 6} = 0,101 \text{ m} \quad (2.201)$$

Kontrola proběhla v pořádku, protože $t_k \gg l_k$.

[2]

2.4.4. Návrh tlumiče

Rozteč tyčí, uvažovaná na obvodu statoru:

$$t'_t = 0,8 \cdot t_{d1} = 0,8 \cdot 37,2 = 29,8 \text{ mm} \quad (2.202)$$

Počet tyčí na pólovém nastavci:

$$Q_m = \frac{b_n}{t'_t} = \frac{326}{29,8} = 10,9 \Rightarrow 11 \quad (2.203)$$

Průřez všech tyčí:

$$S_t = 0,2 \cdot n_d \cdot Q \cdot S_{Cul} = 0,2 \cdot 16 \cdot 135 \cdot 34,8 = 15034 \text{ mm}^2 \quad (2.204)$$

Průřez jedné tyče:

$$S_{t1} = \frac{S_t}{2p \cdot Q_m} = \frac{15034}{10 \cdot 11} = 137 \text{ mm}^2 \quad (2.205)$$

Průměr tyče:

$$d_t = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{t1}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 137}{\pi}} = 13,2 \text{ mm} \quad (2.206)$$

Průřez kruhu:

$$\begin{aligned} S_k &= 0,45 \cdot S_{t1} \cdot Q_m = \\ &= 0,45 \cdot 137 \cdot 11 = 678 \text{ mm}^2 \approx 680 \text{ mm}^2 \end{aligned} \quad (2.207)$$

Rozměr kruhu:

$$10 \times 68 \text{ mm} \quad (2.208)$$

[2]

2.4.5. Určení počtu mezipólových rozpěrek

Vzdálenost těžiště cívky od osy pólu:

$$e = \frac{1}{2}(b_p + b_{vb}) + t_k = \frac{1}{2}(0,191 + 0,06) + 0,006 = 0,1315 \text{ m} \quad (2.209)$$

Rozteč rozpěrek:

$$t_r = \frac{1}{\omega_{MAX}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \sigma_{dov} \cdot b_{vb}}{\rho_{Cu} \cdot e}} = \frac{1}{75,398} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 35 \cdot 10^6 \cdot 0,06}{8900 \cdot 0,1315}} = 0,795 \text{ m} \quad (2.210)$$

Počet rozpěrek:

$$i = \frac{L_p}{t_r} - 1 = \frac{1,07}{0,795} - 1 = 0,346 \Rightarrow 1 \quad (2.211)$$

[2]

2.5. Výpočet oteplení kotvy

2.5.1. Drážková část

Hodnoty odečtené z výkresu (Příloha 24):

$$\delta_{iz} = 0,0037m \quad (2.212)$$

$$\delta'_{iz} = 0,0105m \quad (2.213)$$

$$z_1 = 0,0172m \quad (2.214)$$

$$z_{1s} = 0,0218m \quad (2.215)$$

$$z_2 = 0,0231m \quad (2.216)$$

$$z_{2s} = 0,0243m \quad (2.217)$$

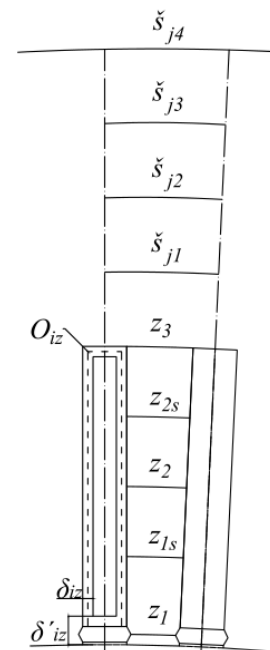
$$z_3 = 0,0256m \quad (2.218)$$

$$\check{s}_{j1} = 0,044 m \quad (2.219)$$

$$\check{s}_{j2} = 0,0453m \quad (2.220)$$

$$\check{s}_{j3} = 0,0466 m \quad (2.221)$$

$$\check{s}_{j4} = 0,048 m \quad (2.222)$$



Obr. 4 – Rozměry pro výpočet oteplení

Jouleovy ztráty v drážkách:

$$\Delta P_{Cud} = \frac{\Delta P_{Cu1} \cdot L_p}{l_v} = \frac{56254 \cdot 1,07}{1,827} = 32946W \quad (2.223)$$

Jouleovy ztráty v čelech:

$$\Delta P_{Cuč} = \frac{\Delta P_{Cu1} \cdot l_{\check{e}}}{l_v} = \frac{56254 \cdot 0,757}{1,827} = 23308W \quad (2.224)$$

Ztráty odváděné rotorovou větví:

$$\begin{aligned}\Delta P_{rv} &= \Delta P - (\Delta P_{Cu\check{c}} + \Delta P_m + \Delta P_{p\check{r}}) = \\ &= 225013 - (23308 + 27197 + 24000) = 150507W\end{aligned}\quad (2.225)$$

Předpoklad je že, se vzduch proudící kanálem ohřeje o $\Delta\vartheta = 15^\circ\text{C}$.

Objemové měrné teplo chladiva je $c_v = 1250 \text{Ws} / ^\circ\text{Cm}^3$.

Průtočné množství vzduchu všemi kanály:

$$Q_{rv} = \frac{\Delta P_{rv}}{c_v \cdot \Delta\vartheta} = \frac{150507}{1250 \cdot 15} = 8,0271 \text{m}^3 / \text{s} \quad (2.226)$$

Průtočné množství vzduchu na jeden kanál a drážkovou rozteč:

$$Q_{r1} = \frac{Q_{rv}}{Q \cdot i_p} = \frac{8,0271}{135 \cdot 18} = 0,0033 \text{m}^3 / \text{s} \quad (2.227)$$

Střední rychlost proudění v prostoru zubů:

$$v_{kz} = \frac{Q_{r1}}{z_2 \cdot \check{s}_k} = \frac{0,0033}{0,0231 \cdot 0,01} = 14,3 \text{m} / \text{s} \quad (2.228)$$

Střední rychlost proudění v prostoru jádra:

$$v_{kj} = \frac{Q_{r1}}{\check{s}_{j2} \cdot \check{s}_k} = \frac{0,0033}{0,0453 \cdot 0,01} = 7,3 \text{m} / \text{s} \quad (2.229)$$

Tomu odpovídají součinitele přestupu tepla (Příloha 15):

$$\alpha_z = 90 \text{W} / ^\circ\text{Cm}^2 \quad (2.230)$$

$$\alpha_j = 55 \text{W} / ^\circ\text{Cm}^2 \quad (2.231)$$

Odhad součinitele přestupu tepla na vnějším obvodu induktu:

$$\alpha_4 = 40 \text{W} / ^\circ\text{Cm}^2 \quad (2.232)$$

Ztráty ve vinutí tekoucí do uzlu:

$$\Delta P_{Cud1} = \frac{\Delta P_{Cud}}{2 \cdot Q \cdot i_p} = \frac{32946}{2 \cdot 135 \cdot 18} = 6,78 \text{W} \quad (2.233)$$

Ztráty v zubech tekoucí do uzlu:

$$\Delta P_{Fez1} = \frac{\Delta P_{Fez}}{2 \cdot Q \cdot i_p} = \frac{21434}{2 \cdot 135 \cdot 18} = 4,41W \quad (2.234)$$

Ztráty v jádru induktu tekoucí do uzlu:

$$\Delta P_{Fej1} = \frac{\Delta P_{Fej}}{2 \cdot Q \cdot i_p} = \frac{24963}{2 \cdot 135 \cdot 18} = 5,14W \quad (2.235)$$

Oteplení chladiva ve vzduchové mezeře:

$$g_{02} = g_0 + \frac{\Delta P_{Cub} + \Delta P_p}{c_v \cdot Q_{rv}} = 0 + \frac{35328 + 35837}{1250 \cdot 8,0271} = 7,09^\circ C \quad (2.236)$$

Oteplení chladiva v okolí zuby kanálu:

$$g_{01} = g_{02} + \frac{\Delta P_{Fez} + \Delta P_{Cud}}{2 \cdot c_v \cdot Q_{rv}} = 7,09 + \frac{21434 + 32946}{2 \cdot 1250 \cdot 8,0271} = 9,8^\circ C \quad (2.237)$$

Oteplení chladiva v okolí jádra kotvy kanálu:

$$\begin{aligned} g_{03} &= g_{02} + \frac{\Delta P_{Fez} + \Delta P_{Cud} + \frac{1}{2} \Delta P_{Fej}}{c_v \cdot Q_{rv}} = \\ &= 7,09 + \frac{21434 + 32946 + \frac{1}{2} 24963}{1250 \cdot 8,0271} = 13,76^\circ C \end{aligned} \quad (2.238)$$

Oteplení chladiva vystupujícího z kanálu:

$$\begin{aligned} g_{04} &= g_{02} + \frac{\Delta P_{Fez} + \Delta P_{Cud} + \Delta P_{Fej}}{c_v \cdot Q_{rv}} = \\ &= 7,09 + \frac{21434 + 32946 + 24963}{1250 \cdot 8,0271} = 15^\circ C \end{aligned} \quad (2.239)$$

Pro další výpočet použijeme následující konstanty:

$$\lambda_{iz} = 0,2 W/m^\circ C \quad (2.240)$$

$$\lambda_{Fed} = 45 W/m^\circ C \quad (2.241)$$

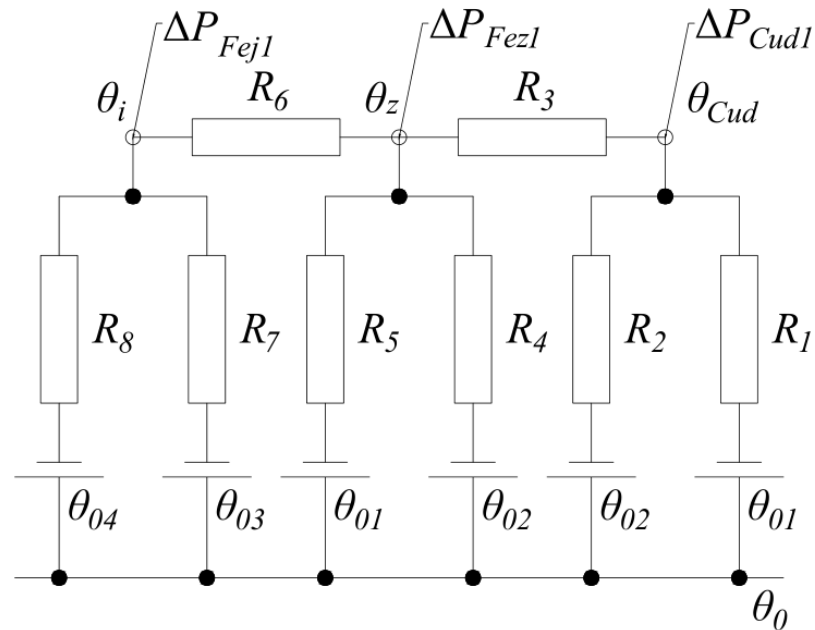
$$\lambda_{Feq} = 1 W/m^\circ C \quad (2.242)$$

$$\lambda_{vzd} = 0,028 W/m^\circ C \quad (2.243)$$

$$\delta_{vzd} = 0,0001\text{m} \quad (2.244)$$

Obvod cívky uvnitř kanálu:

$$O_{iz} = 2 \cdot h_d + b_d = 2 \cdot 0,115 + 0,017 = 0,247\text{m} \quad (2.245)$$



Obr. 5 – Náhradní tepelná síť drážkové části

Tepelný odpor z vinutí do ventilačního kanálu:

$$\begin{aligned} R_1 &= \frac{\delta_{iz}}{\lambda_{iz} \cdot O_{iz} \cdot \frac{\check{s}_k}{2}} + \frac{\delta_{vzd}}{\lambda_{vzd} \cdot O_{iz} \cdot \frac{\check{s}_k}{2}} + \frac{1}{\alpha_z \cdot O_{iz} \cdot \frac{\check{s}_k}{2}} = \\ &= \frac{0,0037}{0,2 \cdot 0,247 \cdot \frac{0,01}{2}} + \frac{0,0001}{0,028 \cdot 0,247 \cdot \frac{0,01}{2}} + \frac{1}{90 \cdot 0,247 \cdot \frac{0,01}{2}} = \\ &= 26,67^\circ\text{C}/\text{W} \end{aligned} \quad (2.246)$$

Tepelný odpor z vinutí do vzduchové mezery:

$$\begin{aligned} R_2 &= \frac{\delta'_{iz}}{\lambda_{iz} \cdot b_d \cdot \frac{\check{s}_t}{2}} + \frac{\delta_{vzd}}{\lambda_{vzd} \cdot b_d \cdot \frac{\check{s}_t}{2}} + \frac{1}{\alpha_\delta \cdot b_d \cdot \frac{\check{s}_t}{2}} = \\ &= \frac{0,0105}{0,2 \cdot 0,017 \cdot \frac{0,06}{2}} + \frac{0,0001}{0,028 \cdot 0,017 \cdot \frac{0,06}{2}} + \frac{1}{95 \cdot 0,017 \cdot \frac{0,06}{2}} = \\ &= 130,58^\circ\text{C}/\text{W} \end{aligned} \quad (2.247)$$

Tepelný odpor z vinutí do zubu:

$$\begin{aligned}
 R_3 &= \frac{\delta_{iz}}{\lambda_{iz} \cdot O_{iz} \cdot \frac{\check{s}_p}{2}} + \frac{\delta_{vzd}}{\lambda_{vzd} \cdot O_{iz} \cdot \frac{\check{s}_p}{2}} + \frac{\frac{z_2}{2}}{3 \cdot \lambda_{Fed} \cdot O_{iz} \cdot \frac{\check{s}_p}{2}} = \\
 &= \frac{0,0037}{0,2 \cdot 0,247 \cdot \frac{0,05}{2}} + \frac{0,0001}{0,028 \cdot 0,247 \cdot \frac{0,05}{2}} + \frac{0,0231}{3 \cdot 45 \cdot 0,247 \cdot \frac{0,05}{2}} = \\
 &= 3,55^\circ C / W
 \end{aligned} \tag{2.248}$$

Tepelný odpor ze zubu do vzduchové mezery:

$$\begin{aligned}
 R_4 &= \frac{\frac{h_d}{2}}{3 \cdot \lambda_{Feq} \cdot z_{1s} \cdot \frac{\check{s}_p}{2}} + \frac{1}{\alpha_\delta \cdot z_1 \cdot \frac{\check{s}_p}{2}} = \\
 &= \frac{0,115}{3 \cdot 1 \cdot 0,0218 \cdot \frac{0,05}{2}} + \frac{1}{95 \cdot 0,0172 \cdot \frac{0,05}{2}} = 59,65^\circ C / W
 \end{aligned} \tag{2.249}$$

Tepelný odpor ze zubu do ventilačního kanálu:

$$\begin{aligned}
 R_5 &= \frac{\frac{\check{s}_p}{2}}{3 \cdot \lambda_{Feq} \cdot z_2 \cdot h_d} + \frac{1}{\alpha_z \cdot z_2 \cdot h_d} = \\
 &= \frac{0,05}{3 \cdot 1 \cdot 0,0231 \cdot 0,115} + \frac{1}{90 \cdot 0,0231 \cdot 0,115} = 7,32^\circ C / W
 \end{aligned} \tag{2.250}$$

Tepelný odpor z plechů zubu do plechů jádra:

$$\begin{aligned}
 R_6 &= \frac{\frac{h_d}{2}}{3 \cdot \lambda_{Fed} \cdot z_{2s} \cdot \frac{\check{s}_p}{2}} + \frac{\frac{h_{js}}{2}}{3 \cdot \lambda_{Fed} \cdot \check{s}_{j1} \cdot \frac{\check{s}_p}{2}} = \\
 &= \frac{0,115}{3 \cdot 45 \cdot 0,0243 \cdot \frac{0,05}{2}} + \frac{0,163}{3 \cdot 45 \cdot 0,044 \cdot \frac{0,05}{2}} = 1,25^\circ C / W
 \end{aligned} \tag{2.251}$$

Tepelný odpor z plechů jádra do ventilačního kanálu:

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

$$= \frac{0,05}{2} + \frac{1}{55 \cdot 0,0453 \cdot 0,163} = 3,59^\circ C / W$$
(2.252)

Tepelný odpor z plechů jádra na vnější obvod statoru:

$$R_8 = \frac{\frac{h_{js}}{2}}{3 \cdot \lambda_{Fed} \cdot \check{s}_{j3} \cdot \frac{\check{s}_p}{2}} + \frac{1}{\alpha_4 \cdot \check{s}_{j4} \cdot \frac{\check{s}_p}{2}} =$$

$$= \frac{0,163}{2} + \frac{1}{40 \cdot 0,048 \cdot \frac{0,05}{2}} = 21,35^\circ C / W$$
(2.253)

Lineárně nezávislé rovnice pro výpočet hledaných teplot:

$$\frac{\vartheta_{Cud} - \vartheta_{01}}{R_1} + \frac{\vartheta_{Cud} - \vartheta_{02}}{R_2} + \frac{\vartheta_{Cud} - \vartheta_z}{R_3} = \Delta P_{Cud1}$$
(2.254)

$$\frac{\vartheta_z - \vartheta_{Cud}}{R_3} + \frac{\vartheta_z - \vartheta_{02}}{R_4} + \frac{\vartheta_z - \vartheta_{01}}{R_5} + \frac{\vartheta_z - \vartheta_j}{R_6} = \Delta P_{Fez1}$$
(2.255)

$$\frac{\vartheta_j - \vartheta_z}{R_6} + \frac{\vartheta_j - \vartheta_{03}}{R_7} + \frac{\vartheta_j - \vartheta_{04}}{R_8} = \Delta P_{Fej1}$$
(2.256)

Dosazení do rovnic:

$$\frac{\vartheta_{Cud} - 9,8}{26,67} + \frac{\vartheta_{Cud} - 7,09}{130,58} + \frac{\vartheta_{Cud} - \vartheta_z}{3,55} = 6,78$$
(2.257)

$$\frac{\vartheta_z - \vartheta_{Cud}}{3,55} + \frac{\vartheta_z - 7,09}{59,65} + \frac{\vartheta_z - 9,8}{7,32} + \frac{\vartheta_z - \vartheta_j}{1,25} = 4,41$$
(2.258)

$$\frac{\vartheta_j - \vartheta_z}{1,25} + \frac{\vartheta_j - 13,76}{3,59} + \frac{\vartheta_j - 15}{21,35} = 5,14$$
(2.259)

Úprava soustavy na základní tvar:

$$0,327 \cdot \vartheta_{Cud} - 0,282 \cdot \vartheta_z + 0 \cdot \vartheta_j = 7,2 \quad (2.260)$$

$$-0,282 \cdot \vartheta_{Cud} + 1,235 \cdot \vartheta_z - 0,8 \cdot \vartheta_j = 5,868 \quad (2.261)$$

$$0 \cdot \vartheta_{Cud} - 0,8 \cdot \vartheta_z + 1,125 \cdot \vartheta_j = 9,67 \quad (2.262)$$

Výpočet teplot jsem provedl pomocí programu Microsoft Excel.

Výsledné oteplení:

$$\vartheta_{Cud} = 60,6^\circ C \quad (2.263)$$

$$\vartheta_z = 44,7^\circ C \quad (2.264)$$

$$\vartheta_j = 40,4^\circ C \quad (2.265)$$

[2]

2.5.2. Čela vinutí

Ztráty v jednom čele cívky:

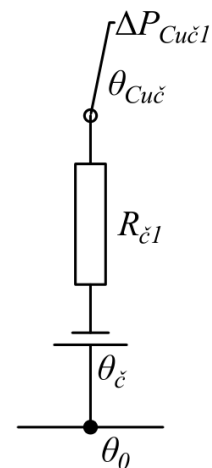
$$\Delta P_{Cu\check{c}1} = \frac{\Delta P_{Cu\check{c}}}{2 \cdot Q} = \frac{23308}{2 \cdot 135} = 86,33 W \quad (2.266)$$

Obvod čela:

$$O_\check{c} = 2 \cdot (h_\check{c} + b_d) = 2 \cdot (0,05 + 0,017) = 0,134 m \quad (2.267)$$

Odhad součinitele přestupu tepla čel $\alpha_\check{c} = 30 W / ^\circ C m^2$.

Tepelný odpor jednoho čela:



Obr. 6 – Náhradní tepelná síť části čel

$$\begin{aligned} R_{\check{c}1} &= \frac{\delta_{iz}}{\lambda_{iz} \cdot O_\check{c} \cdot l_\check{c}} + \frac{\delta_{vzd}}{\lambda_{vzd} \cdot O_\check{c} \cdot l_\check{c}} + \frac{1}{\alpha_\check{c} \cdot k \cdot O_\check{c} \cdot l_\check{c}} = \\ &= \frac{0,0037}{0,2 \cdot 0,134 \cdot 0,757} + \frac{0,0001}{0,028 \cdot 0,134 \cdot 0,757} + \frac{1}{30 \cdot 0,6 \cdot 0,134 \cdot 0,757} = \\ &= 0,73^\circ C / W \end{aligned} \quad (2.268)$$

Výsledné oteplení čela:

$$\vartheta_{Cu\check{c}} = \Delta P_{Cu\check{c}1} \cdot R_{\check{c}1} = 86,33 \cdot 0,73 = 63,2^\circ C \quad (2.269)$$

[2]

3. Výpočet druhé varianty

3.1. Návrh vinutí induktu

3.1.1. Parametry vinutí

Pólová rozteč:

$$t_p = \frac{\pi \cdot D_1}{2p} = \frac{\pi \cdot 2300}{10} = 723 \text{ mm} \quad (3.1)$$

Volíme drážkovou rozteč:

$$t_{d1} = 40 \text{ mm} \quad (3.2)$$

Počet drážek induktu:

$$Q = \frac{\pi \cdot D_1}{t_{d1}} = \frac{\pi \cdot 2300}{40} = 180,6 \quad (3.3)$$

Volím počet paralelních větví a , ten se musí rovnat celému číslu a zároveň musí být dělitelný počtem pólů $p = 5$. Může tedy nabývat hodnot $a = 5; 10; 15$. Pro $a > 5$ by vycházel malý proud paralelní větví a měl bych zbytečně mnoho paralelních větví. Volím tedy $a = 5$

Pro zvolení počtu drážek induktu musím vycházet z toho, že Q musí být celé číslo a zároveň také $\frac{Q}{m \cdot a} = \frac{Q}{3 \cdot 5}$ musí být celé číslo. Q tedy může být jakékoliv celé číslo dělitelné 15. Jako hodnoty podobné vypočtené hodnotě jsem vybral $Q = 180; 195; 210$.

Pro potlačení vyšších harmonických je nutné snížit činitele rozlohy k_{rv} vyšších harmonických. To lze zvýšením počtu drážek na pól a fázi q , ale tím bych i příliš zvyšoval počet drážek Q . Volím tedy zlomkové q . A tím i počet drážek Q .

Počet drážek induktu:

$$Q = 195 \quad (3.4)$$

Počet drážek na pól a fázi:

$$q = \frac{Q}{2p \cdot m} = \frac{195}{10 \cdot 3} = \frac{13}{2} \quad (3.5)$$

Dále musí platit, že $\frac{2p}{a \cdot c}$ je celé číslo, kde c je jmenovatel zlomkového q .

$$\frac{2p}{a \cdot c} = \frac{10}{5 \cdot 2} = 1 \quad (3.6)$$

Podmínka je splněna.

Počet drážek na fázi se také musí rovnat celé číslo:

$$Q_f = \frac{Q}{m} = \frac{195}{3} = 65 \quad (3.7)$$

Podmínka také splněna.

[1]

Rozklad Q na činitele:

$$Q = 195 = 3 \cdot 5 \cdot 13 \quad (3.8)$$

Překladové číslo:

$$k = 3 \quad (3.9)$$

Počet segmentů:

$$n_{seg} = 13 \quad (3.10)$$

Počet drážek na překlad:

$$Q_{př} = 5 \quad (3.11)$$

Počet závitů jedné fáze v sérii:

$$N_s = \frac{\pi \cdot D_1 \cdot A}{2 \cdot m \cdot I_1} = \frac{\pi \cdot 2,3 \cdot 65000}{2 \cdot 3 \cdot 733} = 106,79 \quad (3.12)$$

Počet vodičů v drážce:

$$n_d = \frac{a \cdot N_s}{p \cdot q} = \frac{5 \cdot 106,79}{5 \cdot \frac{13}{2}} = 16,4 \quad (3.13)$$

Počet vodičů v drážce dvouvrstvého vinutí musí být sudé číslo, volím tedy $n_d = 16$.

Skutečná hodnota počtu závitů jedné fáze v sérii:

$$N_s = \frac{n_d \cdot p \cdot q}{a} = \frac{16 \cdot 5 \cdot \frac{13}{2}}{5} = 104 \quad (3.14)$$

Skutečná hodnota obvodové proudové hustoty:

$$A = \frac{2 \cdot m \cdot I_1}{\pi \cdot D_1} \cdot N_s = \frac{2 \cdot 3 \cdot 733}{\pi \cdot 2,3} \cdot 104 = 63301 \text{ A/m} \quad (3.15)$$

Počet drážek na pól:

$$Q_p = \frac{Q}{2p} = \frac{195}{10} = 19,5 \quad (3.16)$$

Volíme cívkový krok, který musí být celé číslo:

$$y_{1d} = (0,8 \div 0,86)Q_p \quad (3.17)$$

$$y_{1d} = 16 \quad (3.18)$$

Poměrné zkrácení kroku:

$$\beta = \frac{y_{1d}}{Q_p} = \frac{16}{19,5} = 0,8205 \quad (3.19)$$

Matematický počet fází:

$$m' = 2 \cdot m = 2 \cdot 3 = 6 \quad (3.20)$$

Jelikož máme smyčkové nekřížené vinutí ($\Rightarrow \varepsilon = 0 \wedge \oplus$), tak se fiktivní krok na komutátoru vypočte takto:

$$y_k = \frac{\varepsilon \cdot K \pm a}{p} = \frac{0 \cdot K + 5}{5} = \frac{5}{5} = 1 \quad (3.21)$$

Přední cívkový krok v počtu cívkových stran:

$$y_1 = 2 \cdot u \cdot y_{1d} + 1 = 2 \cdot 16 + 1 = 33 \quad (3.22)$$

Zadní cívkový krok v počtu cívkových stran:

$$y_2 = 2 \cdot y_k - y_1 = 2 \cdot 1 - 33 = -31 \quad (3.23)$$

Rozstříhání vinutí

Počet skupin vinutí:

$$S_c = a \cdot m' = 5 \cdot 6 = 30 \quad (3.24)$$

Počet skupin v jedné fázi:

$$S_f = \frac{S_c}{m} = \frac{30}{3} = 10 \quad (3.25)$$

Počet cívek ve skupině:

$$K_1 = \frac{Q}{S_c} = \frac{195}{30} = \frac{13}{2} \quad (3.26)$$

Vzorec pro výpočet činitelů:

$$k_{vv} = k_{yv} \cdot k_{rv} = \sin\left(v \cdot \beta \cdot \frac{\pi}{2}\right) \cdot \frac{\sin\left(v \cdot \frac{\pi}{m'}\right)}{n \cdot \sin\left(v \cdot \frac{\pi}{m' \cdot n}\right)} \quad (3.27)$$

Činitel vinutí základní harmonické:

$$k_{v1} = k_{y1} \cdot k_{r1} = \sin\left(1 \cdot \beta \cdot \frac{\pi}{2}\right) \cdot \frac{\sin\left(1 \cdot \frac{\pi}{m'}\right)}{n \cdot \sin\left(1 \cdot \frac{\pi}{m' \cdot n}\right)} = \quad (3.28)$$

$$\sin\left(1 \cdot 0,8148 \cdot \frac{\pi}{2}\right) \cdot \frac{\sin\left(1 \cdot \frac{\pi}{6}\right)}{9 \cdot \sin\left(1 \cdot \frac{\pi}{6 \cdot 9}\right)} = 0,9175$$

Činitelé vinutí dalších harmonických:

$$k_{v5} = 0,0308 \quad (3.29)$$

$$k_{v7} = -0,0542 \quad (3.30)$$

$$k_{v11} = -0,0896 \quad (3.31)$$

$$k_{v13} = -0,0666 \quad (3.32)$$

Essonův činitel:

$$C = \frac{\pi^2}{60 \cdot \sqrt{2}} \cdot A \cdot B_{\delta} \cdot k_{v1} = \quad (3.33)$$

$$\frac{\pi^2}{60 \cdot \sqrt{2}} \cdot 63,301 \cdot 0,85 \cdot 0,9175 = 5,74 \text{ kVA} / \text{m}^3 \text{ min}^{-1}$$

Efektivní délka induktu:

$$l_e = \frac{S}{C \cdot D_1^2 \cdot n} = \frac{8000}{5,74 \cdot 2,3^2 \cdot 600} = 0,439 \text{ m} \approx 0,44 \text{ m} \quad (3.34)$$

Volíme šířku paketu a šířku chladicího kanálu:

$$\check{s}_p = 0,05 \text{ m} \quad (3.35)$$

$$\check{s}_k = 0,01 \text{ m} \quad (3.36)$$

Počet paketů:

$$i_p = \frac{l_e}{\check{s}_p} = \frac{0,44}{0,05} = 8,8 \Rightarrow 9 \quad (3.37)$$

$$l_e \Rightarrow 0,45 \text{ m} \quad (3.38)$$

Počet kanálů:

$$i_k = i_p - 1 = 9 - 1 = 8 \quad (3.39)$$

Celková délka induktu (včetně radiálních kanálů):

$$L = l_e + \check{s}_k \cdot i_k = 0,45 + 0,01 \cdot 8 = 0,53 \text{ m} \quad (3.40)$$

[2]

3.1.2. Návrh drážky

Velikost drážkové rozteče na vnitřním průměru induktu:

$$t_{d1} = \frac{\pi \cdot D_1}{Q} = \frac{\pi \cdot 2300}{195} = 37 \text{ mm} \quad (3.41)$$

Šířka zubu:

$$z_1 = \frac{B_\delta \cdot t_{d1}}{B'_{z1} \cdot k_{Fe}} = \frac{0,85 \cdot 37}{1,7 \cdot 0,92} = 20,1 \text{ mm} \quad (3.42)$$

Šířka drážky:

$$b_d = t_{d1} - z_1 = 37 - 20,1 = 16,9 \text{ mm} \quad (3.43)$$

Nejbližší normalizovaná šířka drážky pro tvar drážky M (Příloha 3) odpovídá b_d (Příloha 4):

$$b_d = 17 \text{ mm} \quad (3.44)$$

Skutečná šířka zubu na vnitřním průměru induktu:

$$z_1 = t_{d1} - b_d = 37 - 17 = 20 \text{ mm} \quad (3.45)$$

Konstanta K určená podle napětí (Příloha 5):

$$K = 190 \quad (3.46)$$

Přibližná tloušťka izolace na šířku drážky:

$$\sum_{izš} = 8 \text{ mm} \quad (3.47)$$

Šířka vodiče:

$$b_v = b_d - \sum_{izš} = 17 - 8 = 9 \text{ mm} \quad (3.48)$$

Předběžná proudová hustota ve vodiči:

$$\sigma'_{Cu1} = \sqrt{\frac{K}{b_v}} = \sqrt{\frac{190}{9}} = 4,6 \text{ A/mm}^2 \quad (3.49)$$

Předběžný průřez vodiče:

$$S'_{Cu1} = \frac{I_1}{a \cdot \sigma'_{Cu1}} = \frac{733}{5 \cdot 4,6} = 31,8 \text{ mm}^2 \quad (3.50)$$

Předběžná výška vodiče:

$$h'_v = \frac{S'_{Cu1}}{b_v} = \frac{31,86}{9} = 3,54 \text{ mm} \quad (3.51)$$

Abych nenavýšoval proudovou hustotu, zvolil jsem

$$h'_v = 4 \text{ mm}.$$

Zvolil jsem také počet vodičů na výšku $i = 2$ a počet

vodičů na šířku $j = 1$.

Takže konečný rozměr vodičů je (Příloha 6):

$$h_v = 2 \text{ mm} \quad (3.52)$$

$$b_v = 9 \text{ mm} \quad (3.53)$$

Skutečný průřez jednoho vodiče je (Příloha 6):

$$S_1 = 17,4 \text{ mm}^2 \quad (3.54)$$

Výsledný průřez vodičů tvořící jeden závit je:

$$S_{Cu1} = j \cdot i \cdot S_1 = 1 \cdot 2 \cdot 17,4 = 34,8 \text{ mm}^2 \quad (3.55)$$

Skutečná proudová hustota:

$$\sigma_{Cu1} = \frac{I_1}{a \cdot S_{Cu1}} = \frac{733}{5 \cdot 34,8} = 4,21 \text{ A/mm}^2 \quad (3.56)$$

Výpočet hloubky drážky jsem provedl v tabulce (Příloha 7).

Hodnota hloubky drážky, kterou jsem vypočítal:

$$h_d = 115 \text{ mm} \quad (3.57)$$

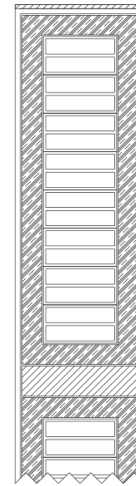
[2]

3.1.3. Vyložení čel

Rozměry vyložení čel jsou okótované v příloze (Příloha 23)

Výběh cívky z drážky v volím podle napětí (Příloha 8):

$$v = 55 \text{ mm} \quad (3.58)$$



Obr. 7 – Uložení vodičů v drážce

Dále volím vnitřní poloměr oka r , který je závislý především na rozměrech vodiče:

$$r = 10\text{mm} \quad (3.59)$$

Výška čela:

$$h_{\varepsilon} = \frac{1}{2}(h_2 - m) = \frac{1}{2}(108 - 4) = 52\text{mm} \quad (3.60)$$

Střední poloměr oka:

$$R = r + \frac{h_{\varepsilon}}{2} = 10 + \frac{52}{2} = 36\text{mm} \quad (3.61)$$

Vzdálenost mezi čely:

$$c = 4 + \frac{U}{2} = 4 + \frac{6,3}{2} = 7,15\text{mm} \quad (3.62)$$

Úhel sklonu čel válcového vinutí:

$$\sin \alpha_{\varepsilon} = \frac{b_{\varepsilon} + c}{t_{d1}} = \frac{17 + 7,15}{37} = 0,653 \quad (3.63)$$

$$\alpha_{\varepsilon} = \arcsin 0,653 = 40,7^{\circ} \quad (3.64)$$

Délka šroubovice tvořící část čela:

$$x = \frac{\beta \cdot t_p}{2 \cdot \cos \alpha_{\varepsilon}} = \frac{0,82 \cdot 723}{2 \cdot \cos 40,7^{\circ}} = 391\text{mm} \quad (3.65)$$

Délka oka:

$$o = \frac{\pi \cdot R}{2} = \frac{\pi \cdot 36}{2} = 56,5\text{mm} \quad (3.66)$$

Délka čela:

$$l_{\varepsilon} = 2 \cdot (v + x + o) = 2 \cdot (55 + 391 + 56,5) = 1005\text{mm} \quad (3.67)$$

Délka vodiče:

$$l_v = L_p + l_{\varepsilon} = 530 + 1005 = 1535\text{m} \quad (3.68)$$

Délka oka v podélném směru:

$$e = h_{\varepsilon} + r = 52 + 10 = 62\text{mm} \quad (3.69)$$

Průmět x do osového směru:

$$y = \frac{\beta \cdot t_p}{2} \cdot \operatorname{tg} \alpha_\varepsilon = \frac{0,82 \cdot 723}{2} \cdot \operatorname{tg} 40,7^\circ = 255 \text{ mm} \quad (3.70)$$

Celkové vyložení:

$$a_v = v + y + e = 55 + 255 + 62 = 372 \text{ mm} \quad (3.71)$$

[2]

3.1.4. Odpor a rozptylová reaktance vinutí

Elektrický odpor pro stejnosměrný proud při 20°C :

$$R'_{1/20} = \rho_{Cu} \frac{2 \cdot l_v \cdot N_s}{a \cdot S_{Cu1}} = \frac{1}{56} \cdot \frac{2 \cdot 1,535 \cdot 104}{5 \cdot 34,8} = 0,033 \Omega \quad (3.72)$$

Vliv skin efektu

Náhradní výška vodiče:

$$\begin{aligned} \xi &= 2 \cdot \pi \cdot h_v \cdot \sqrt{\frac{j \cdot b_v \cdot f}{b_d \cdot \rho_{Cu}} \cdot 10^{-7}} = \\ &= 2 \cdot \pi \cdot 2 \cdot \sqrt{\frac{1 \cdot 9 \cdot 50}{17 \cdot \frac{1}{56}} \cdot 10^{-7}} = 0,15 \text{ mm} \end{aligned} \quad (3.73)$$

Celkový počet vodičů v drážce nad sebou:

$$g = i \cdot n_d = 2 \cdot 16 = 32 \quad (3.74)$$

Činitel zvýšení elektrického odporu:

$$k_{Cu} = \frac{g^2 - 0,2}{9} \cdot \xi^4 = \frac{32^2 - 0,2}{9} \cdot 0,15^4 = 0,06 \quad (3.75)$$

Odpor pro střídavý proud při 20°C :

$$R_{1/20} = (1 + k_{Cu}) \cdot R'_{1/20} = (1 + 0,06) \cdot 0,033 = 0,035 \Omega \quad (3.76)$$

Odpor pro střídavý proud při 75°C :

$$R_{1/75} = 1,22 \cdot R_{1/20} = 1,22 \cdot 0,035 = 0,0427 \Omega \quad (3.77)$$

Procentní hodnota úbytku napětí na ohmickém odporu:

$$u_R = \frac{R_{1/75} \cdot I_1}{U_f} \cdot 100 = \frac{0,0427 \cdot 733}{3637} \cdot 100 = 0,86\% \quad (3.78)$$

Rozptylová reaktance statorového vinutí:

$$\begin{aligned}
 X_{\sigma} &= \frac{(4 \cdot \pi)^2 \cdot f \cdot N_s^2 \cdot l_e}{p \cdot q} \cdot \left[\left(\frac{h'_2}{3 \cdot b_d} + \frac{h'_1}{b_d} \right) + \frac{l_{\xi}}{l_e} \cdot q \cdot \left(0,187 + 0,166 \cdot \frac{t_p}{l_{\xi}} \cdot \beta \right) \right] + \ln \left(1 + \frac{\pi \cdot z_1}{2 \cdot b_d} \right) \cdot 10^{-7} = \\
 &= \frac{(4 \cdot \pi)^2 \cdot 50 \cdot 104^2 \cdot 0,45}{5 \cdot 6,5} \cdot \left[\left(\frac{99,85}{3 \cdot 17} + \frac{10,5}{17} \right) + \frac{1,005}{0,45} \cdot 6,5 \cdot \left(0,187 + 0,166 \cdot \frac{0,723}{1,005} \cdot 0,82 \right) \right] + \\
 &\quad + \ln \left(1 + \frac{\pi \cdot 20}{2 \cdot 17} \right) \cdot 10^{-7} = 0,9174 \text{ } \Omega
 \end{aligned} \tag{3.79}$$

Procentní hodnota úbytku napětí na rozptylové reaktanci:

$$u_{\sigma} = x_{\sigma} = \frac{X_{\sigma} \cdot I_1}{U_f} \cdot 100 = \frac{0,9174 \cdot 733}{3637} \cdot 100 = 18,49\% \tag{3.80}$$

[2]

3.2. Návrh magnetického obvodu

3.2.1. Magnetické napětí reakce kotvy

Magnetický tok:

$$\Phi = \frac{U_f}{4,44 \cdot f \cdot N_s \cdot k_{v1}} = \frac{3637}{4,44 \cdot 50 \cdot 104 \cdot 0,9173} = 0,172Vs \tag{3.81}$$

Kontrola podle rozměrů stroje:

$$\Phi = \frac{2}{\pi} \cdot t_p \cdot l_e \cdot B_{\delta} = \frac{2}{\pi} \cdot 0,723 \cdot 0,45 \cdot 0,85 = 0,176Vs \tag{3.82}$$

Hodnoty jsou téměř totožné, takže kontrola proběhla v pořádku, dále budu používat hodnotu magnetického toku $\Phi = 0,172Vs$

Procentní hodnotu nesyčené synchronní reaktance volím podle počtu pólů (Příloha 9):

$$x_d = 127\% \tag{3.83}$$

Velikost vzduchové mezery:

$$\delta = k \cdot \frac{A \cdot t_p}{B_{\delta}} \cdot \frac{10^{-6}}{x_d - x_{\sigma}} = 47 \cdot \frac{63301 \cdot 0,723}{0,85} \cdot \frac{10^{-6}}{127 - 18,49} = 0,0232m \tag{3.84}$$

Volím velikost vzduchové mezery zaokrouhlenou na 0,5mm:

$$\delta \approx 0,0232m = 23mm \tag{3.85}$$

Velikost vzduchové mezery na kraji pólu:

$$\delta_{\max} = 1,5 \cdot \delta = 1,5 \cdot 23 = 34,5 \text{ mm} \quad (3.86)$$

Pro výpočet amplitudy základní harmonické reakce kotvy F'_a , potřebuji nejdříve určit činitele základní harmonické magnetické indukce C_1 . Pro určení potřebuji několik hodnot, které využiji k odečtu hodnot z grafů:

$$\frac{\delta}{t_p} = \frac{23}{723} = 0,032 \quad (3.87)$$

$$\frac{\delta_{\max}}{\delta} = 1,5 \quad (3.88)$$

$$\alpha = 0,65 \quad (3.89)$$

Určení hodnot a a b (Příloha 10):

$$\frac{\delta}{t_p} \wedge \alpha \Rightarrow a = 1,145 \quad (3.90)$$

$$\frac{\delta}{t_p} \wedge \frac{\delta_{\max}}{\delta} \Rightarrow b = 0,91 \quad (3.91)$$

Činitel základní harmonické magnetické indukce:

$$C_1 = a \cdot b = 1,145 \cdot 0,91 = 1,0419 \quad (3.92)$$

Amplituda základní harmonické reakce kotvy:

$$\begin{aligned} F'_a &= \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{1}{C_1} \cdot A \cdot t_p \cdot k_{v1} = \\ &= \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{1}{1,0419} \cdot 63301 \cdot 0,723 \cdot 0,9173 = 18138 \text{ A} \end{aligned} \quad (3.93)$$

Pro výpočet amplitudy základní harmonické reakce kotvy v podélném F_{d1} a příčném F_{q1} směru, potřebuji nejdříve určit deformační činitele magnetického napětí v podélném C_{d1} a příčném C_{q1} směru.

Určení hodnot e , f , g a h (Příloha 11):

$$\frac{\delta}{t_p} \wedge \frac{\delta_{\max}}{\delta} \Rightarrow e = 0,815 \quad (3.94)$$

$$\alpha \wedge \frac{\delta_{\max}}{\delta} \Rightarrow f = 1,06 \quad (3.95)$$

$$\frac{\delta}{t_p} \wedge \alpha \Rightarrow g = 1,41 \quad (3.96)$$

$$\frac{\delta}{t_p} \wedge \frac{\delta_{\max}}{\delta} \Rightarrow h = 0,31 \quad (3.97)$$

Deformační činitel magnetického napětí v podélném směru:

$$C_{d1} = e \cdot f = 0,815 \cdot 1,06 = 0,8639 \quad (3.98)$$

Deformační činitel magnetického napětí v příčném směru:

$$C_{q1} = g \cdot h = 1,41 \cdot 0,31 = 0,4371 \quad (3.99)$$

Amplituda základní harmonické magnetického napětí v podélném směru:

$$F_{d1} = C_{d1} \cdot F'_a = 0,8639 \cdot 18138 = 15670A \quad (3.100)$$

Amplituda základní harmonické magnetického napětí v příčném směru:

$$F_{q1} = C_{q1} \cdot F'_a = 0,4371 \cdot 18138 = 7928A \quad (3.101)$$

[2]

3.2.2. Dimenzování magnetického obvodu

Výška těla pólu:

$$h_p = 0,3 \cdot t_p = 0,3 \cdot 0,723 = 0,217m \quad (3.102)$$

Výška pólového nástavce:

$$h_{m1} = 0,1 \cdot t_p = 0,1 \cdot 0,723 = 0,072m \quad (3.103)$$

Šířka těla pólu:

$$b_p = \frac{(1+\nu) \cdot \Phi}{B_p \cdot L_p} = \frac{(1+0,15) \cdot 0,172}{1,4 \cdot 0,53} = 0,267m \quad (3.104)$$

Šířka pólového nástavce:

$$b_n = \alpha \cdot t_p = 0,65 \cdot 0,723 = 0,47m \quad (3.105)$$

Výška jha rotoru:

$$h_{jr} = \frac{(1+\nu) \cdot \Phi}{2 \cdot B_{jr} \cdot L_r} = \frac{(1+0,15) \cdot 0,172}{2 \cdot 1,1 \cdot 0,733} = 0,123m \quad (3.106)$$

Výška jádra induktu:

$$h_{js} = \frac{\Phi}{2 \cdot B_{js} \cdot k_{Fe} \cdot l_e} = \frac{0,172}{2 \cdot 1,3 \cdot 0,92 \cdot 0,45} = 0,163m \quad (3.107)$$

Délka střední siločáry pólu:

$$l_p = h_p + h_{n1} = 0,217 + 0,072 = 0,289m \quad (3.108)$$

Délka střední siločáry jha rotoru:

$$\begin{aligned} l_r &= \frac{\pi \cdot [D_1 - 2 \cdot (\delta + l_p)]}{4 \cdot p} \\ &= \frac{\pi \cdot [2,3 - 2 \cdot (0,023 + 0,289)]}{4 \cdot 5} = 0,263m \end{aligned} \quad (3.109)$$

Délka střední siločáry jádra induktu:

$$\begin{aligned} l_s &= \frac{\pi \cdot [D_1 + 2 \cdot (h_d + h_{js})]}{4 \cdot p} \\ &= \frac{\pi \cdot [2,3 + 2 \cdot (0,115 + 0,163)]}{4 \cdot 5} = 0,449m \end{aligned} \quad (3.110)$$

[2]

3.2.3. Charakteristika naprázdno

Pro výpočet Cartérova činitele k_c , potřebuji nejdříve určit Cartérova činitele respektujícího drážkování induktu k_{cd} . Pro určení potřebuji několik hodnot, které využiji k odečtu hodnot z grafů:

$$\frac{b_d}{z_1} = \frac{17}{20} = 0,85 \quad (3.111)$$

$$\frac{b_d}{\delta} = \frac{17}{23} = 0,74 \quad (3.112)$$

Cartérův činitel respektující vliv drážkování induktu určen z grafu (Příloha 12):

$$\frac{b_d}{z_1} \wedge \frac{b_d}{\delta} \Rightarrow k_{cd} = 1,056 \quad (3.113)$$

Cartérův činitel respektující vliv radiálních ventilačních kanálů:

$$k_{ck} = \frac{1}{1 + \frac{\delta}{2 + \delta} \cdot \frac{\check{s}_k \cdot i_p}{l_e}} = \frac{1}{1 + \frac{23}{2 + 23} \cdot \frac{10 \cdot 9}{450}} = 0,845 \quad (3.114)$$

Výsledná hodnota Cartérova činitele:

$$k_c = k_{cd} \cdot k_{ck} = 1,056 \cdot 0,845 = 0,892 \quad (3.115)$$

Magnetické napětí na vzduchové mezeře:

$$F_\delta = 0,8 \cdot k_c \cdot \delta \cdot B_\delta \cdot 10^6 = 0,8 \cdot 0,892 \cdot 0,023 \cdot 0,85 \cdot 10^6 = 13951 \text{ A} \quad (3.116)$$

Vztahy použité pro výpočet hodnot charakteristiky naprázdno v tabulkách (Příloha 19):

$$t_{di} = \frac{\pi \cdot D_i}{Q} \quad (3.117)$$

$$z_i = t_{di} - b_d \quad (3.118)$$

$$k_{zi} = \frac{t_{di}}{z_i \cdot k_{Fe}} - 1 \quad (3.119)$$

$$B'_{zi} = \frac{B_\delta \cdot t_{di}}{z_i \cdot k_{Fe}} \quad (3.120)$$

$$H_{zstř} = \frac{H_{z1} + 4 \cdot H_{z2} + H_{z3}}{6} \quad (3.121)$$

$$F_z = H_{zstř} \cdot h_d \quad (3.122)$$

K výpočtu v tabulkách jsem použil nomogram k určení skutečné indukce v zubech induktu (Příloha 13) a graf závislosti magnetické indukce a intenzity magnetického pole (Příloha 14).

Zjištění budícího magnetického napětí jsem provedl grafickým způsobem (Příloha 21):

$$F_b = 31800 \text{ A} \quad (3.123)$$

[2]

3.2.4. Návrh budícího vinutí

Přesahující část pólového nástavce:

$$a = \frac{b_n - b_p}{2} = \frac{0,47 - 0,267}{2} = 0,102 \text{ m} \quad (3.124)$$

Střední délka závitu cívky:

$$l_{bs} = 2 \cdot (L_p + b_p + 2 \cdot a) = 2 \cdot (0,53 + 0,267 + 2 \cdot 0,102) = 2,002 \text{ m} \quad (3.125)$$

Předběžný průřez vodiče budící cívky:

$$S'_{Cub} = \frac{\rho_{Cu} \cdot l_{bs} \cdot 2p \cdot F_b}{0,9 \cdot U_b} = \frac{1}{56} \cdot \frac{2,002 \cdot 10 \cdot 31800}{0,9 \cdot 65} = 194,3 \text{ mm}^2 \quad (3.126)$$

Volím rozměr vodiče:

$$b_{vb} \times h_{vb} = 94 \times 2,1 \text{ mm}^2 \quad (3.127)$$

Konečný průřez vodiče budící cívky:

$$S_{Cub} = b_{vb} \cdot h_{vb} = 94 \cdot 2,1 = 197,4 \text{ mm}^2 \quad (3.128)$$

Volím izolaci mezi vodiči:

$$t_i = 0,4 \text{ mm} \quad (3.129)$$

Volím proudovou hustotu:

$$\sigma_{Cub} = 2,1 \text{ A/mm}^2 \quad (3.130)$$

Budící proud:

$$I_b = \sigma_{Cub} \cdot S_{Cub} = 2,1 \cdot 197,4 = 414,5 \text{ A} \quad (3.131)$$

Počet závitů budící cívky:

$$N_b = \frac{F_b}{I_b} = \frac{31800}{414,5} = 76,71 \approx 77 \quad (3.132)$$

Výška cívky:

$$h_c = N_b \cdot h_{vb} + (N_b - 1) \cdot t_i = 77 \cdot 2,1 + (77 - 1) \cdot 0,4 = 192,1 \text{ mm} \quad (3.133)$$

Volím tloušťku kostřičky cívky:

$$t_k = 6 \text{ mm} \quad (3.134)$$

Výsledná výška těla pólu:

$$h_p = h_c + 2 \cdot t_k = 192,1 + 2 \cdot 6 = 204,1 \text{ mm} \quad (3.135)$$

[2]

3.2.5. Orientační výpočet oteplení budící cívky

Vnější obvod budící cívky:

$$l_{be} = 2 \cdot (L_p + b_p + 4 \cdot a) = 2 \cdot (0,53 + 0,267 + 4 \cdot 0,102) = 2,41m \quad (3.136)$$

Ochlazovací povrch všech cívek:

$$O_{2pc} = h_c \cdot l_{be} \cdot 2p = 0,1921 \cdot 2,41 \cdot 10 = 4,63m^2 \quad (3.137)$$

Odpor všech cívek budícího vinutí:

$$R_{b/75} = 1,22 \cdot \rho \cdot \frac{l_{bs} \cdot N_b \cdot 2p}{S_{Cub}} = 1,22 \cdot \frac{1}{56} \cdot \frac{2,002 \cdot 77 \cdot 10}{197,4} = 0,205\Omega \quad (3.138)$$

Ztráty v budícím vinutí:

$$\Delta P_{Cub} = R_{b/75} \cdot I_b^2 = 0,205 \cdot 414,5^2 = 35194W \quad (3.139)$$

Obvodová rychlost rotoru:

$$v_r = \frac{\pi \cdot D_1 \cdot n}{60} = \frac{\pi \cdot 2,3 \cdot 600}{60} = 72,26m/s \quad (3.140)$$

Třetina obvodové rychlosti rotoru:

$$\frac{v_r}{3} = \frac{72,26}{3} = 24,09m/s \quad (3.141)$$

Pro třetinovou obvodovou rychlost rotoru vychází součinitel přestupu tepla (Příloha 15):

$$\alpha_\delta = 120W / ^\circ C m^2 \quad (3.142)$$

Oteplení cívky:

$$\vartheta_{Cub} = \frac{1,18 \cdot \Delta P_{Cub}}{\alpha_\delta \cdot O_{2pc}} = \frac{1,18 \cdot 35194}{120 \cdot 4,63} = 74,8^\circ C \quad (3.143)$$

[2]

3.2.6. Mezipólový rozptyl

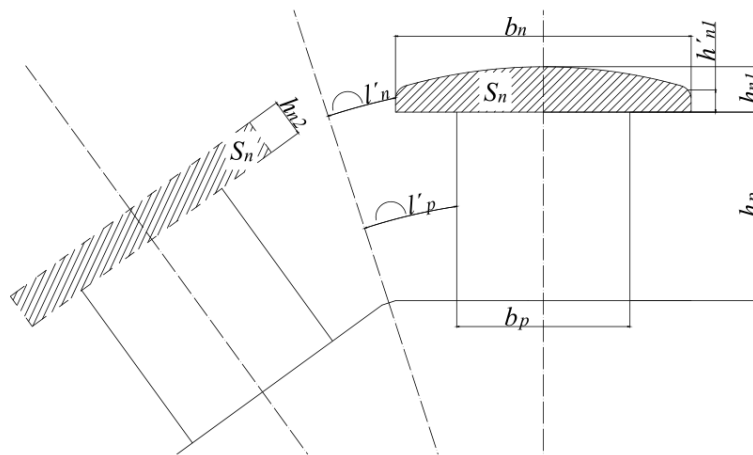
Hodnoty zjištěné z výkresové dokumentace (Příloha 26):

$$l'_p = 0,168m \quad (3.144)$$

$$l'_n = 0,107m \quad (3.145)$$

$$h'_{n1} = 0,035m \quad (3.146)$$

$$S_n = 0,02805 m^2 \quad (3.147)$$



Obr. 8 - Rozměry k určení mezipólového rozptylu

Náhradní výška pólového nástavce:

$$h_{n2} = \frac{S_n}{b_n} = \frac{0,02805}{0,47} = 0,0597m \quad (3.148)$$

Délka pólu se započítanou šířkou cívky:

$$L_n = L_p + (b_n - b_p) = 0,53 + (0,47 - 0,267) = 0,733m \quad (3.149)$$

Magnetická vodivost rozptylového toku mezi boky pólových nástavců:

$$\Lambda_{obn} = \mu_0 \cdot \frac{h'_{n1} \cdot L_n}{l'_n} = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{0,035 \cdot 0,733}{0,107} = 3,01 \cdot 10^{-7} \quad (3.150)$$

Magnetická vodivost rozptylového toku mezi boky pólů:

$$\Lambda_{obp} = \frac{1}{2} \cdot \mu_0 \cdot \frac{h_p \cdot L_p}{l'_p} = \frac{1}{2} \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{0,204 \cdot 0,53}{0,168} = 4,05 \cdot 10^{-7} \quad (3.151)$$

Magnetická vodivost rozptylového toku mezi čely pólových nástavců:

$$\begin{aligned}\Lambda_{\sigma n} &= \mu_0 \cdot \frac{2}{\pi} \cdot h_{n2} \cdot \ln \frac{\pi \cdot \frac{b_n}{4} + l'_n}{l'_n} = \\ &= 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{2}{\pi} \cdot 0,06 \cdot \ln \frac{\pi \cdot \frac{0,47}{4} + 0,107}{0,107} = 0,71 \cdot 10^{-7}\end{aligned}\quad (3.152)$$

Magnetická vodivost rozptylového toku mezi čely pólů:

$$\begin{aligned}\Lambda_{\sigma p} &= \frac{\mu_0}{\pi} \cdot h_p \cdot \ln \frac{\pi \cdot \frac{b_p}{4} + l'_p}{l'_p} = \\ &= \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}}{\pi} \cdot 0,204 \cdot \ln \frac{\pi \cdot \frac{0,267}{4} + 0,168}{0,168} = 0,66 \cdot 10^{-7}\end{aligned}\quad (3.153)$$

Výsledná magnetická vodivost rozptylového toku:

$$\begin{aligned}\Lambda_{\sigma} &= 2 \cdot \Lambda_{\sigma bn} + 2 \cdot \Lambda_{\sigma bp} + 4 \cdot \Lambda_{\sigma n} + 4 \cdot \Lambda_{\sigma p} = \\ &= (2 \cdot 3,01 + 2 \cdot 4,05 + 4 \cdot 0,71 + 4 \cdot 0,66) \cdot 10^{-7} = 19,62 \cdot 10^{-7}\end{aligned}\quad (3.154)$$

Rozptylový magnetický tok:

$$\Phi_{\sigma} = F_{\sigma} \cdot \Lambda_{\sigma} = 14684 \cdot 19,62 \cdot 10^{-7} = 0,029 \text{Vs} \quad (3.155)$$

Činitel rozptylu:

$$\nu = \frac{\Phi_{\sigma}}{\Phi} = \frac{0,044}{0,249} = 0,167 = 16,7\% \quad (3.156)$$

[2]

3.3. Výpočet ztrát a účinnosti

Jouleovy ztráty ve vinutí induktu:

$$\Delta P_{Cu1} = m \cdot R_{l/75} \cdot I_1^2 = 3 \cdot 0,0427 \cdot 733^2 = 68827 \text{W} \quad (3.157)$$

Jouleovy ztráty v budícím vinutí:

$$\Delta P_{Cub} = R_{b/75} \cdot I_b^2 = 0,205 \cdot 414,5^2 = 35221 \text{W} \quad (3.158)$$

Ztrátové číslo plechů:

$$\Delta p_{Fe} = 1,8 \text{W} / \text{kg} \quad (3.159)$$

Vnější průměr induktu:

$$D_{je} = D_1 + 2 \cdot (h_d + h_{js}) = 2,3 + 2 \cdot (0,115 + 0,163) = 2,856m \quad (3.160)$$

Střední průměr induktu:

$$D_3 = D_1 + 2 \cdot h_d = 2,3 + 2 \cdot 0,115 = 2,53m \quad (3.161)$$

Hmotnost jádra induktu:

$$\begin{aligned} m_{Fej} &= \frac{\pi}{4} \cdot (D_{je}^2 - D_3^2) \cdot l_e \cdot k_{Fe} \cdot \rho_{Fe} = \\ &= \frac{\pi}{4} \cdot (2,856^2 - 2,53^2) \cdot 0,45 \cdot 0,92 \cdot 7800 = 4453kg \end{aligned} \quad (3.162)$$

Ztráty v železe v jádře induktu:

$$\begin{aligned} \Delta P_{Fej} &= 1,8 \cdot \Delta p_{Fe} \cdot B_{js}^2 \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} \cdot m_{Fej} = \\ &= 1,8 \cdot 1,8 \cdot 1,3^2 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1,3} \cdot 4453 = 24383W \end{aligned} \quad (3.163)$$

Hmotnost zubů induktu:

$$\begin{aligned} m_{Fez} &= Q \cdot z_2 \cdot h_d \cdot l_e \cdot k_{Fe} \cdot \rho_{Fe} = \\ &= 195 \cdot 0,02191 \cdot 0,115 \cdot 0,45 \cdot 0,92 \cdot 7800 = 1587kg \end{aligned} \quad (3.164)$$

Ztráty v železe v zubech induktu:

$$\begin{aligned} \Delta P_{Fez} &= 2 \cdot \Delta p_{Fe} \cdot B_{z2}^2 \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} \cdot m_{Fez} = \\ &= 2 \cdot 1,8 \cdot 1,64^2 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1,3} \cdot 1587 = 15366W \end{aligned} \quad (3.165)$$

Drážková frekvence:

$$f_d = \frac{Q \cdot n}{60} = \frac{195 \cdot 600}{60} = 1950Hz \quad (3.166)$$

Povrchové ztráty:

$$\Delta P_p = f_d^{1,5} \cdot B_\delta^2 = 1950^{1,5} \cdot 0,85^2 = 62214W \quad (3.167)$$

Mechanické ztráty:

$$\Delta P_m = v_r^{2,5} \cdot D_1 \cdot \sqrt{l_e} = 72,26^{2,5} \cdot 2,3 \cdot \sqrt{0,45} = 68482W \quad (3.168)$$

Přídavné ztráty:

$$\Delta P_{př} = 0,003 \cdot S = 0,003 \cdot 8000 \cdot 10^3 = 24000W \quad (3.169)$$

Celkové ztráty:

$$\begin{aligned} \Delta P &= \Delta P_{Cu1} + \Delta P_{Cu2} + \Delta P_{Fej} + \Delta P_{Fez} + \Delta P_p + \Delta P_m + \Delta P_{př} = \\ &= 68827 + 35221 + 24383 + 15366 + 62214 + 68482 + 24000 = \\ &= 298493W \end{aligned} \quad (3.170)$$

Účinnost:

$$\eta = 100 \cdot \left(1 - \frac{\Delta P}{P + \Delta P} \right) = 100 \cdot \left(1 - \frac{298493}{6,4 \cdot 10^6 + 298493} \right) = 95,11\% \quad (3.171)$$

[2]

3.4. Konstrukční výpočty

3.4.1. Návrh hřídele

Pevnostní kritérium:

$$d_{HP} = 0,135 \cdot \sqrt[3]{\frac{P}{n_s}} = 0,135 \cdot \sqrt[3]{\frac{6400}{600}} = 0,297m \quad (3.172)$$

Deformační kritérium:

$$d_{HD} = 0,135 \cdot \sqrt[4]{\frac{P}{n_s}} = 0,135 \cdot \sqrt[4]{\frac{6400}{600}} = 0,244m \quad (3.173)$$

Pro návrh hřídele použijí pevnostní kritérium $d_{H1} = d_{HP}$.

Hlavní průměr hřídele:

$$D_{H1} = 1,3 \cdot d_{H1} = 1,3 \cdot 0,297 = 0,386m \quad (3.174)$$

[2]

3.4.2. Připevnění pólů

Poloměr otáčení jha rotoru v ose pólu:

$$\begin{aligned} r_2 &= \frac{D_1}{2} - \delta - h_{n1} - h_p = \\ &= \frac{2,3}{2} - 0,023 - 0,072 - 0,2041 = 0,8509m \end{aligned} \quad (3.175)$$

Poloměr otáčení těžiště těla pólu a budícího vinutí:

$$r_p = r_v = r_2 + \frac{h_p}{2} = 0,8509 + \frac{0,2041}{2} = 0,9529m \quad (3.176)$$

Poloměr otáčení těžiště pólového nástavce:

$$r_{n2} = r_2 + h_p + \frac{h_{n2}}{2} = 0,8509 + 0,2041 + \frac{0,0597}{2} = 1,0849m \quad (3.177)$$

Objem těla pólu:

$$V_p = S_p \cdot L_p = h_p \cdot b_p \cdot L_p = 0,2041 \cdot 0,267 \cdot 0,53 = 0,028882m^3 \quad (3.178)$$

Objem budícího vinutí:

$$\begin{aligned} V_v &= S_v \cdot l_{bs} = S_{Cub} \cdot N_b \cdot l_{bs} = \\ &= 0,0001974 \cdot 77 \cdot 2,002 = 0,030431m^3 \end{aligned} \quad (3.179)$$

Objem pólového nástavce:

$$\begin{aligned} V_n &= S_n \cdot l_n = S_n \cdot (L_p + 2a) = \\ &= 0,02805 \cdot (0,53 + 2 \cdot 0,102) = 0,020589m^3 \end{aligned} \quad (3.180)$$

Hmotnost těla pólu:

$$m_p = \rho_{Fe} \cdot V_p = 7800 \cdot 0,028882 = 225,28kg \quad (3.181)$$

Hmotnost budícího vinutí:

$$m_{Cub} = \rho_{Cu} \cdot V_v = 8900 \cdot 0,030431 = 270,836kg \quad (3.182)$$

Hmotnost pólového nástavce:

$$m_n = \rho_{Fe} \cdot V_n = 7800 \cdot 0,020589 = 160,594kg \quad (3.183)$$

Maximální otáčky:

$$n_{MAX} = 1,2 \cdot n_s = 1,2 \cdot 600 = 720 \text{ ot/min} \quad (3.184)$$

Maximální úhlová rychlost:

$$\omega_{MAX} = \frac{\pi \cdot n_{MAX}}{30} = \frac{\pi \cdot 720}{30} = 75,398 \text{ rad/s} \quad (3.185)$$

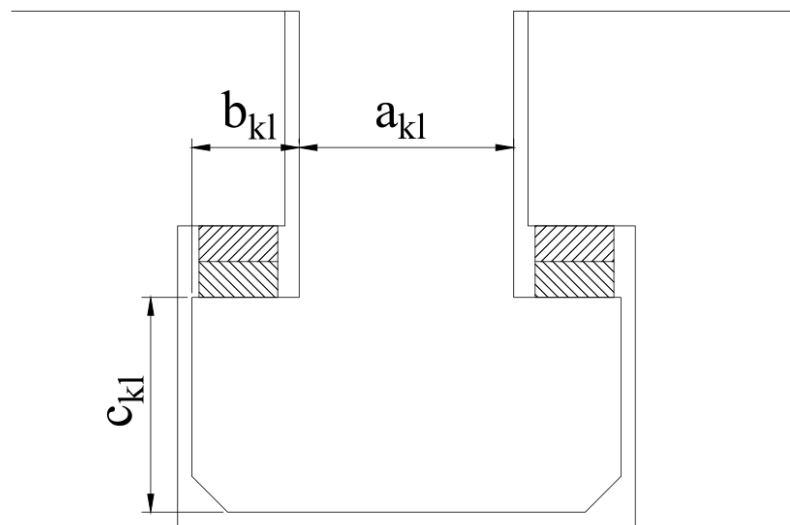
Velikost odstředivé síly pólu s cívkou:

$$\begin{aligned} F_p &= \omega_{MAX}^2 \cdot [(m_p + m_{Cub}) \cdot r_p + m_n \cdot r_n] = \\ &= 75,398^2 \cdot [(225,28 + 270,836) \cdot 0,9529 + 160,594 \cdot 1,0849] = \\ &= 3677975N \end{aligned} \quad (3.186)$$

Síla na jednotku délky:

$$F_{p1} = \frac{F_p}{L_p} = \frac{3,677975 \cdot 10^6}{0,53} = 6,939 \cdot 10^6 \text{ N/m} \quad (3.187)$$

$F_{p1} > (2 \div 2,5) \cdot 10^6 \text{ N/m} \Rightarrow$ k připevnění použijí kladiva.



Obr. 9 – Rozměry kladiva

Návrh kladiva:

Šířka krčku:

$$a_{kl} = \frac{F_{p1}}{\sigma_{dov}} = \frac{6,939 \cdot 10^6}{130 \cdot 10^6} = 0,053m \quad (3.188)$$

Šířka přesahující části:

$$b_{kl} = \frac{a_{kl}}{2} = \frac{0,053}{2} = 0,0265m \quad (3.189)$$

Výška kladiva:

$$c_{kl} \approx a_{kl} = 0,053m \quad (3.190)$$

Kontrola kombinovaného namáhání:

$$\begin{aligned}\sigma_{c \max} &= \frac{F_{p1}}{c_{kl}} \cdot \left[\frac{3 \cdot b_{kl}}{4 \cdot c_{kl}} + \sqrt{1 + \left(\frac{3 \cdot b_{kl}}{4 \cdot c_{kl}} \right)^2} \right] = \\ &= \frac{2,486 \cdot 10^6}{0,053} \cdot \left[\frac{3 \cdot 0,0265}{4 \cdot 0,053} + \sqrt{1 + \left(\frac{3 \cdot 0,0265}{4 \cdot 0,053} \right)^2} \right] = 188 \cdot 10^6 \text{ Pa}\end{aligned}\quad (3.191)$$

Jelikož je $\sigma_{c \max} > \sigma_{dov} \Rightarrow$ musel jsem zvětšit rozměry kladiva, abych nepřekračoval dovolené namáhání.

Pro $a_{kl} = 0,06m$ ani pro $a_{kl} = 0,07m$ nevyšla kontrola kombinovaného namáhání menší než dovolené namáhání, takže jsem musel šířku krčku zvolit $a_{kl} = 0,08m$

Pro:

$$a_{kl} = 0,08m > 0,06m \quad (3.192)$$

Volím dvě kladiva s poměrově zmenšenými rozměry.

Rozměry:

$$a'_{kl} = \frac{a_{kl}}{2} = \frac{0,08}{2} = 0,04m \quad (3.193)$$

$$b'_{kl} = \frac{a'_{kl}}{2} = \frac{0,04}{2} = 0,02m \quad (3.194)$$

$$c'_{kl} \approx a'_{kl} = 0,04m \quad (3.195)$$

Kontrola kombinovaného namáhání pro obě dvě kladiva:

$$\begin{aligned}\sigma_{c \max} &= \frac{F_{p1}}{c_{kl}} \cdot \left[\frac{3 \cdot b_{kl}}{4 \cdot c_{kl}} + \sqrt{1 + \left(\frac{3 \cdot b_{kl}}{4 \cdot c_{kl}} \right)^2} \right] = \\ &= \frac{2,486 \cdot 10^6}{0,08} \cdot \left[\frac{3 \cdot 0,04}{4 \cdot 0,08} + \sqrt{1 + \left(\frac{3 \cdot 0,04}{4 \cdot 0,08} \right)^2} \right] = 125 \cdot 10^6 \text{ Pa}\end{aligned}\quad (3.196)$$

Kontrola proběhla v pořádku, protože $\sigma_{c \max} < \sigma_{dov}$, mohu pro kladiva použít tyto rozměry.

[2]

3.4.3. Kroužky a kartáče

Pro kartáče jsem použil materiál zvaný elektrografit, který má parametry popsané v tabulce (Příloha 16):

Celkový průřez kartáčů jedné polaroty:

$$S_k = \frac{I_b}{\sigma_k} = \frac{414,5}{10} = 41,45 \text{ cm}^2 = 4145 \text{ mm}^2 \quad (3.197)$$

Volím rozměry kartáčů z tabulky (Příloha 17):

$$b_k = 40 \text{ mm} \quad (3.198)$$

$$l_k = 25 \text{ mm} \quad (3.199)$$

Průřez jednoho kartáče:

$$S_{k1} = b_k \cdot l_k = 40 \cdot 25 = 1000 \text{ mm}^2 \quad (3.200)$$

Počet kartáčů jedné polaroty na obvodu kroužku:

$$i_k = \frac{S_k}{S_{k1}} = \frac{4145}{1000} = 4,145 \Rightarrow 5 \quad (3.201)$$

Vnější průměr kroužků volíme:

$$D_k = 1,3 \cdot d_{H1} = 1,3 \cdot 0,297 = 0,386 \text{ m} \quad (3.202)$$

Kontrola obvodové rychlosti kroužků:

$$v_k = \frac{\pi \cdot D_k \cdot n_{MAX}}{60} = \frac{\pi \cdot 0,386 \cdot 720}{60} = 14,55 \text{ m/s} \quad (3.203)$$

Kontrola proběhla v pořádku, protože $v_k < v_{MAX}$.

Kontrola rozteče kartáčů:

$$t_k = \frac{\pi \cdot D_k}{2 \cdot i_k} = \frac{\pi \cdot 0,386}{2 \cdot 5} = 0,121 \text{ m} \quad (3.204)$$

Kontrola proběhla v pořádku, protože $t_k \gg l_k$.

[2]

3.4.4. Návrh tlumiče

Rozteč tyčí, uvažovaná na obvodu statoru:

$$t'_t = 0,8 \cdot t_{d1} = 0,8 \cdot 37 = 29,6 \text{ mm} \quad (3.205)$$

Počet tyčí na pólovém nastavci:

$$Q_m = \frac{b_n}{t'_t} = \frac{470}{29,6} = 15,87 \Rightarrow 16 \quad (3.206)$$

Průřez všech tyčí:

$$S_t = 0,2 \cdot n_d \cdot Q \cdot S_{Cu1} = 0,2 \cdot 16 \cdot 195 \cdot 34,8 = 21715 \text{ mm}^2 \quad (3.207)$$

Průřez jedné tyče:

$$S_{t1} = \frac{S_t}{2p \cdot Q_m} = \frac{21715}{10 \cdot 16} = 136 \text{ mm}^2 \quad (3.208)$$

Průměr tyče:

$$d_t = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{t1}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 136}{\pi}} = 13,2 \text{ mm} \quad (3.209)$$

Průřez kruhu:

$$\begin{aligned} S_k &= 0,45 \cdot S_{t1} \cdot Q_m = \\ &= 0,45 \cdot 136 \cdot 16 = 979 \text{ mm}^2 \approx 980 \text{ mm}^2 \end{aligned} \quad (3.210)$$

Rozměr kruhu:

$$10 \times 98 \text{ mm} \quad (3.211)$$

[2]

3.4.5. Určení počtu mezipólových rozpěrek

Vzdálenost těžiště cívky od osy pólu:

$$e = \frac{1}{2}(b_p + b_{vb}) + t_k = \frac{1}{2}(0,267 + 0,094) + 0,006 = 0,1865 \text{ m} \quad (3.212)$$

Rozteč rozpěrek:

$$t_r = \frac{1}{\omega_{MAX}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \sigma_{dov} \cdot b_{vb}}{\rho_{Cu} \cdot e}} = \frac{1}{75,398} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 35 \cdot 10^6 \cdot 0,094}{8900 \cdot 0,1865}} = 0,835 \text{ m} \quad (3.213)$$

Počet rozpěrek:

$$i = \frac{L_p}{t_r} - 1 = \frac{0,53}{0,835} - 1 = -0,365 \Rightarrow 0 \quad (3.214)$$

[2]

3.5. Výpočet oteplení kotvy

3.5.1. Drážková část

Hodnoty odečtené z výkresu (Příloha 26):

$$\delta_{iz} = 0,0037m \quad (3.215)$$

$$\delta'_{iz} = 0,0105m \quad (3.216)$$

$$z_1 = 0,017m \quad (3.217)$$

$$z_{1s} = 0,0212m \quad (3.218)$$

$$z_2 = 0,022m \quad (3.219)$$

$$z_{2s} = 0,0229m \quad (3.220)$$

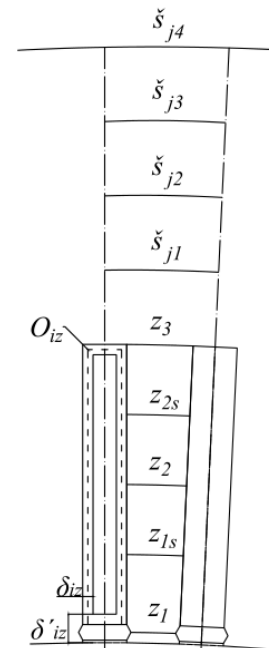
$$z_3 = 0,0238m \quad (3.221)$$

$$\check{s}_{j1} = 0,0421m \quad (3.222)$$

$$\check{s}_{j2} = 0,0434m \quad (3.223)$$

$$\check{s}_{j3} = 0,0447m \quad (3.224)$$

$$\check{s}_{j4} = 0,046m \quad (3.225)$$



Obr. 10 – Rozměry pro výpočet oteplení

Jouleovy ztráty v drážkách:

$$\Delta P_{Cud} = \frac{\Delta P_{Cu1} \cdot L_p}{l_v} = \frac{68827 \cdot 0,53}{1,535} = 23764W \quad (3.226)$$

Jouleovy ztráty v čelech:

$$\Delta P_{Cu\check{c}} = \frac{\Delta P_{Cu1} \cdot l_{\check{c}}}{l_v} = \frac{68827 \cdot 1,005}{1,535} = 45063W \quad (3.227)$$

Ztráty odváděné rotorovou větví:

$$\begin{aligned}\Delta P_{rv} &= \Delta P - (\Delta P_{Cu\check{c}} + \Delta P_m + \Delta P_{p\check{r}}) = \\ &= 298493 - (45063 + 68482 + 24000) = 160948W\end{aligned}\quad (3.228)$$

Předpoklad ježe, se vzduch proudící kanálem ohřeje o $\Delta \vartheta = 15^\circ C$.

Objemové měrné teplo chladiva je $c_v = 1250 Ws / ^\circ C m^3$.

Průtočné množství vzduchu všemi kanály:

$$Q_{rv} = \frac{\Delta P_{rv}}{c_v \cdot \Delta \vartheta} = \frac{160948}{1250 \cdot 15} = 8,5839 m^3 / s \quad (3.229)$$

Průtočné množství vzduchu na jeden kanál a drážkovou rozteč:

$$Q_{r1} = \frac{Q_{rv}}{Q \cdot i_p} = \frac{8,5839}{195 \cdot 9} = 0,0049 m^3 / s \quad (3.230)$$

Střední rychlost proudění v prostoru zubů:

$$v_{kz} = \frac{Q_{r1}}{z_2 \cdot \check{s}_k} = \frac{0,0049}{0,022 \cdot 0,01} = 22,2 m / s \quad (3.231)$$

Střední rychlost proudění v prostoru jádra:

$$v_{kj} = \frac{Q_{r1}}{\check{s}_{j2} \cdot \check{s}_k} = \frac{0,0049}{0,0434 \cdot 0,01} = 11,3 m / s \quad (3.232)$$

Tomu odpovídají součinitele přestupu tepla (Příloha 15):

$$\alpha_z = 110 W / ^\circ C m^2 \quad (3.233)$$

$$\alpha_j = 75 W / ^\circ C m^2 \quad (3.234)$$

Odhad součinitele přestupu tepla na vnějším obvodu induktu:

$$\alpha_4 = 40 W / ^\circ C m^2 \quad (3.235)$$

Ztráty ve vinutí tekoucí do uzlu:

$$\Delta P_{Cud1} = \frac{\Delta P_{Cud}}{2 \cdot Q \cdot i_p} = \frac{23764}{2 \cdot 195 \cdot 9} = 6,77 W \quad (3.236)$$

Ztráty v zubech tekoucí do uzlu:

$$\Delta P_{Fez1} = \frac{\Delta P_{Fez}}{2 \cdot Q \cdot i_p} = \frac{15366}{2 \cdot 195 \cdot 9} = 4,38W \quad (3.237)$$

Ztráty v jádru induktu tekoucí do uzlu:

$$\Delta P_{Fej1} = \frac{\Delta P_{Fej}}{2 \cdot Q \cdot i_p} = \frac{24383}{2 \cdot 195 \cdot 9} = 6,95W \quad (3.238)$$

Oteplení chladiva ve vzduchové mezeře:

$$g_{02} = g_0 + \frac{\Delta P_{Cub} + \Delta P_p}{c_v \cdot Q_{rv}} = 0 + \frac{35221 + 62214}{1250 \cdot 8,5839} = 9,08^\circ C \quad (3.239)$$

Oteplení chladiva v okolí zuby kanálu:

$$g_{01} = g_{02} + \frac{\Delta P_{Fez} + \Delta P_{Cud}}{2 \cdot c_v \cdot Q_{rv}} = 9,08 + \frac{15366 + 23764}{2 \cdot 1250 \cdot 8,5839} = 10,9^\circ C \quad (3.240)$$

Oteplení chladiva v okolí jádra kotvy kanálu:

$$\begin{aligned} g_{03} &= g_{02} + \frac{\Delta P_{Fez} + \Delta P_{Cud} + \frac{1}{2} \Delta P_{Fej}}{c_v \cdot Q_{rv}} = \\ &= 9,08 + \frac{15366 + 23764 + \frac{1}{2} 24383}{1250 \cdot 8,5839} = 13,86^\circ C \end{aligned} \quad (3.241)$$

Oteplení chladiva vystupujícího z kanálu:

$$\begin{aligned} g_{04} &= g_{02} + \frac{\Delta P_{Fez} + \Delta P_{Cud} + \Delta P_{Fej}}{c_v \cdot Q_{rv}} = \\ &= 9,08 + \frac{15366 + 23764 + 24383}{1250 \cdot 8,5839} = 15^\circ C \end{aligned} \quad (3.242)$$

Pro další výpočet použijeme následující konstanty:

$$\lambda_{iz} = 0,2 W/m^\circ C \quad (3.243)$$

$$\lambda_{Fed} = 45 W/m^\circ C \quad (3.244)$$

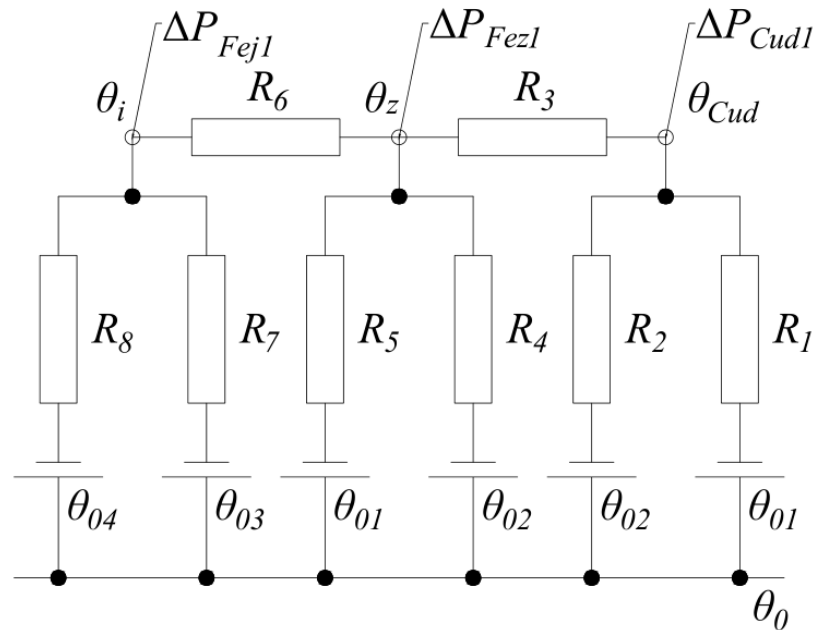
$$\lambda_{Feq} = 1 W/m^\circ C \quad (3.245)$$

$$\lambda_{vzd} = 0,028 W/m^\circ C \quad (3.246)$$

$$\delta_{vzd} = 0,0001\text{m} \quad (3.247)$$

Obvod cívky uvnitř kanálu:

$$O_{iz} = 2 \cdot h_d + b_d = 2 \cdot 0,115 + 0,017 = 0,247\text{m} \quad (3.248)$$



Obr. 11 – Náhradní tepelná síť drážkové části

Tepelný odpor z vinutí do ventilačního kanálu:

$$\begin{aligned} R_1 &= \frac{\delta_{iz}}{\lambda_{iz} \cdot O_{iz} \cdot \frac{\check{s}_k}{2}} + \frac{\delta_{vzd}}{\lambda_{vzd} \cdot O_{iz} \cdot \frac{\check{s}_k}{2}} + \frac{1}{\alpha_z \cdot O_{iz} \cdot \frac{\check{s}_k}{2}} = \\ &= \frac{0,0037}{0,2 \cdot 0,247 \cdot \frac{0,01}{2}} + \frac{0,0001}{0,028 \cdot 0,247 \cdot \frac{0,01}{2}} + \frac{1}{110 \cdot 0,247 \cdot \frac{0,01}{2}} = \\ &= 25,03^\circ\text{C}/\text{W} \end{aligned} \quad (3.249)$$

Tepelný odpor z vinutí do vzduchové mezery:

$$\begin{aligned} R_2 &= \frac{\delta'_{iz}}{\lambda_{iz} \cdot b_d \cdot \frac{\check{s}_t}{2}} + \frac{\delta_{vzd}}{\lambda_{vzd} \cdot b_d \cdot \frac{\check{s}_t}{2}} + \frac{1}{\alpha_\delta \cdot b_d \cdot \frac{\check{s}_t}{2}} = \\ &= \frac{0,0105}{0,2 \cdot 0,017 \cdot \frac{0,06}{2}} + \frac{0,0001}{0,028 \cdot 0,017 \cdot \frac{0,06}{2}} + \frac{1}{120 \cdot 0,017 \cdot \frac{0,06}{2}} = \\ &= 126,28^\circ\text{C}/\text{W} \end{aligned} \quad (3.250)$$

Tepelný odpor z vinutí do zubu:

$$\begin{aligned}
 R_3 &= \frac{\delta_{iz}}{\lambda_{iz} \cdot O_{iz} \cdot \frac{\check{s}_p}{2}} + \frac{\delta_{vzd}}{\lambda_{vzd} \cdot O_{iz} \cdot \frac{\check{s}_p}{2}} + \frac{\frac{z_2}{2}}{3 \cdot \lambda_{Fed} \cdot O_{iz} \cdot \frac{\check{s}_p}{2}} = \\
 &= \frac{0,0037}{0,2 \cdot 0,247 \cdot \frac{0,05}{2}} + \frac{0,0001}{0,028 \cdot 0,247 \cdot \frac{0,05}{2}} + \frac{0,022}{3 \cdot 45 \cdot 0,247 \cdot \frac{0,05}{2}} = \\
 &= 3,55^\circ\text{C}/\text{W}
 \end{aligned} \tag{3.251}$$

Tepelný odpor ze zubu do vzduchové mezery:

$$\begin{aligned}
 R_4 &= \frac{\frac{h_d}{2}}{3 \cdot \lambda_{Feq} \cdot z_{1s} \cdot \frac{\check{s}_p}{2}} + \frac{1}{\alpha_\delta \cdot z_1 \cdot \frac{\check{s}_p}{2}} = \\
 &= \frac{0,115}{2} + \frac{1}{120 \cdot 0,017 \cdot \frac{0,05}{2}} = 55,88^\circ\text{C}/\text{W}
 \end{aligned} \tag{3.252}$$

Tepelný odpor ze zubu do ventilačního kanálu:

$$\begin{aligned}
 R_5 &= \frac{\frac{\check{s}_p}{2}}{3 \cdot \lambda_{Feq} \cdot z_2 \cdot h_d} + \frac{1}{\alpha_z \cdot z_2 \cdot h_d} = \\
 &= \frac{0,05}{2} + \frac{1}{110 \cdot 0,022 \cdot 0,115} = 6,88^\circ\text{C}/\text{W}
 \end{aligned} \tag{3.253}$$

Tepelný odpor z plechů zubu do plechů jádra:

$$\begin{aligned}
 R_6 &= \frac{\frac{h_d}{2}}{3 \cdot \lambda_{Fed} \cdot z_{2s} \cdot \frac{\check{s}_p}{2}} + \frac{\frac{h_{js}}{2}}{3 \cdot \lambda_{Fed} \cdot \check{s}_{j1} \cdot \frac{\check{s}_p}{2}} = \\
 &= \frac{0,115}{2} + \frac{0,163}{2} = 1,32^\circ\text{C}/\text{W}
 \end{aligned} \tag{3.254}$$

Tepelný odpor z plechů jádra do ventilačního kanálu:

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

$$= \frac{0,05}{3 \cdot 1 \cdot 0,0434 \cdot 0,163} + \frac{1}{75 \cdot 0,0434 \cdot 0,163} = 3,06^\circ C/W$$
(3.255)

Tepelný odpor z plechů jádra na vnější obvod statoru:

$$R_8 = \frac{\frac{h_{js}}{2}}{3 \cdot \lambda_{Fed} \cdot \check{s}_{j3} \cdot \frac{\check{s}_p}{2}} + \frac{1}{\alpha_4 \cdot \check{s}_{j4} \cdot \frac{\check{s}_p}{2}} =$$

$$= \frac{0,163}{3 \cdot 45 \cdot 0,0447 \cdot \frac{0,05}{2}} + \frac{1}{40 \cdot 0,046 \cdot \frac{0,05}{2}} = 22,27^\circ C/W$$
(3.256)

Lineárně nezávislé rovnice pro výpočet hledaných teplot:

$$\frac{\vartheta_{Cud} - \vartheta_{01}}{R_1} + \frac{\vartheta_{Cud} - \vartheta_{02}}{R_2} + \frac{\vartheta_{Cud} - \vartheta_z}{R_3} = \Delta P_{Cud1}$$
(3.257)

$$\frac{\vartheta_z - \vartheta_{Cud}}{R_3} + \frac{\vartheta_z - \vartheta_{02}}{R_4} + \frac{\vartheta_z - \vartheta_{01}}{R_5} + \frac{\vartheta_z - \vartheta_j}{R_6} = \Delta P_{Fez1}$$
(3.258)

$$\frac{\vartheta_j - \vartheta_z}{R_6} + \frac{\vartheta_j - \vartheta_{03}}{R_7} + \frac{\vartheta_j - \vartheta_{04}}{R_8} = \Delta P_{Fej1}$$
(3.259)

Dosazení do rovnic:

$$\frac{\vartheta_{Cud} - 10,9}{25,03} + \frac{\vartheta_{Cud} - 9,08}{126,28} + \frac{\vartheta_{Cud} - \vartheta_z}{3,55} = 6,77$$
(3.260)

$$\frac{\vartheta_z - \vartheta_{Cud}}{3,55} + \frac{\vartheta_z - 9,08}{55,88} + \frac{\vartheta_z - 10,9}{6,88} + \frac{\vartheta_z - \vartheta_j}{1,32} = 4,38$$
(3.261)

$$\frac{\vartheta_j - \vartheta_z}{1,32} + \frac{\vartheta_j - 13,86}{3,06} + \frac{\vartheta_j - 15}{22,27} = 6,95$$
(3.262)

Úprava soustavy na základní tvar:

$$0,33 \cdot \vartheta_{Cud} - 0,282 \cdot \vartheta_z + 0 \cdot \vartheta_j = 7,278 \quad (3.263)$$

$$-0,282 \cdot \vartheta_{Cud} + 1,204 \cdot \vartheta_z - 0,759 \cdot \vartheta_j = 6,125 \quad (3.264)$$

$$0 \cdot \vartheta_{Cud} - 0,758 \cdot \vartheta_z + 1,13 \cdot \vartheta_j = 12,145 \quad (3.265)$$

Výpočet teplot jsem provedl pomocí programu Microsoft Excel.

Výsledné oteplení:

$$\vartheta_{Cud} = 60,7^\circ\text{C} \quad (3.266)$$

$$\vartheta_z = 45,2^\circ\text{C} \quad (3.267)$$

$$\vartheta_j = 41,1^\circ\text{C} \quad (3.268)$$

[2]

3.5.2. Čela vinutí

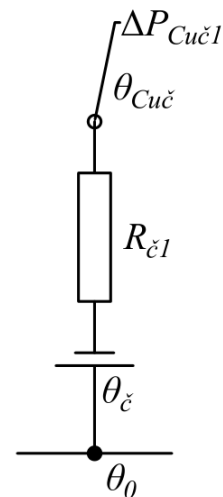
Ztráty v jednom čele cívky:

$$\Delta P_{Cu\check{c}1} = \frac{\Delta P_{Cu\check{c}}}{2 \cdot Q} = \frac{45063}{2 \cdot 195} = 115,55\text{W} \quad (3.269)$$

Obvod čela:

$$O_{\check{c}} = 2 \cdot (h_{\check{c}} + b_d) = 2 \cdot (0,05 + 0,017) = 0,134\text{m} \quad (3.270)$$

Odhad součinitele přestupu tepla čel $\alpha_{\check{c}} = 30\text{W} / ^\circ\text{Cm}^2$.



Tepelný odpor jednoho čela:

Obr. 12 – Náhradní tepelná síť části čel

$$\begin{aligned} R_{\check{c}1} &= \frac{\delta_{iz}}{\lambda_{iz} \cdot O_{\check{c}} \cdot l_{\check{c}}} + \frac{\delta_{vzd}}{\lambda_{vzd} \cdot O_{\check{c}} \cdot l_{\check{c}}} + \frac{1}{\alpha_{\check{c}} \cdot k \cdot O_{\check{c}} \cdot l_{\check{c}}} = \\ &= \frac{0,0037}{0,2 \cdot 0,134 \cdot 1,005} + \frac{0,0001}{0,028 \cdot 0,134 \cdot 1,005} + \frac{1}{30 \cdot 0,6 \cdot 0,134 \cdot 1,005} = \\ &= 0,55^\circ\text{C} / \text{W} \end{aligned} \quad (3.271)$$

Výsledné oteplení čela:

$$\vartheta_{Cu\check{c}} = \Delta P_{Cu\check{c}1} \cdot R_{\check{c}1} = 115,55 \cdot 0,55 = 63,8^\circ\text{C} \quad (3.272)$$

[2]

4. Porovnání a vyhodnocení

Obě varianty jsem navrhoval pro stejný zdánlivý výkon S a napětí U , tudíž i fázový proud I_1 . Mají také shodný počet pólů $2p$ a z toho vyplývá, že mají stejné i synchronní otáčky n_s . Dále jsem pro výpočet uvažoval totožnou předběžnou obvodovou proudovou hustotu A' a indukci ve vzduchové mezeře B_δ , které vycházejí z počtu pólů a zdánlivého výkonu.

Taktéž jsem se při výpočtu snažil zachovat shodně velkou drážkovou rozteč t_{d1} , díky tomu pak vyšla stejná šířka zubu a drážky b_d . Zachoval jsem i totožnou proudovou hustotu ve vodiči induktu σ_{Cu1} a díky tomu mi vyšly identické rozměry vodiče b_v, h_v a i drážek b_d, h_d .

V následující tabulce (Tab. 1) jsou vypsány parametry pro porovnání.

Parametr	Zkratka	Varianta 1	Varianta 2	Jednotka
Průměr induktu	D_1	1,6	2,3	m
Indukce ve vzduchové mezeře	B_δ	0,85	0,85	T
Obvodová proudová hustota	A	62997	63301	A/m
Pólová rozteč	t_p	502	723	mm
Drážková rozteč	t_{d1}	37,2	37	mm
Efektivní délka induktu	l_e	0,9	0,45	m
Celková délka induktu	L	1,07	0,53	m
Počet radiálních ventilačních kanálů	i_k	17	8	–
Počet drážek induktu	Q	135	195	–
Počet drážek na pól a fázi	q	$4\frac{1}{2}$	$6\frac{1}{2}$	–
Počet závitů jedné fáze v sérii	N_s	72	104	–
Délka vinutí drážkové části	l_d	1,07	0,53	m
Délka vinutí části čel	l_ε	0,757	1,005	m
Celková délka vinutí	l_v	1,827	1,535	m
Hmotnost vinutí drážkové části	m_{Cud}	715	512	kg
Hmotnost vinutí části čel	$m_{Cuč}$	507	971	kg
Celková hmotnost vinutí	m_{Cu1}	1222	1483	kg
Hmotnost jádra induktu	m_{Fej}	4559	4453	kg
Hmotnost zubů induktu	m_{Fesz}	2297	1587	kg
Úbytek na ohmickém odporu	u_R	0,7	0,86	%
Úbytek na rozptylové reaktanci	u_σ	15,4	18,49	%
Magnetický tok	Φ	0,249	0,172	Vs

Parametr	Zkratka	Varianta 1	Varianta 2	Jednotka
Vzduchová mezera	δ	15,5	23	mm
Vzduchová mezera na kraji pólu	δ_{\max}	23	34,5	mm
Magnetické napětí reakce kotvy	F'_a	12630	18138	A
Magnetické napětí na δ	F_δ	9801	13951	A
Budící magnetické napětí	F_b	22000	31800	A
Výška těla pólu	h_p	0,2077	0,2041	m
Výška pólového nástavce	h_{n1}	0,05	0,072	m
Šířka těla pólu	b_p	0,191	0,267	m
Šířka pólového nástavce	b_n	0,326	0,47	m
Hmotnost těla pólu	m_p	331	225	kg
Hmotnost pólového nástavce	m_n	125	160	kg
Výška vodiče budící cívky	h_{vb}	3,3	2,1	mm
Šířka vodiče budící cívky	b_{vb}	60	94	mm
Hmotnost vodiče budící cívky	m_{Cub}	260	270	kg
Průřez vodiče budící cívky	S_{Cub}	198	197,4	mm ²
Proudová hustota budící cívky	σ_{Cub}	2,25	2,1	A / mm ²
Budící proud	I_b	445,5	414,5	A
Počet závitů budící cívky	N_b	53	77	–
Rozptylový magnetický tok	Φ_σ	0,044	0,029	Vs
Výsledná hmotnost mědi	m_{Cu}	1482	1753	kg
Výsledná hmotnost železa	m_{Fe}	7312	6425	kg
Výsledná hmotnost aktivních částí	m_{celk}	8749	8178	kg
Odstředivá síla pólu na metr délky	F_{p1}	$2,486 \cdot 10^6$	$6,939 \cdot 10^6$	N / m
Šířka krčku a výška kladiva	$a_{kl} = c_{kl}$	0,03	0,08	m
Šířka přesahující části kladiva	b_{kl}	0,015	0,04	m
Jouleovy ztráty ve vinutí induktu	ΔP_{Cu1}	56254	68827	W
Jouleovy ztráty v drážkách	ΔP_{Cud}	32946	23764	W
Jouleovy ztráty v čelech	$\Delta P_{Cuč}$	23308	45063	W
Jouleovy ztráty v budícím vinutí	ΔP_{Cub}	35328	35221	W
Ztráty v železe v jádře induktu	ΔP_{Fej}	24963	24383	W
Ztráty v železe v zubech induktu	ΔP_{Fez}	21434	15366	W
Povrchové ztráty	ΔP_p	35837	62214	W
Mechanické ztráty	ΔP_m	27197	68482	W
Celkové ztráty	ΔP	225013	298493	W
Účinnost	η	96,36	95,11	%

Parametr	Zkratka	Varianta 1	Varianta 2	Jednotka
Oteplení drážková část	\mathcal{G}_{Cud}	60,6	60,7	$^{\circ}\text{C}$
Oteplení čel	$\mathcal{G}_{Cuč}$	63,2	63,8	$^{\circ}\text{C}$
Oteplení budící cívky	\mathcal{G}_{Cub}	73,3	74,8	$^{\circ}\text{C}$
Oteplení jádra induktu	\mathcal{G}_j	40,4	41,1	$^{\circ}\text{C}$
Oteplení zubů induktu	\mathcal{G}_z	44,7	45,2	$^{\circ}\text{C}$

Tab. 1 – Parametry, které jsou rozdílné

Z výkonové rovnice pro dva rozdílné průměry D_1 vyšly rozdílné efektivní délky l_e , z výsledků je zřejmé, že čím větší průměr vrtání induktu tím menší je délka aktivní části stroje. Celkové délky induktu L jsou delší o ventilační kanály, jejichž počet i_k je určen volbou totožných šířek paketů \check{s}_p .

Při různých průměrech induktu D_1 a zachování drážkové rozteče t_{d1} vyšly rozdílné počty drážek Q a počty drážek na pól a fázi q . Což mělo vliv na počet vodičů v drážce n_d , a na počet závitů jedné fáze v sérii N_s . Díky nutné úpravě n_d , na celé číslo, a následné úpravě N_s hodnota skutečné obvodové proudové hustoty A vyšla také rozdílná.

Z výpočtu vyložení čel jsem zjistil, že lepší využití mědi je u stroje s menším průměrem a větší délkou. Je to vidět z hodnot délky vodiče v drážce l_d a hodnot délky čela l_c . Ale i přes menší využití mědi u většího průměru máme zase kratší délku vodiče pro jednu cívku l_v . A opět na druhou stranu při porovnání celkové spotřeby mědi podle celkové hmotnosti všech cívek induktu m_{Cu1} vychází lépe varianta s menším průměrem a větší délkou aktivní části.

Při porovnání váhy plechů induktu, a to jak jádra induktu m_{Fej} , tak zubů m_{Fez} , lépe vychází stroj s větším průměrem a to díky jeho poloviční délce, která v tomto případě hraje větší roli.

Pokud porovnáme procentní úbytek napětí na odporu u_R a na rozptylové reaktanci u_{σ} , tak vyjde lépe varianta s menším průměrem. Podle porovnání výpočtů, kde je mnoho parametrů stejných vyšlo, že to záleží na délce vodiče a na počtu závitů jedné fáze v sérii. U varianty s větším průměrem máme sice kratší vodiče, ale vyšší počet závitů měl v tomto případě vyšší váhu.

Díky větším rozměrům druhého stroje, máme delší siločáry magnetického toku a z toho vyplývá vyšší magnetické napětí reakce kotvy. Stejně tak díky větší vzduchové mezeře je větší i magnetické napětí ve vzduchové mezeře.

Rozměry pólů jsou porovnatelné ze dvou hledisek a to podle výšky h_p, h_{n1} , šířky b_p, b_n tak podle jejich váhy m_p, m_n . Pokud porovnáme výšky a šířky tak póly u většího průměru stroje vyjdou větší, ale díky jeho malé délce jsou póly této varianty lehčí. Budící cívky mají téměř stejný průřez vodiče, ale váha m_{Cub} vyšla větší u varianty s větším průměrem.

Z důvodu většího průměru (většího poloměru otáčení) druhé varianty a i při nižší váze pólu s cívkou vyšla větší odstředivá síla na pól. Tím pádem vyšly i větší rozměry kladiva a_{kl}, b_{kl}, c_{kl} . A to tak, že u varianty s větším průměrem musejí být dvě kladiva místo jednoho, které stačí u varianty s menším průměrem.

Jouleovy ztráty ve vinutí vyšly vyšší u varianty s větším průměrem z důvodu většího odporu cívek. A podle předpokladu u této varianty vyšly menší jouleovy ztráty ve vinutí na části v drážce z důvodu kratší délky vodiče v drážce, ale zase vyšly o hodně větší ztráty v čelech, protože ty jsou zde delší. Jouleovy ztráty v budících cívkách jsou téměř srovnatelné. Stejně tak jsou podobné i ztráty v železe v jádře induktu a to proto, že mají téměř shodnou váhu a ostatní hodnoty byly stejné. Za to ztráty v železe v zubech induktu jsou u druhé varianty menší, zde se projevila menší váha zubů.

Největší rozdíl je u ztrát povrchových a mechanických, které jsou u druhé varianty téměř dvojnásobné. U povrchových ztrát je to způsobeno vysokou drážkovou frekvencí f_d a u mechanických velkým průměrem a díky tomu i velkou obvodovou rychlostí stroje v_r . Nakonec vyšly i vyšší celkové ztráty u druhé varianty a při stejném výkonu z toho vyplývá, že má druhá varianta nižší účinnost.

Při porovnání oteplení jak vinutí induktu a buzení tak i jádra a zubů induktu, jsou hodnoty téměř totožné. Největší rozdíl je o $1,5^{\circ}\text{C}$.

5. Závěr

Zadáním práce bylo vytvořit elektromagnetický návrh dvou variant synchronního generátoru s různými průměry induktu. Na začátku práce byly vypočítány hlavní parametry, které jsou společné. Poté bylo rozhodnuto, jaké průměry induktů budou použity. Dále byly v práci vypočteny elektromagnetické návrhy obou variant, spolu s některými konstrukčními výpočty a s výpočty oteplení. Také byly nakresleny schematické příčné a podélné řezy.

Na konci práce bylo provedeno porovnání vybraných parametrů pomocí tabulky. Z tohoto porovnání a následného slovního vyhodnocení jsem nedospěl k jasnému závěru, která varianta je lepší. Výběr varianty může záležet na různých parametrech. Například v první variantě je lepší využití mědi ve vodičích induktu (v aktivní části je více mědi než v čelech vinutí) a také je jí menší spotřeba což by mohlo mít vliv na cenu. Na druhou stranu druhá varianta má nižší hmotnost aktivních částí (mědi a plechů), což by mohlo hrát při rozhodování také roli. Další hlavní rozdíly jsou v rozměrech obou strojů. První varianta je úzká a dlouhá, druhá široká a krátká. Pokud bychom například měli pohon, který by způsoboval kývání generátoru, tak varianta s větším průměrem má větší moment setrvačnosti a tím tomu bude lépe odolávat.

Obě dvě varianty jsou tedy použitelné a volba by závisela v podstatě na zákazníkovi, který by si určil, jaké parametry jsou pro něj důležitější.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] KOPYLOV, Igor Petrovič a kol. *Stavba elektrických strojů*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988. 685 s.
- [2] ČERVENÝ, Josef. *Postup při elektromagnetickém návrhu synchronního stroje* [online]. 2016 [cit. 2016-11-04]. Dostupné z: <https://courseware.zcu.cz/portal/studium/courseware/kev/ses1/cviceni.html>
- [3] ČERVENÝ, Josef. *Materiály ke cvičení* [online]. 2016 [cit. 2016-11-04]. Dostupné z: <https://courseware.zcu.cz/portal/studium/courseware/kev/ses1/cviceni.html>
- [4] CIGÁNEK, Ladislav. *Stavba elektrických strojů*. Praha: SNTL, 1958, 716 s. ISBN 05/34.
- [5] ALTER, Jakub. *Návrh synchronního hydroalternátoru* [online]. 2013 [cit. 2016-10-14]. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/handle/11025/10588>. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Hruška, Karel.

Seznam příloh

Příloha 1: Průměry synchronních strojů [3].....	1
Příloha 2: Graf indukce ve vzduchové mezeře a obvodové proudové hustoty [3].....	2
Příloha 3: Tvar drážky pro vinutí [3].....	3
Příloha 4: Tabulka drážky M [3].....	3
Příloha 5: Konstanta K [2].....	4
Příloha 6: Tabulka měděných pásů [3].....	4
Příloha 7: Výpočet hloubky drážky (varianta 1, 2) [2].....	5
Příloha 8: Výběh cívky z drážky [2].....	6
Příloha 9: Procentní hodnota nesyčené synchronní reaktance [2].....	6
Příloha 10: Činitel základní harmonické magnetické indukce [3].....	6
Příloha 11: Deformační činitel magnetického napětí [3].....	7
Příloha 12: Cartéřův činitel na drážkování [3].....	8
Příloha 13: Nomogram k určení skutečné indukce v zubech induktu [3].....	9
Příloha 14: Graf závislosti magnetické indukce a intenzity magnetického pole [3].....	10
Příloha 15: Chladivost v proudícím vzduchu [3].....	11
Příloha 16: Charakteristické vlastnosti kartáčů vyrobených z elektrografitu [2].....	11
Příloha 17: Tabulka rozměrů kartáčů [2].....	11
Příloha 18: Tabulky pro výpočet charakteristiky naprázdno (varianta 1) [2].....	12
Příloha 19: Tabulky pro výpočet charakteristiky naprázdno (varianta 2) [2].....	14
Příloha 20: Grafické provedení charakteristiky naprázdno (varianta 1).....	16
Příloha 21: Grafické provedení charakteristiky naprázdno (varianta 2).....	17
Příloha 22: Charakteristiky naprázdno obou variant pro porovnání.....	18
Příloha 23: Rozměry vyložení čel.....	19
Příloha 24: Příčný řez A3 – varianta 1.....	20
Příloha 25: Podélný řez A3 – varianta 1.....	21
Příloha 26: Příčný řez A3 – varianta 2.....	22
Příloha 27: Podélný řez A3 – varianta 2.....	23

Seznam obrázků

Obr. 1 – Uložení vodičů v drážce.....	19
Obr. 2 – Rozměry k určení mezipólového rozptylu.....	29
Obr. 3 – Rozměry kladiva.....	34
Obr. 4 – Rozměry pro výpočet oteplení.....	38
Obr. 5 – Náhradní tepelná síť drážkové části.....	41
Obr. 6 – Náhradní tepelná síť části čel.....	44
Obr. 7 – Uložení vodičů v drážce.....	50
Obr. 8 - Rozměry k určení mezipólového rozptylu.....	60
Obr. 9 – Rozměry kladiva.....	65
Obr. 10 – Rozměry pro výpočet oteplení.....	69
Obr. 11 – Náhradní tepelná síť drážkové části.....	72
Obr. 12 – Náhradní tepelná síť části čel.....	75
Obr. 13 – Charakteristika naprázdno (varianta 1).....	16
Obr. 14 – Charakteristika naprázdno (varianta 2).....	17
Obr. 15 – Charakteristiky naprázdno obou variant pro porovnání.....	18
Obr. 16 – Rozměry vyložení čel.....	19
Obr. 17 – Příčný řez A3 – varianta 1.....	20
Obr. 18 – Podélný řez A3 – varianta 1.....	21
Obr. 19 – Příčný řez A3 – varianta 2.....	22

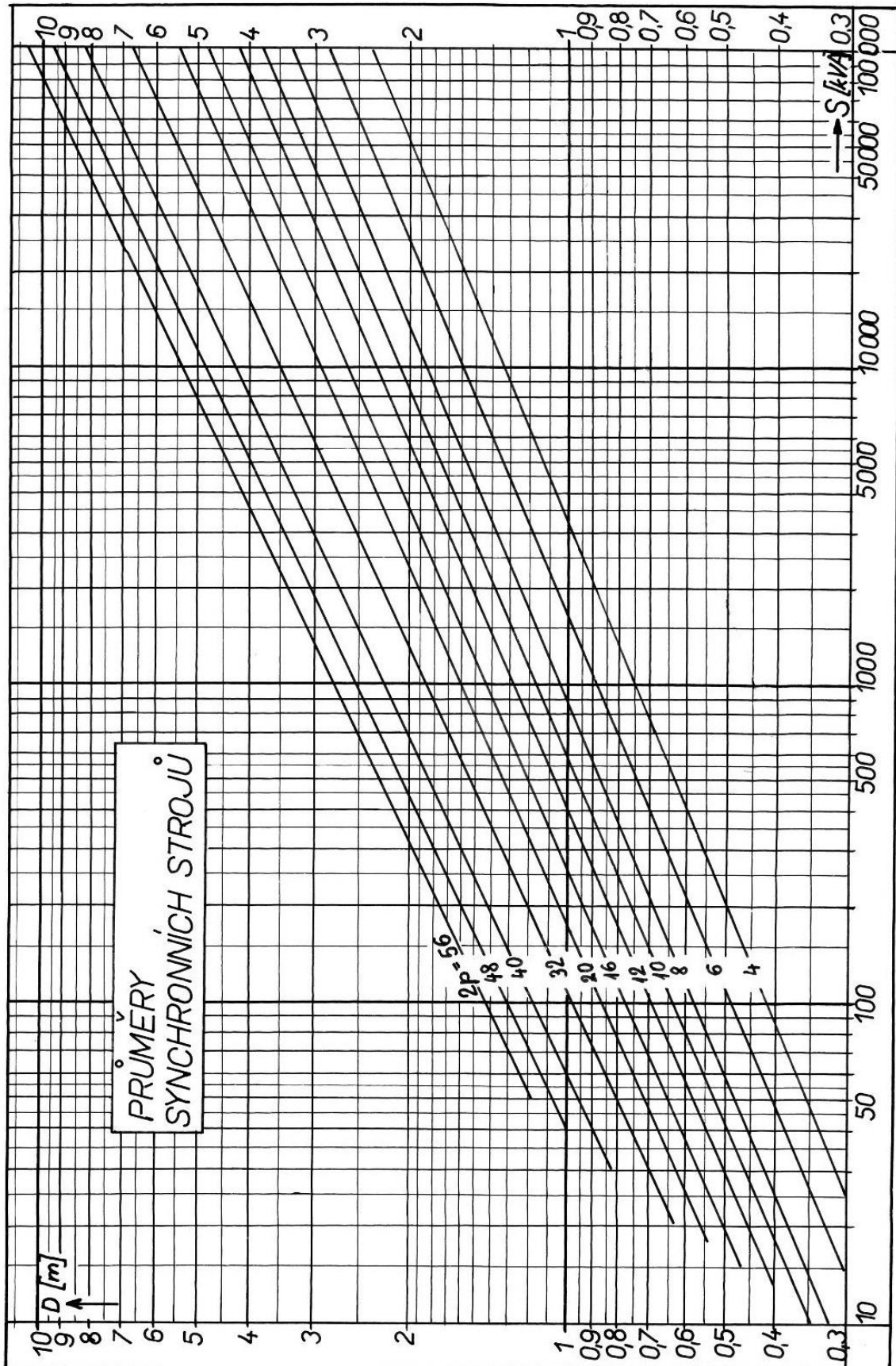
Obr. 20 – Podélný řez A3 – varianta 2.....	23
--	----

Seznam tabulek

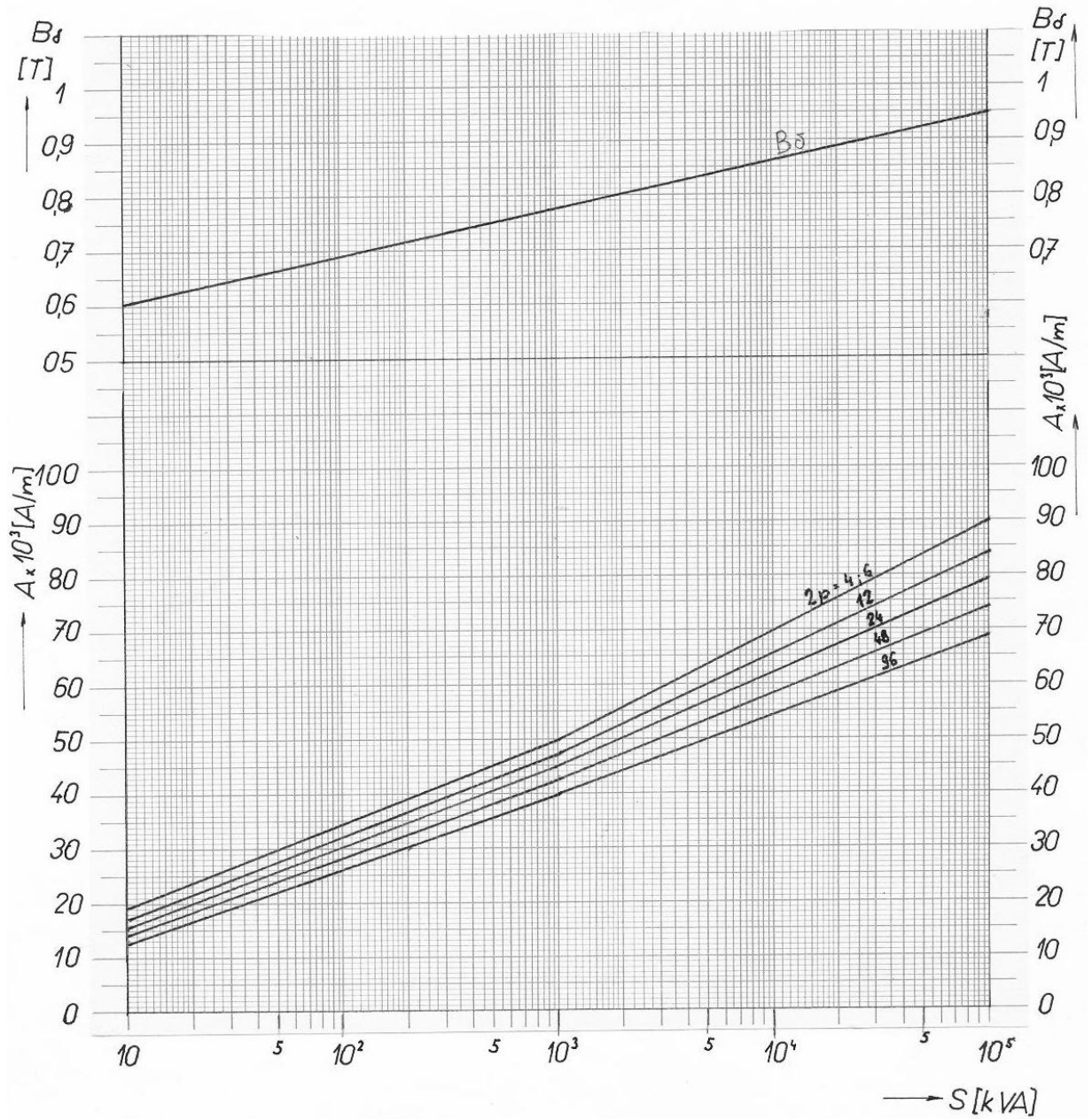
Tab. 1 – Parametry, které jsou rozdílné	78
Tab. 2 – Určení K podle napětí	4
Tab. 3 – Výpočet hloubky drážky (varianta 1)	5
Tab. 4 – Výpočet hloubky drážky (varianta 2)	5
Tab. 5 – Určení ν podle napětí	6
Tab. 6 – Určení x_d podle počtu pólů	6
Tab. 7 – Charakteristické vlastnosti kartáčů vyrobených z elektrografitu	11
Tab. 8 – Tabulka rozměrů kartáčů	11
Tab. 9 – Magnetizační charakteristika zubové vrstvy (varianta1).....	12
Tab. 10 – Magnetizační charakteristika celého magnetického obvodu (varianta1).....	13
Tab. 11 – Magnetizační charakteristika zubové vrstvy (varianta2).....	14
Tab. 12 – Magnetizační charakteristika celého magnetického obvodu (varianta2).....	15

Přílohy

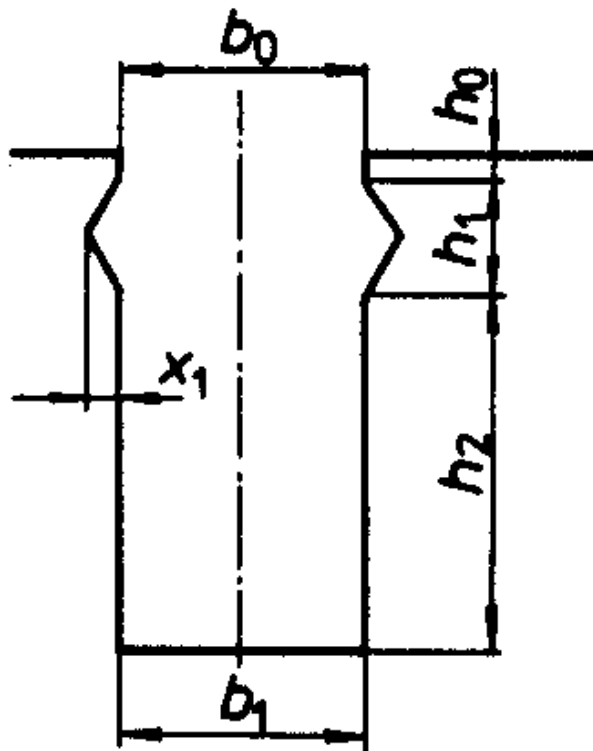
Příloha 1: Průměry synchronních strojů [3]



Příloha 2: Graf indukce ve vzduchové mezeře a obvodové proudové hustoty [3]



Příloha 3: Tvar drážky pro vinutí [3]



Příloha 4: Tabulka drážky M [3]

Drážka M'				
b_1	h_0	h_1	x_1	λ_c
5	0,7	3,5	1,2	0,704
5,2		3,3	1,1	0,658
5,5		3,6	1,2	0,664
5,8		3,5	1,2	0,621
6		3,3	1,1	0,581
6,3		4,0	1,4	0,630
6,6		3,6	1,25	0,580
7		4,0	1,4	0,576
7,3		3,6	1,25	0,517
7,6		4,0	1,4	0,536
8		4,0	1,4	0,522
8,5		3,6	1,15	0,455
9		4,0	1,4	0,462
9,5		3,6	1,15	0,412
10				0,420
10,5				0,402
11				0,386
11,5		4,0	1,4	0,371
12				0,356
12,5				0,343
13			0,331	
13,5			0,404	
14	1,0			0,390
14,5				0,372
15		5,0	1,65	0,366
15,5				0,355
16				0,345
16,5				0,392
17				0,391
17,5		6,0	1,6	0,368
18				0,362
18,5				0,352
19			0,344	
19,5			0,461	
20			0,450	
20,5			0,441	
21			0,430	
21,5			0,415	
22			0,405	
22,5			0,397	
23	9,0	2,45	0,389	
23,5			0,388	
24			0,382	
25			0,367	
26			0,354	
27			0,342	
28			0,322	
30			0,310	
32			0,292	

Příloha 5: Konstanta K [2]

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

Tab. 2 – Určení K podle napětí

Příloha 6: Tabulka měděných pásů [3]

Výběr z ČSN 42 8308-1959 Rozměry měděných pásů

Jmenovitá tloušťka [mm]		0,8	1,0	1,1	1,2	(1,3)	1,4	(1,5)	1,6	1,8	2,0	2,2	2,5	2,8		
Jmenovitá šířka [mm]	0,30	1,8	1,3	1,66												
		2,0	1,46	1,86		2,18	2,38	2,58	2,69	2,89						
	0,35	2,2	1,62	2,06		2,42	2,64	2,86	2,99	3,21						
		2,5	1,86	2,36		2,78	3,03	3,28	3,44	3,69	4,19	4,45				
		2,8	2,1	2,66	2,94	3,14	3,42	3,70	3,89	4,17	4,73	5,05				
		3,0	2,26	2,86	3,16	3,38	3,68	3,98	4,19	4,49	5,09	5,45	6,05	6,9		
	0,40	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	
	0,50	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	
		(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	
	0,65	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	
		(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
	0,80	18										35,4	39,0	44,5	49,8	
		20											39,4	43,4	49,5	55,4
		25													62,0	69,4
	1,00	30													74,5	83,4

Příloha 7: Výpočet hloubky drážky (varianta 1, 2) [2]

Položka	Šířka drážky			Hloubka drážky		
	Vzorec	Výpočet	Výsledek	Vzorec	Výpočet	Výsledek
Vyložení drážky	-	$2 \cdot 0,15$	0,3	-	$3 \cdot 0,15$	0,45
Izolace proti železu	$2 \cdot t$	$2 \cdot 2,4$	4,8	$4 \cdot t$	$4 \cdot 2,4$	9,6
Tmelení	-	$2 \cdot 0,1$	0,2	-	$4 \cdot 0,1$	0,4
Stažení vodičů	-	$2 \cdot 0,15$	0,3	-	$4 \cdot 0,15$	0,6
Izolace závitů	-	$2 \cdot 0,48$	0,96	$2 \cdot n_d \cdot 0,48$	$2 \cdot 16 \cdot 0,48$	15,36
Izolace vodičů	$2 \cdot j \cdot 0,37$	$2 \cdot 1 \cdot 0,37$	0,74	$n_d \cdot i \cdot 0,37$	$16 \cdot 2 \cdot 0,37$	11,84
Mezivrstva	-	-	-	$m_v \cdot (2u - 1)$	$4 \cdot (2 - 1)$	4
Σ Izolace			7,3			42,25
Vůle na šířku	$0,2 \div 0,8$	$1 \cdot 0,7$	0,7	-	-	-
Holý vodič	$j \cdot b_v$	$1 \cdot 9$	9	$n_d \cdot i \cdot h_v$	$16 \cdot 2 \cdot 2$	64
Vložka na dno	-	-	-	-	$1 \cdot 0,5$	0,5
Vložka pod klín	-	-	-	-	$1 \cdot 0,5$	0,5
Vůle na hloubku	-	-	-	$0,4 \div 2$	$1 \cdot 0,67$	0,75
Rozměr drážky bez klínu	-	-	17	h_2	-	108
Můstek a klín	-	-	-	$h_0 + h_1$	$1 + 6$	7
Konečný rozměr drážky	b_d		17	h_d		115

Tab. 3 – Výpočet hloubky drážky (varianta 1)

Položka	Šířka drážky			Hloubka drážky		
	Vzorec	Výpočet	Výsledek	Vzorec	Výpočet	Výsledek
Vyložení drážky	-	$2 \cdot 0,15$	0,3	-	$3 \cdot 0,15$	0,45
Izolace proti železu	$2 \cdot t$	$2 \cdot 2,4$	4,8	$4 \cdot t$	$4 \cdot 2,4$	9,6
Tmelení	-	$2 \cdot 0,1$	0,2	-	$4 \cdot 0,1$	0,4
Stažení vodičů	-	$2 \cdot 0,15$	0,3	-	$4 \cdot 0,15$	0,6
Izolace závitů	-	$2 \cdot 0,48$	0,96	$2 \cdot n_d \cdot 0,48$	$2 \cdot 16 \cdot 0,48$	15,36
Izolace vodičů	$2 \cdot j \cdot 0,37$	$2 \cdot 1 \cdot 0,37$	0,74	$n_d \cdot i \cdot 0,37$	$16 \cdot 2 \cdot 0,37$	11,84
Mezivrstva	-	-	-	$m_v \cdot (2u - 1)$	$4 \cdot (2 - 1)$	4
Σ Izolace			7,3			42,25
Vůle na šířku	$0,2 \div 0,8$	$1 \cdot 0,7$	0,7	-	-	-
Holý vodič	$j \cdot b_v$	$1 \cdot 9$	9	$n_d \cdot i \cdot h_v$	$16 \cdot 2 \cdot 2$	64
Vložka na dno	-	-	-	-	$1 \cdot 0,5$	0,5
Vložka pod klín	-	-	-	-	$1 \cdot 0,5$	0,5
Vůle na hloubku	-	-	-	$0,4 \div 2$	$1 \cdot 0,67$	0,75
Rozměr drážky bez klínu	-	-	17	h_2	-	108
Můstek a klín	-	-	-	$h_0 + h_1$	$1 + 6$	7
Konečný rozměr drážky	b_d		17	h_d		115

Tab. 4 – Výpočet hloubky drážky (varianta 2)

Příloha 8: Výběh cívky z drážky [2]

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

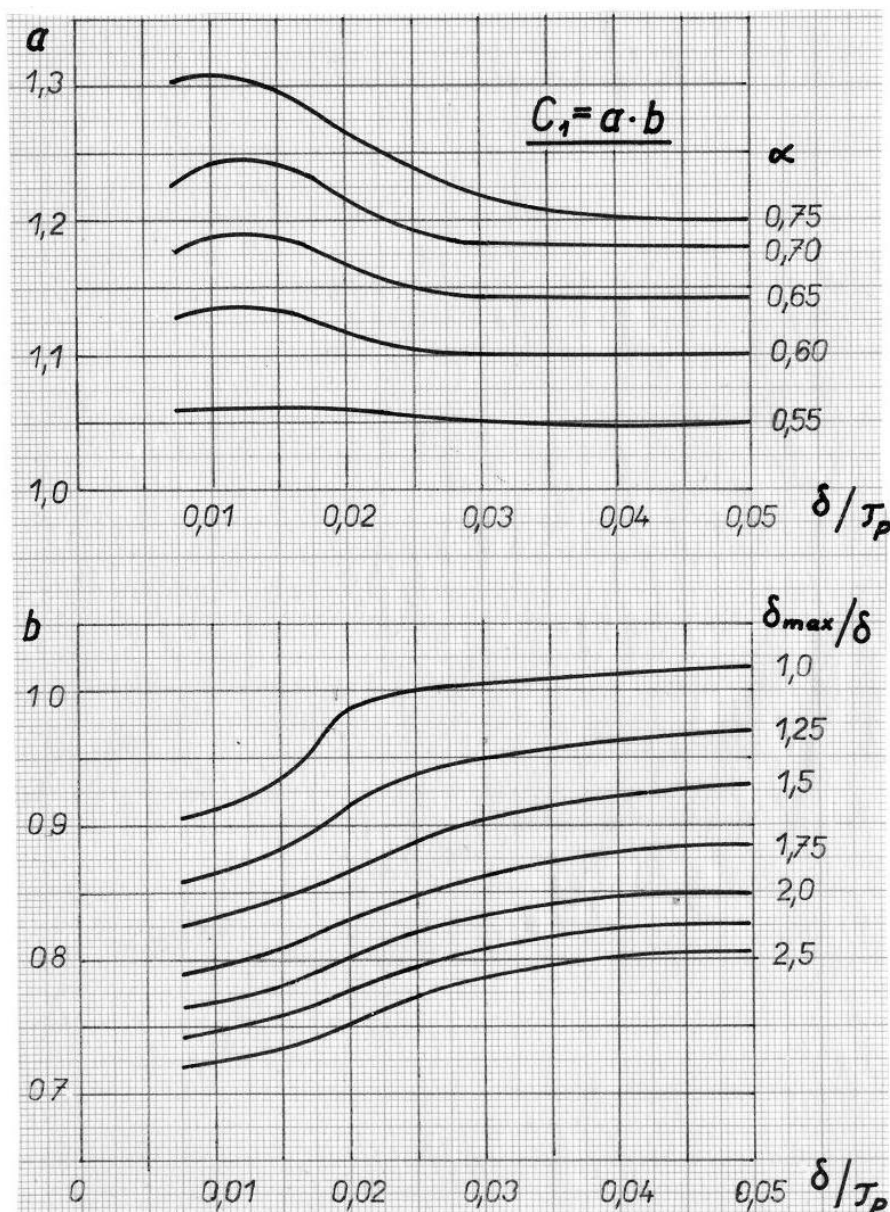
Tab. 5 – Určení ν podle napětí

Příloha 9: Procentní hodnota nesyčené synchronní reaktance [2]

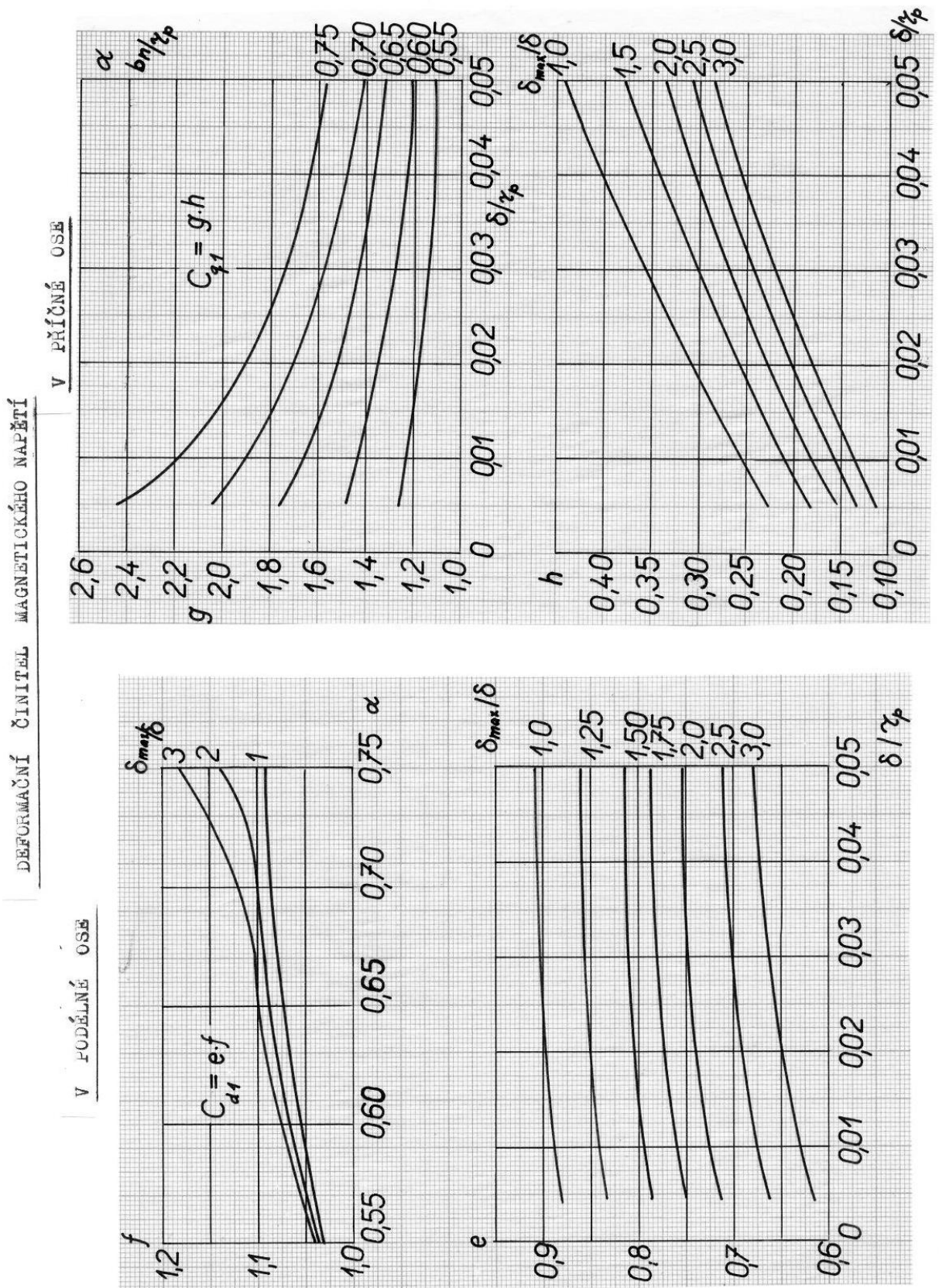
$2p$	2	4	6	8	10	12	16	20	24	28	40	56
x_d	200 ÷ 220	170	150	137	127	120	110	105	100	98	95	93

Tab. 6 – Určení x_d podle počtu pólů

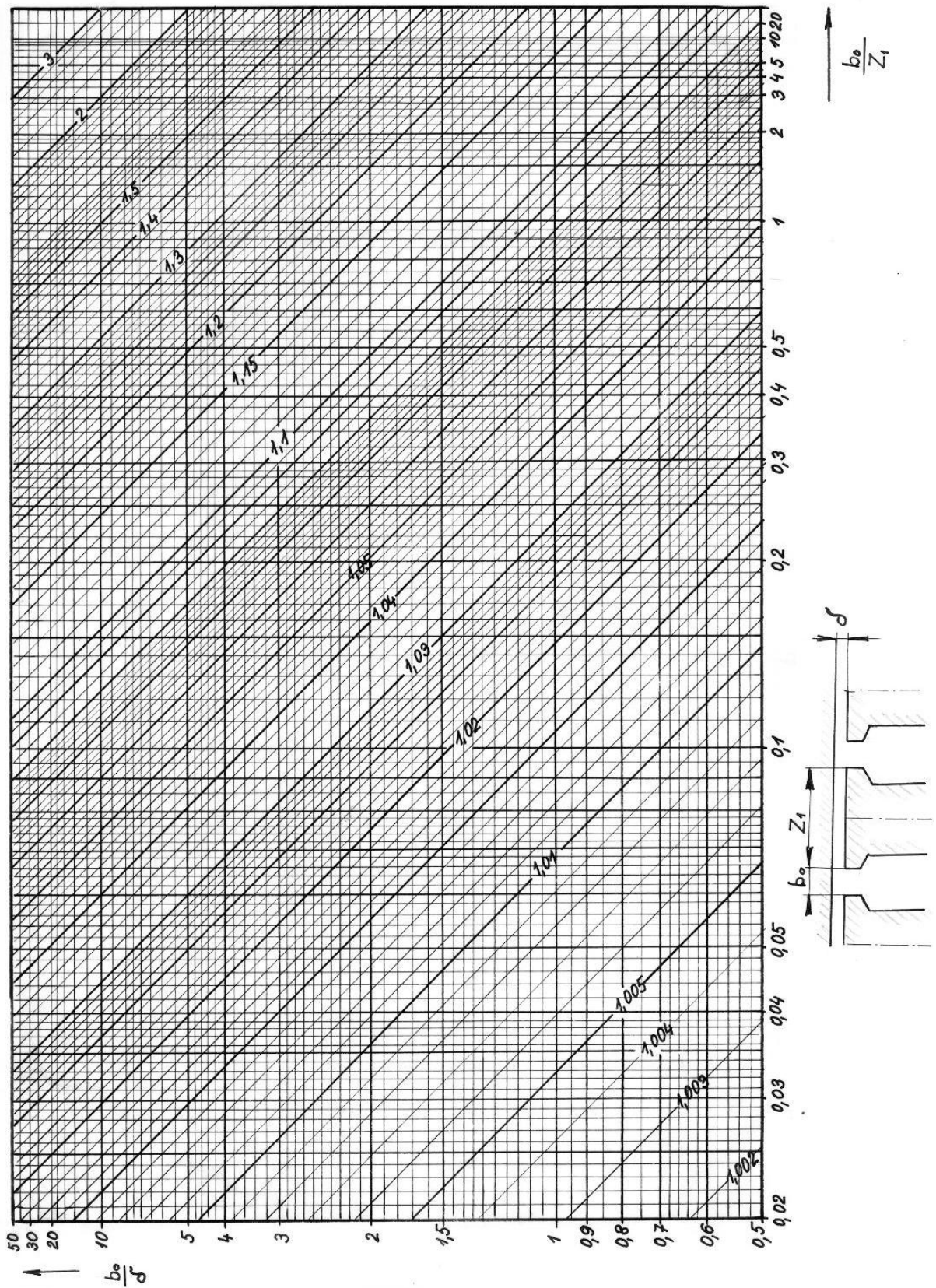
Příloha 10: Činitel základní harmonické magnetické indukce [3]



Příloha 11: Deformační činitel magnetického napětí [3]

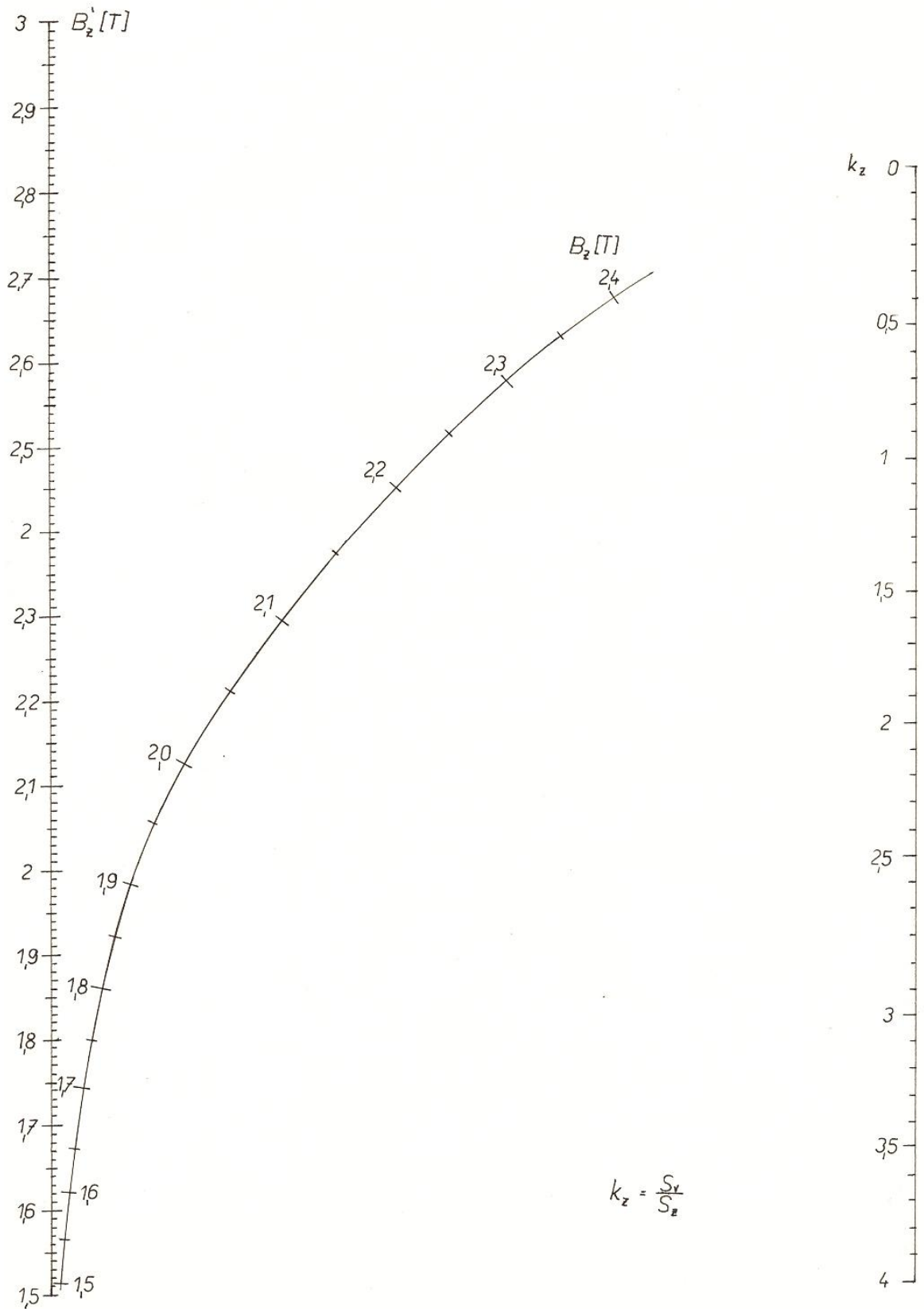


Příloha 12: Cartérův činitel na drážkování [3]

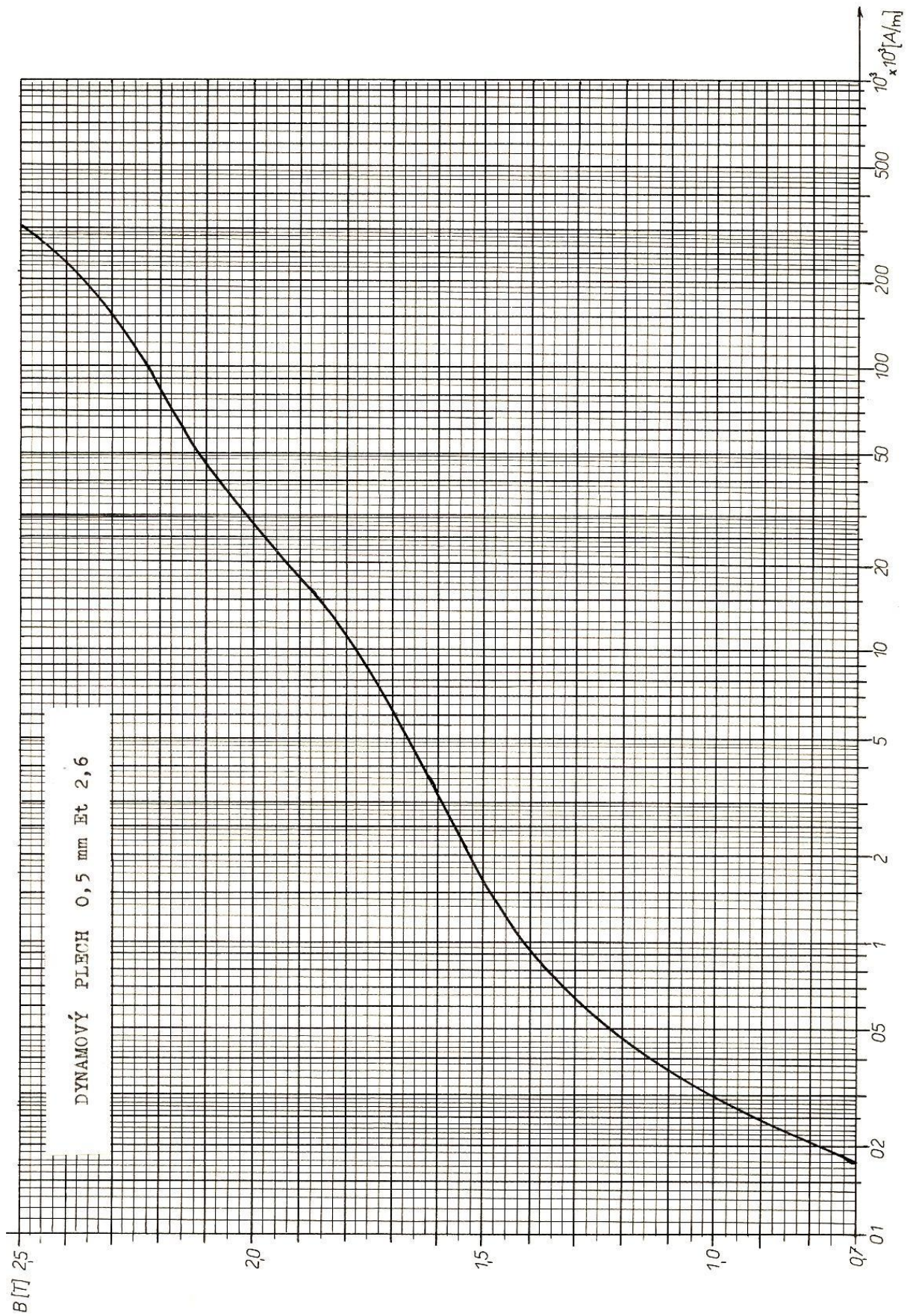


Příloha 13: Nomogram k určení skutečné indukce v zubech induktu [3]

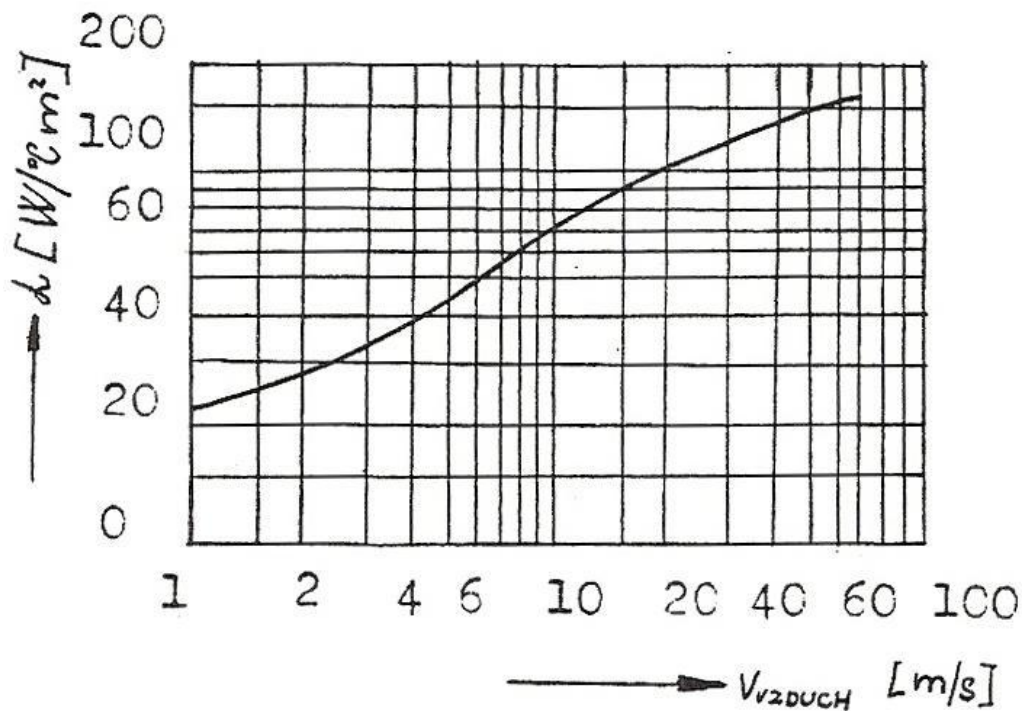
Dynamový plech $t_{1.0,5}$ $\Delta p_{Fc,1.0} = 1,8$



Příloha 14: Graf závislosti magnetické indukce a intenzity magnetického pole [3]



Příloha 15: Chladihost v proudícím vzduchu [3]



Příloha 16: Charakteristické vlastnosti kartáčů vyrobených z elektrografitu [2]

Přechodové napětí	$u_{pr} = 2,1V$	Měrný tlak	$p_k = 18kPa$
Maximální proudové zatížení	$\sigma_k = 10A/cm^2$	Součinitel tření	$\mu = 0,15$
Maximální obvodová rychlost	$v_{MAX} = 40m/s$		

Tab. 7 – Charakteristické vlastnosti kartáčů vyrobených z elektrografitu

Příloha 17: Tabulka rozměrů kartáčů [2]

[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		

Tab. 8 – Tabulka rozměrů kartáčů

Příloha 18: Tabulky pro výpočet charakteristiky naprázdno (varianta 1) [2]

D_1	1600	t_{d1}	37,23	z_1	20,23	k_{z1}	1,00	B'_{z1}	1,70	B_{z1}	1,69	H_{z1}	5700	$H_{z\text{stř}}$	3583	F_z	412
$D_2 = D_1 + h_d$	1715	t_{d2}	39,91	z_2	22,91	k_{z2}	0,89	B'_{z2}	1,61	B_{z2}	1,61	H_{z2}	3400				
$D_3 = D_1 + 2h_d$	1830	t_{d3}	42,59	z_3	25,59	k_{z3}	0,81	B'_{z3}	1,54	B_{z3}	1,54	H_{z3}	2200				
						k_1	1,15	B'_{z1}	1,96	B_{z1}	1,92	H_{z1}	19000				
								B'_{z2}	1,85	B_{z2}	1,82	H_{z2}	12000		12583	F_z	1447
								B'_{z3}	1,77	B_{z3}	1,75	H_{z3}	8500				
								B'_{z1}	2,21	B_{z1}	2,07	H_{z1}	38000				
						k_2	1,30	B'_{z2}	2,09	B_{z2}	2,01	H_{z2}	28000		28500	F_z	3278
								B'_{z3}	2,00	B_{z3}	1,94	H_{z3}	21000				

Tab. 9 – Magnetizační charakteristika zubové vrstvy (varianta I)

	δ			k_{z1}			k_{z2}			k_{z3}			h_d			I_s			$F_\sigma = F_\delta + F_z + F_s$			I_p			I_r			$F = F_\delta + F_z + F_s + F_p + F_r$		
	B	H	F	B	H	F	B	H	F	B	H	F	B	H	F	B	H	F	B	H	F	B	H	F	B	H	F			
Vzduchová mezera	0,85		9800	0,85		9800	0,85		9800	0,85		9800	0,85		9800	0,85		9800	0,85		9800	0,85		9800	0,85		9800			
Hlava	B_{z1}'	1,70		B_{z1}'	1,70		B_{z1}	1,69		5700		1,96	19000		2,21	38000		11270												
	B_{z2}'	1,61		B_{z2}'	1,61		B_{z2}	1,61		3400		1,85	12000		2,09	28000														
Pata	B_{z3}'	1,54		B_{z3}'	1,54		B_{z3}	1,54		2200		1,77	8500		2,00	21000														
	B_{z3}	1,54		B_{z3}	1,54		B_{z3}	1,54		2200		1,75	8500		1,94	21000														
Hl. drážky	0,115		412	0,115		412	0,115		3583		412	0,115		12583		28500		1447												
Jádro induktu	0,324		204	0,324		204	0,324		630		204	0,324		1600		6000		518												
Magnetické napětí 1	$F_\sigma = F_\delta + F_z + F_s$		10416	$F_\sigma = F_\delta + F_z + F_s$		10416	$F_\sigma = F_\delta + F_z + F_s$				10416	$F_\sigma = F_\delta + F_z + F_s$						13235												
Pól	0,201		186	0,201		186	0,201		925		186	0,201		3400		12000		683												
Jho	0,183		110	0,183		110	0,183		600		110	0,183		950		1800		174												
Magnetické napětí 2	$F = F_p + F_r$		296	$F = F_p + F_r$		296	$F = F_p + F_r$				296	$F = F_p + F_r$						857												
Magnetické napětí	$F = F_\delta + F_z + F_s + F_p + F_r$		10712	$F = F_\delta + F_z + F_s + F_p + F_r$		10712	$F = F_\delta + F_z + F_s + F_p + F_r$		F_1		10712	$F = F_\delta + F_z + F_s + F_p + F_r$		F_2		F_3		14093												

Tab. 10 – Magnetizační charakteristika celého magnetického obvodu (varianta I)

Příloha 19: Tabulky pro výpočet charakteristiky naprázdno (varianta 2) [2]

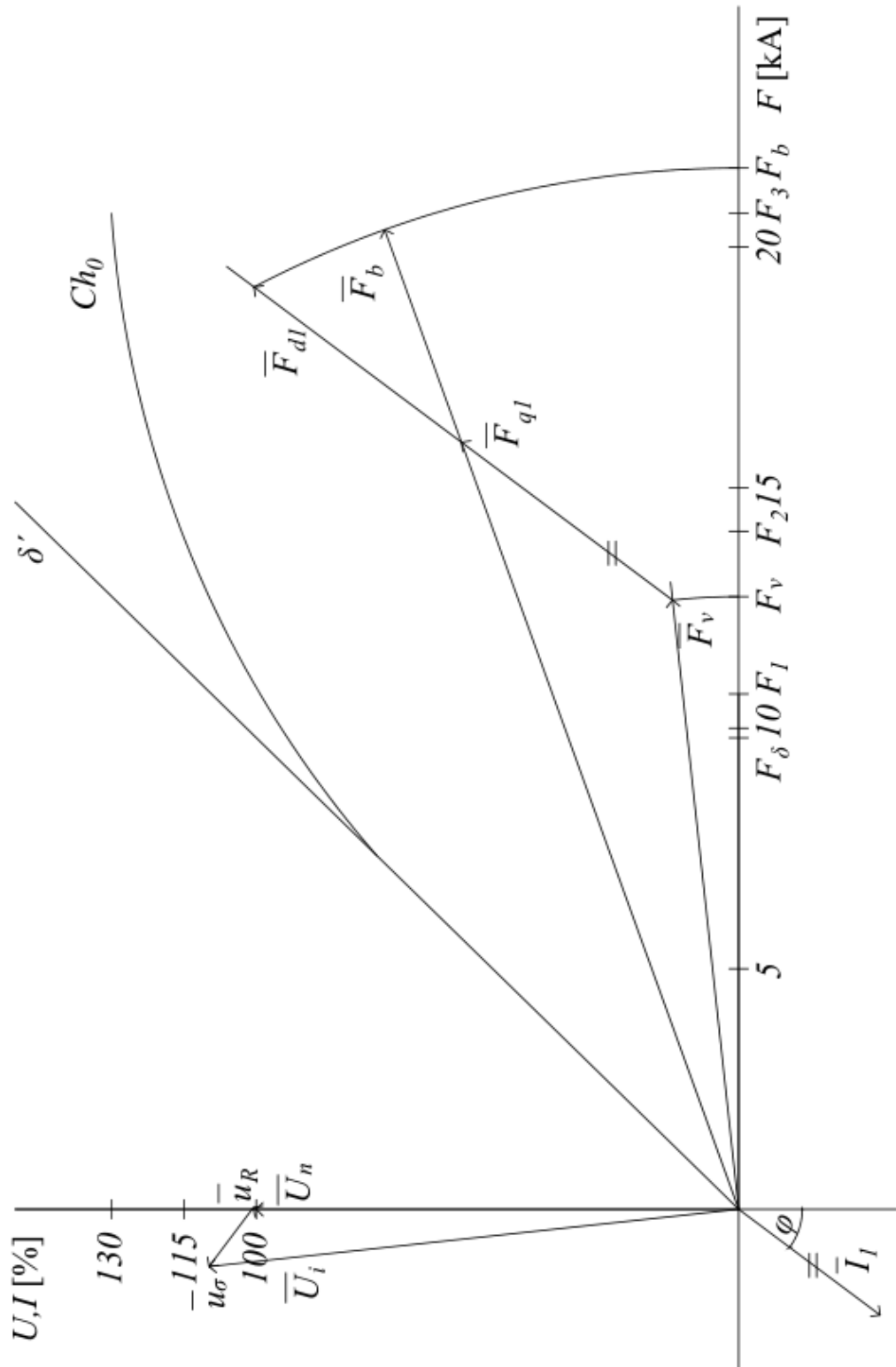
D_1	2300	t_{d1}	37,05	z_1	20,05	k_{z1}	1,01	B_{z1}'	1,71	B_{z1}	1,69	H_{z1}	5700	$H_{zstř}$	3917	F_z	450
$D_2 = D_1 + h_d$	2415	t_{d2}	38,91	z_2	21,91	k_{z2}	0,93	B_{z2}'	1,64	B_{z2}	1,63	H_{z2}	3800				
$D_3 = D_1 + 2h_d$	2530	t_{d3}	40,76	z_3	23,76	k_{z3}	0,86	B_{z3}'	1,58	B_{z3}	1,57	H_{z3}	2600				
								B_{z1}'	1,96	B_{z1}	1,92	H_{z1}	19000				
						k_1	1,15	B_{z2}'	1,89	B_{z2}	1,87	H_{z2}	16000	$H_{zstř}$	15667	F_z	1802
								B_{z3}'	1,82	B_{z3}	1,8	H_{z3}	11000				
								B_{z1}'	2,22	B_{z1}	2,09	H_{z1}	43000				
						k_2	1,30	B_{z2}'	2,13	B_{z2}	2,05	H_{z2}	35000	$H_{zstř}$	35167	F_z	4044
								B_{z3}'	2,06	B_{z3}	2,01	H_{z3}	28000				

Tab. 11 – Magnetizační charakteristika zubové vrstvy (varianta2)

		Φ			$k_1 \cdot \Phi$			$k_2 \cdot \Phi$		
		B	H	F	B	H	F	B	H	F
Vzduchová mezera	δ	0,85		13951			16044			18136
	k_{z1}	1,01	B_{z1}' B_{z1}	5700	1,96 1,92	19000		2,22 2,09	43000	
Zuby	k_{z2}	0,93	B_{z2}' B_{z2}	3800	1,89 1,87	16000		2,13 2,05	35000	
	k_{z3}	0,86	B_{z3}' B_{z3}	2600	1,82 1,8	11000		2,06 2,01	28000	
Hl. drážky		h_d	0,115	3917		15667	1802		35167	4044
Jádro induktu		l_s	0,449	630	1,50	1600	718	1,69	6000	2694
Magnetické napětí 1		$F_\sigma = F_\delta + F_z + F_s$					14684			24874
Pól		l_p	0,289	925	1,61	3400	983	1,82	12000	3468
Jho		l_r	0,263	600	1,27	950	250	1,43	1800	473
Magnetické napětí 2		$F = F_p + F_r$					425			3941
Magnetické napětí		$F = F_\delta + F_z + F_s + F_p + F_r$		F_1		F_2	19796		F_3	28816

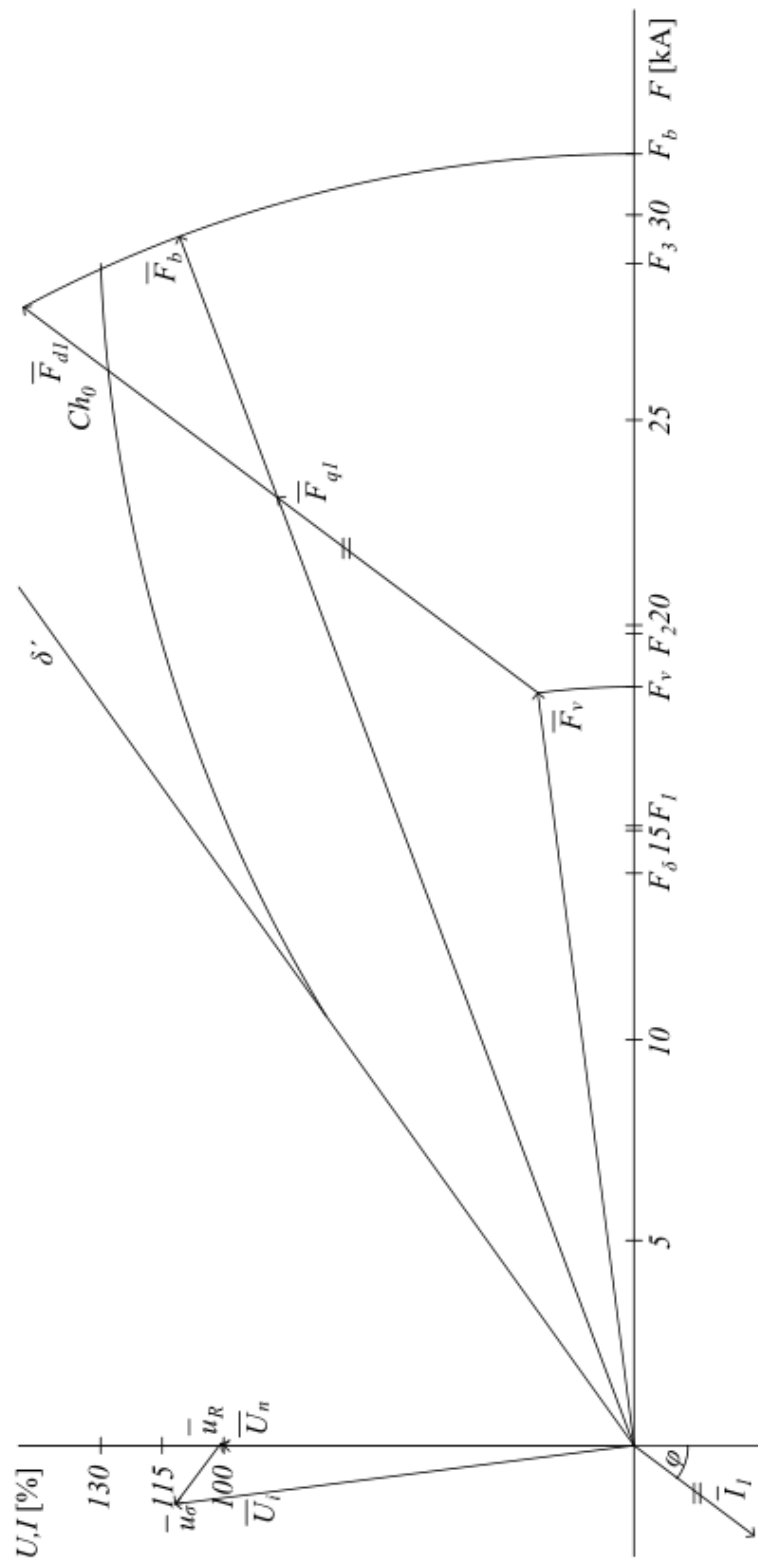
Tab. 12 – Magnetizační charakteristika celého magnetického obvodu (varianta2)

Příloha 20: Grafické provedení charakteristik naprázdno (varianta 1)



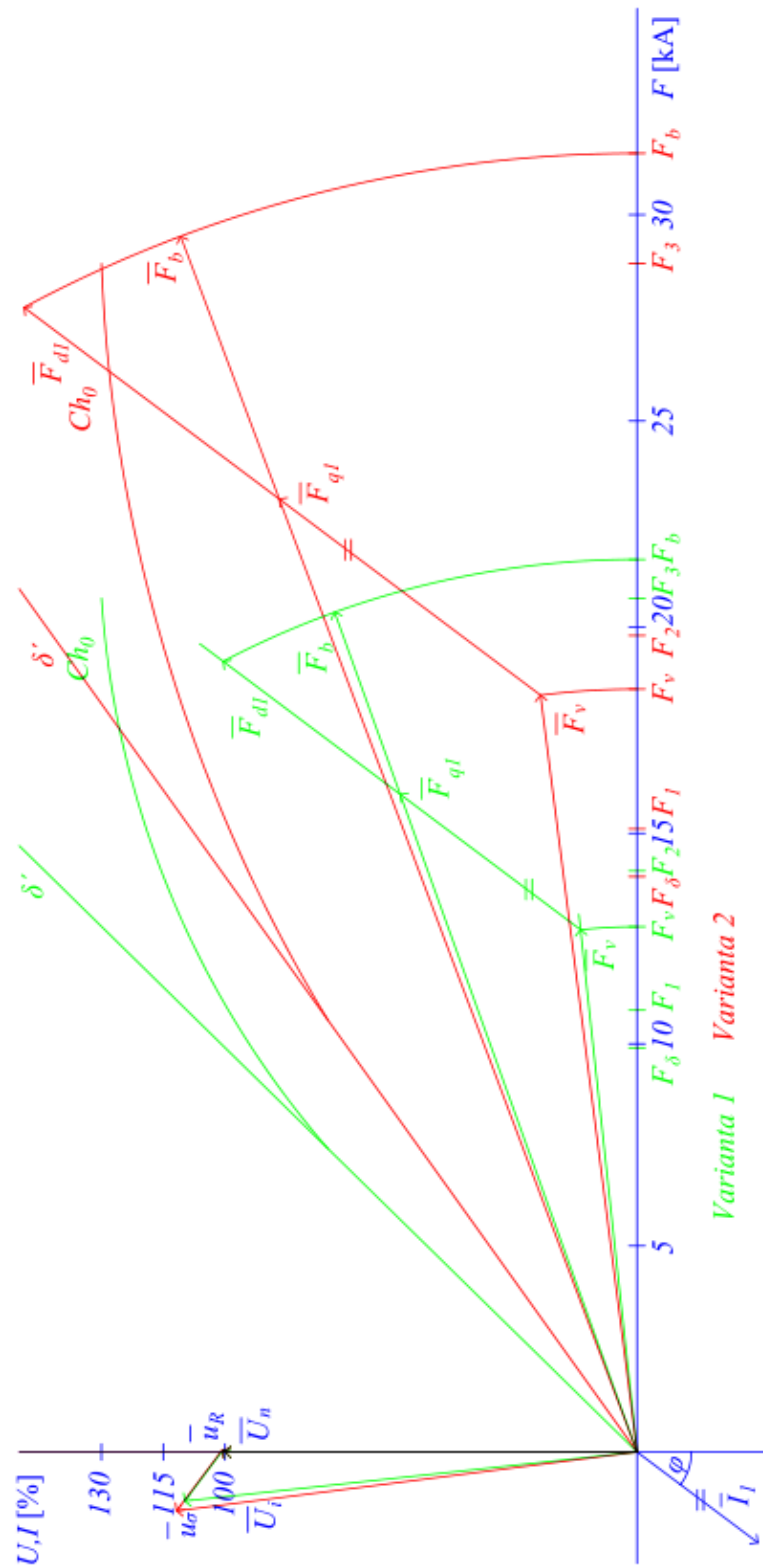
Obr. 13 – Charakteristika naprázdno (varianta 1)

Příloha 21: Grafické provedení charakteristiky naprázdno (varianta 2)



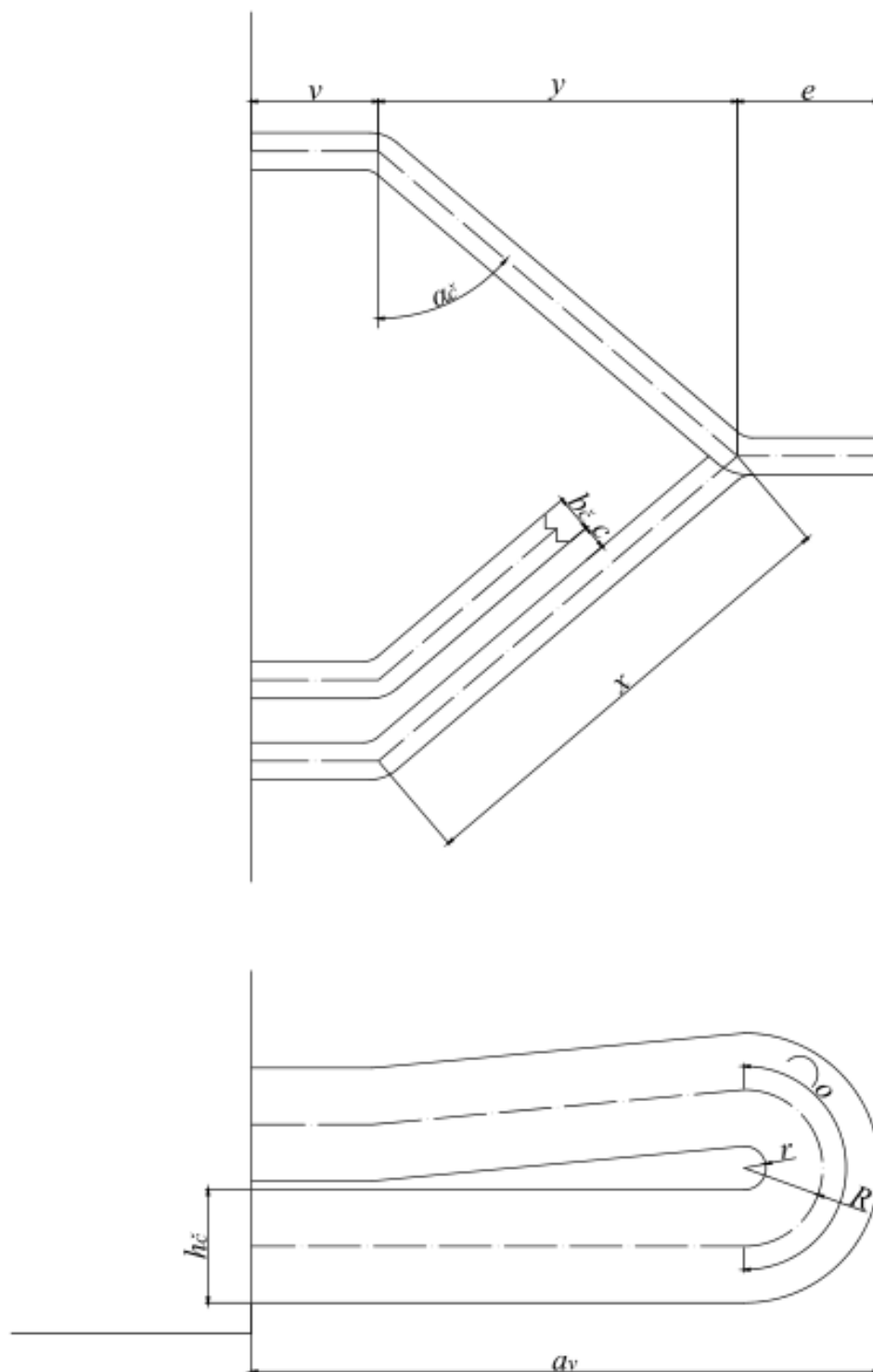
Obr. 14 – Charakteristika naprázdno (varianta 2)

Příloha 22: Charakteristiky naprázdno obou variant pro porovnání



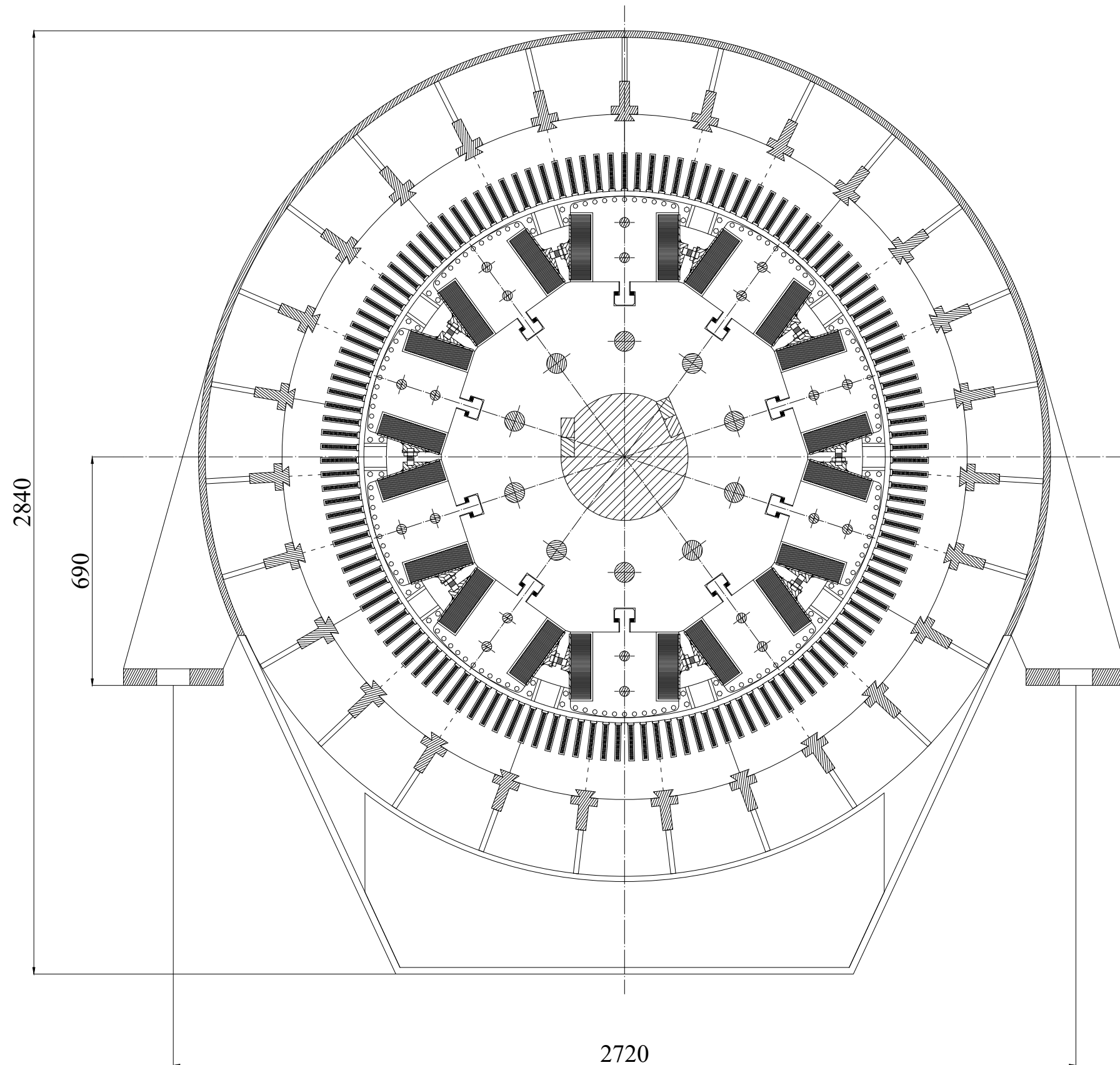
Obr. 15 – Charakteristiky naprázdno obou variant pro porovnání

Příloha 23: Rozměry vyložení čel



Obr. 16 – Rozměry vyložení čel

1:10

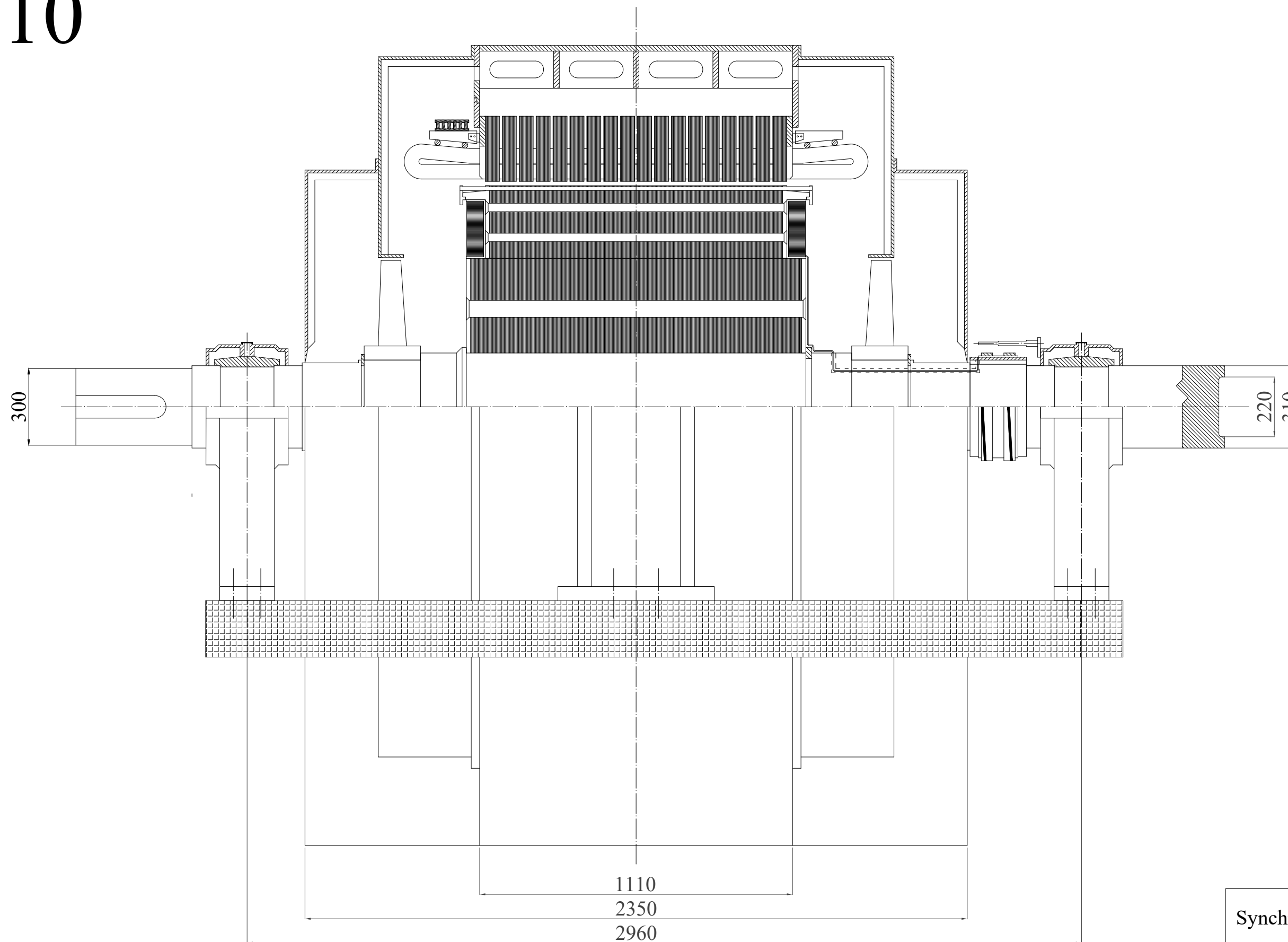


Synchronní generátor

Příčný řez - varianta 1

Vojtěch John

1:10

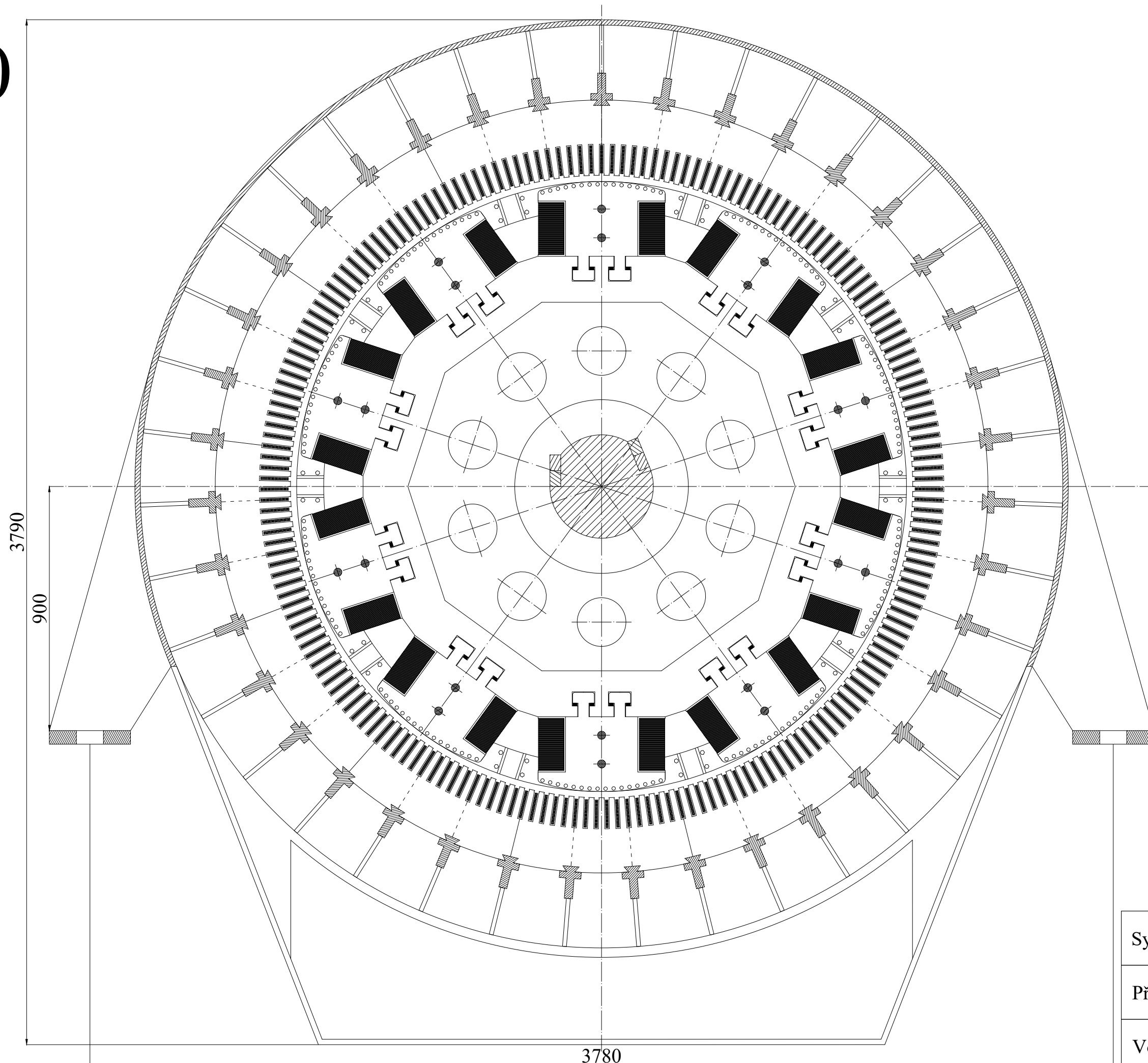


Synchronní generátor

Podélný řez - varianta 1

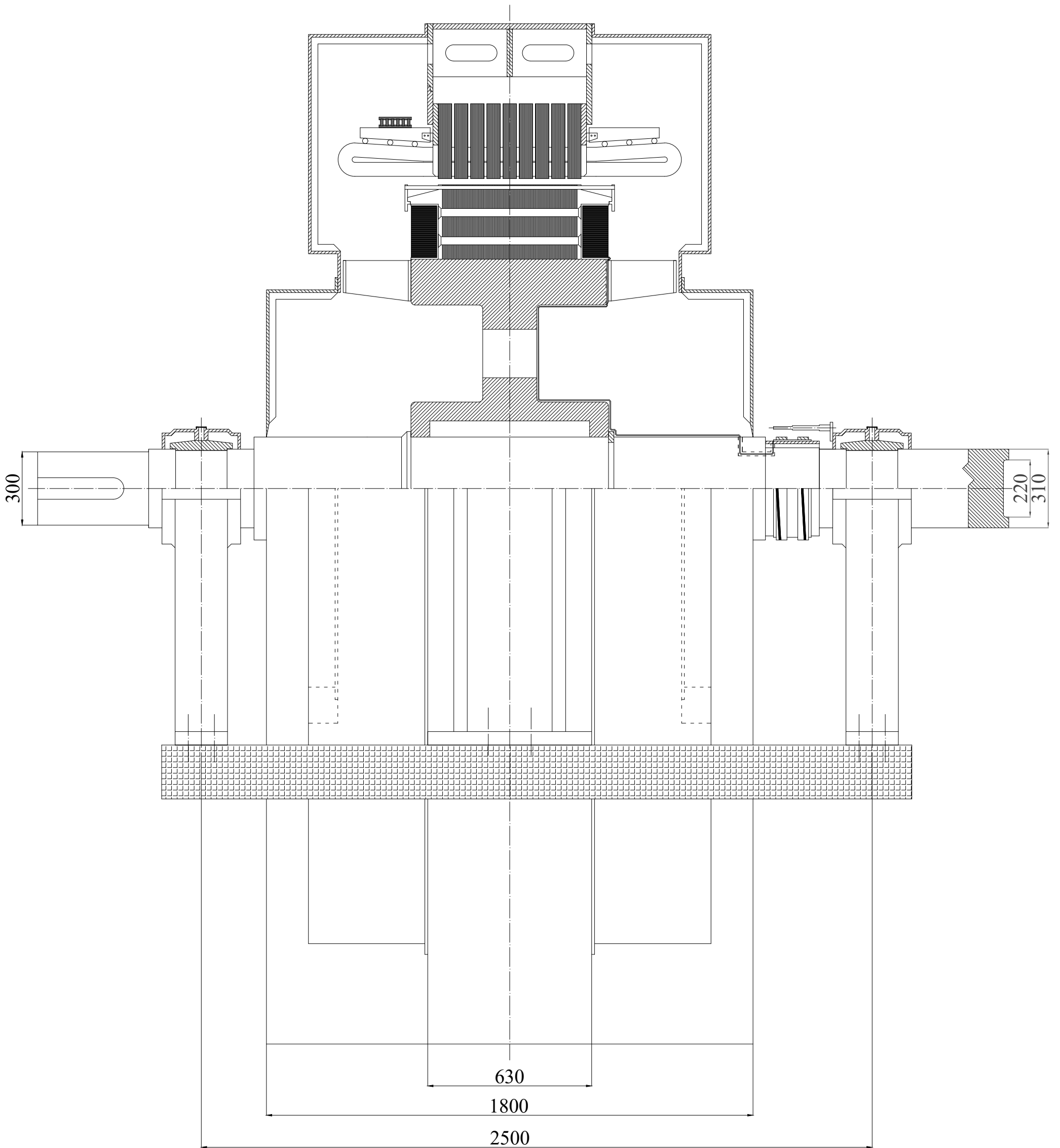
Vojtěch John

1:10



Synchronní generátor
Příčný řez - varianta 2
Vojtěch John

1:10



Synchronní generátor

Podélný řez - varianta 2

Vojtěch John