

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Návrh synchronního kompenzátoru

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

2014

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2013/2014

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

Jméno a příjmení: **Bc. Ladislav PONERT**
Osobní číslo: **E12N0162P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Průmyslová elektronika a elektromechanika**
Název tématu: **Návrh synchronního kompenzátoru**
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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


1. Proveďte elektromagnetický návrh stroje s parametry: $S=2100$ kVAr, $U=6300$ V, $2p=8$, $m=3$, $f=50$ Hz
2. Metodou náhradních tepelných obvodů proveďte výpočet oteplení statoru a pólové cívky.
3. Sestrojte zatěžovací charakteristiku.
4. Nakreslete podélný a příčný řez stroje.

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

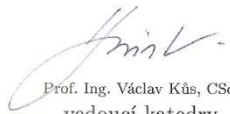
1. Cigánek L.: Stavba elektrických strojů. SNTL 1959
2. Kopylov I.P.: Stavba elektrických strojů. SNTL 1988
3. Červený J.: Stavba elektrických strojů,
portál ZCU Courseware, 2012
4. Červený J.: Postup při návrhu synchronního stroje,
portál ZCU Courseware, 2012

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

Datum zadání diplomové práce: 14. října 2013
Termín odevzdání diplomové práce: 12. května 2014


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




Prof. Ing. Václav Kús, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

Anotace

Předmětem diplomové práce je návrh synchronního kompenzátoru dle zadaných parametrů.

Cílem práce je provést elektromagnetický návrh stroje. Dále metodou náhradních tepelných obvodů provést výpočet oteplení statoru a pólové cívký. Sestrojit zatěžovací charakteristiku a nakreslit příčný a podélný řez stroje.

Klíčová slova

Synchronní kompenzátor, elektromagnetický návrh, charakteristika naprázdno, oteplení, náhradní tepelné obvody, zatěžovací charakteristika, příčný řez stroje, podélný řez stroje.

Design of a Synchronous Compensator

Abstract

The subject of this diploma thesis is the design of a synchronous compensator according to the specified parameters.

The aim of this work is to perform the electromagnetic design of the machine, calculate the warming of the stator and pole coils by method of substitutional thermal circuits, construct the load characteristic and draw transverse and longitudinal section of the machine.

Key words

Synchronous compensator, electromagnetic design, no-load characteristics, warming, alternative heat circuits, load characteristics, transverse section of a synchronous machine, longitudinal section of synchronous a machine.

Prohlášení

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

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

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

V Plzni dne 12.5.2014

.....
Jméno a příjmení

Poděkování

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

Obsah

Seznam v práci použitých symbolů a zkratk	10
1 Úvod	13
2 Elektromagnetický návrh stroje	15
2.1 Zadané parametry	15
2.2 Výpočet základních parametrů	15
2.3 Návrh vinutí induktu	16
2.3.1 Parametry vinutí	18
2.3.2 Výpočet činitelů vinutí	19
2.3.3 Návrh drážky	20
2.3.4 Odpor a rozptylová reaktance statorového vinutí	23
2.4 Návrh magnetického obvodu	26
2.4.1 Určení magnetického toku	26
2.4.2 Velikost vzduchové mezery	26
2.4.3 Magnetické napětí reakce kotvy	27
2.4.4 Dimenzování magnetického obvodu	27
2.4.5 Charakteristika naprázdno	29
2.4.6 Návrh budícího vinutí	33
2.5 Kroužky a kartáče	35
2.6 Výpočet celkových ztrát	36
2.7 Výpočet tlumícího (rozběhového) vinutí	38
3 Návrh připevnění pólů stroje	40
3.1 Připevnění pomocí kladiva	41
4 Výpočet oteplení statoru a pólové cívky	43
4.1 Tepelné obvody	43
4.2 Výpočet oteplení induktu	44
4.2.1 Výpočet oteplení v drážkové části vinutí	44
4.2.2 Výpočet oteplení čel vinutí	50
4.3 Orientační výpočet oteplení pólové cívky	51
5 Zatěžovací charakteristika stroje	53
6 Závěr	55
Seznam použité a citované literatury	56

Seznam příloh	1
Přílohy	2

Seznam v práci použitých symbolů a zkratk

U [V]	Sdružené napětí
P [W]	Činný výkon stroje
Q [VAr]	Jalový výkon stroje
S [VA]	Zdánlivý výkon stroje
$\cos\varphi$ [-]	Účinník stroje
f [Hz]	Frekvence
n [ot.min ⁻¹]	Jmenovité otáčky stroje
m [-]	Počet fází stroje
U_f [V]	Fázové napětí
I_1 [A]	Fázový proud
D_1 [m]	Průměr induktu
α [-]	Činitel pólového krití
p [-]	Počet pólpárů
t_p [m]	Mezipólová rozteč
Q [-]	Počet drážek induktu
q [-]	Počet drážek na pól a fázi
N_S [-]	Počet drážek v sérii jedné faze
n_d [-]	Celkový počet vodičů v drážce
a_{st} [-]	Počet paralelních větví každé faze
A [A/m]	Obvodová proudová hustota
β [-]	Činitel zkrácení kroku
y_{1d} [-]	Cívkový krok
y_K [-]	Krok na komutátoru
K [-]	Počet lamel komutátoru
u [-]	Konstanta rozložení cívkových stran v drážce
k_v [-]	Činitel vinutí
C [VA/m ³ ot/min]	Essonův činitel elektromagnetického využití stroje
l_e [m]	Efektivní délka stroje
\check{s}_k [m]	Šířka radiálního chladicího kanálu
\check{s}_p [m]	Šířka paketu plechového svazku
i [-]	Počet paketů statorového svazku
i_k [-]	Počet chladících kanálů

l [m]	Celková délka stroje
l_c [m]	Délka čela cívký
t_{d1} [m]	Drážková rozteč
z_1 [m]	Šířka zubu
b_d [m]	Šířka drážky
B_δ [T]	Magnetická indukce ve vzduchové mezeře
B_z [T]	Magnetická indukce v zubu
k_{Fe} [-]	Činitel plnění plechového svazku
S_{cu} [m ²]	Průřez vodiče
σ_{cu} [A/mm ²]	Proudová hustota ve vodiči
b_v [m]	Šířka vodiče
h_v [m]	Výška vodiče
R_{1f} [Ω]	Elektrický odpor jedné fáze
u_R [%]	Procentní hodnota úbytku napětí na odporu fáze
X_σ [Ω]	Rozptylová reaktance vinutí
u_σ [%]	Procentní hodnota rozptylové reaktance jedné fáze
Φ [Wb]	Magnetický tok
δ [m]	Výška vzduchové mezery
F_A [A]	Magnetické napětí reakce kotvy
F_{d1} [A]	Magnetické napětí reakce kotvy v podélném směru
F_{q1} [A]	Magnetické napětí reakce kotvy v příčném směru
\check{s}_p [m]	Šířka pólu
h_p [m]	Výška pólu
\check{s}_n [m]	Šířka nástavce
h_n [m]	Výška nástavce
B_{js} [T]	Magnetická indukce ve jhu statoru
B_{jr} [T]	Magnetická indukce ve jhu rotoru
l_p [m]	Délka pólu
l_s [m]	Délka jha statoru
l_r [m]	Délka jha rotoru
k_{ck} [-]	Carterův činitel
F_δ [A]	Magnetické napětí ve vzduchové mezeře
F_b [A]	Magnetické napětí budícího vinutí
l_{bs} [m]	Střední délka závitu budícího vinutí

N_b [-]	Počet závitů budící cívky
I_b [A]	Budící proud
n_p [-]	Počet poloh vodičů budící cívky
b_c [m]	Šířka cívky
h_c [m]	Výška cívky
O_{2pc} [m ²]	Ochlazovací plocha všech budících cívek
ΔP_{Cub} [W]	Jouleovy ztráty v budícím vinutím
ΔP_{Cu1} [W]	Jouleovy ztráty v induktu
ΔP_{Fej} [W]	Jouleovy ztráty v jádře induktu
ΔP_{Fez} [W]	Jouleovy ztráty v zubech
$\Delta \vartheta_{Cub}$ [°C]	Oteplení budících cívek
m_{Fer} [kg]	Hmotnost rotorových plechů
m_{Fez} [kg]	Hmotnost zubů statoru
ΔP_p [W]	Povrchové ztráty
$\Delta P_{Přid}$ [W]	Přídavné ztráty
ΔP [W]	Celkové ztráty vzniklé ve stroji
F_o [N]	Odstředivá síla
m [kg]	Hmotnost
ω [rad/s]	Úhlová rychlost
λ [W/°C.m]	Měrná tepelná vodivost
α [W/m ² C]	Součinitel přestupu tepla
Q [W]	Tepelný tok
c [W/kgK]	hmotnostní měrné teplo
c_p [W/m ³ K]	Objemové měrné teplo prostředí
Q_c [-]	Počet čel
ϑ_0 [°C]	Teplota okolí
O_{iz} [m]	Obvod izolace
R [m ² K/W]	Tepelný odpor
Q [m ³ /s]	Množství chladícího média

1 Úvod

Synchronní kompenzátor je synchronní stroj, kterého se používá k regulaci napětí velkých sítí, tzn. při přenosu energie po dlouhých vedeních. Při přenosu velmi velkých energií je třeba dodávat dálkovému vedení přídatný jalový proud, protože jinak by v síti kolísalo napětí v závislosti na odebíraném výkonu. Dodávka jalového výkonu musí být proto spojitě regulována podle velikosti zatížení. Kdyby nebyla plynulá regulace nutná, bylo by možné nahradit synchronní kompenzátor baterií statických kondenzátorů; při použití kondenzátorů je možné kapacitu zapínat nebo vypínat pouze po skocích, proto se dává obvykle přednost synchronnímu kompenzátoru. Dálkové vedení při chodu naprázdno svým kapacitním účinkem zvyšuje napětí. Toto zvýšení je možné kompenzovat buď zapnutím tlumivek, nebo podbuzeným synchronním kompenzátozem. Také v tomto případě se dává přednost synchronnímu kompenzátoru, vzhledem k jeho možnosti spojitě regulovat jalový výkon.

Protože synchronní kompenzátor neodevzdává žádný činný výkon, nepotřebuje pohon a v určitém slova smyslu vlastně ani „hřídel“, stačí mu pouze „otáčivá osa“. Práci potřebnou ke krytí tření v ložiskách i ostatních ztrát, vznikajících při normálním provozu, dodává síť. Pro rozběh stroje je vypracováno několik různých způsobů:

- a) Asynchronní rozběh spouštěcím transformátorem – pro tento způsob spouštění jsou póly opatřeny rozběhovým vinutím s velkou tepelnou kapacitou. Rozběhové vinutí může být při rozběhu chlazeno a ložiska mohou být upraveno pro nadlehčení rotoru tlakovým olejem po dobu rozběhu.
- b) Rozběh pomocným roztáčecím motorem, který může být stejnosměrný nebo trojfázový asynchronní.

Při volbě otáčivé rychlosti synchronního kompenzátoru není konstruktér ničím omezován. Z důvodu hospodárnosti se obvykle rozhoduje pro pokud možno největší otáčivou rychlost. Výhodou ve srovnání se stavbou hydroalternátorů je, že není nutné brát zřetel na průběžnou otáčivou rychlost. Platí zde stejné podmínky jako u alternátorů poháněných parními turbínami, že totiž vzhledem k malému rozdílu mezi odstředivými silami při zkoušce mechanické pevnosti a při jmenovité otáčivé rychlosti se vyskytují v normálním provozu u synchronních kompenzátorů větší namáhání, než např. u hydroalternátorů. Na tuto skutečnost se musí pamatovat při výběru vhodných materiálů, zvláště pak při volbě rotorové izolace a materiálu pro zhotovení rámečků rotorových cívek. Velká otáčivá rychlost je přirozeně příčinou značných ztrát, způsobených třením o vzduch.

Proto byl zaveden vodík jako chladící médium dříve u kompenzátorů než u alternátorů. Použití vodíku usnadňovalo také to, že kompenzátor může být v úplně uzavřeném statoru, bez konstrukčně obtížného těsnění průchodu hřídelových konců čelními zákryty statoru. Oběhové chlazení s vodíkem pod zvýšeným tlakem umožňuje značně stupňovat využití typové velikosti.

Statory, jejich zákryty, víka apod. musí být u kompenzátorů chlazených vodíkem bezpečné proti výbuchu a musí být těsné proti unikání vodíku, tzn. ztráta vodíku za 24 h nesmí být větší než asi $1/10 \text{ m}^3$.

Souprava pro vodíkové chlazení musí také obsahovat zařízení pro udržování stálého tlaku i předepsaného stupně čistoty vodíku a nutně i zařízení pro vyplachování stroje CO_2 .

[1]

2 Elektromagnetický návrh stroje

Elektromagnetický výpočet je složen z určení hlavních rozměrů a parametrů stroje, z rozložení vinutí a izolačního systému v drážce, z dimenzování magnetického obvodu a s tím spojeným sestavením charakteristiky naprázdno, dále z návrhu budícího vinutí a závěrem výpočtem ztrát.

2.1 Zadané parametry

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

Parametry:

Zdánlivý výkon $S = 2100$ kVAr

Sdružené napětí $U = 6300$ V

Počet pólů $2p=8$

Počet fází $m = 3$

Frekvence $f = 50$ Hz

Účinník $\cos\varphi = 0$

2.2 Výpočet základních parametrů

Fázové napětí:

$$U_f = \frac{U}{\sqrt{3}} = \frac{6300}{\sqrt{3}} = 3637,3 \text{ V} \quad (2.1)$$

Jmenovité otáčky:

$$n = \frac{60 \cdot f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{4} = 750 \text{ ot/min} \quad (2.2)$$

Fázový proud:

$$I_1 = \frac{S}{U_s \cdot \sqrt{3}} = \frac{2100 \cdot 10^3}{6300 \cdot \sqrt{3}} = 192,45 \text{ A} \quad (2.3)$$

Průměr induktu (statoru) ve vzduchové mezeře:

a) Podle empirického vztahu:

$$D_1 = 0,08 \cdot (2p)^{0,625} \cdot S^{0,185} = 0,08 \cdot (8)^{0,625} \cdot 2100^{0,185} = 1,2 \text{ m} \quad (2.4)$$

b) Odečteno z grafu (Příloha č.1)

$$D_1 = 1,2 \text{ m}$$

Volím: $D_1 = 1,2 \text{ m}$

Odečteno z grafu (Příloha č.2):

Obvodová proudová hustota:

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

Indukce ve vzduchové mezeře:

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

Volím činitele pólového krytí:

$$\alpha = 0,65$$

Mezipólová rozteč:

$$t_p = \frac{\pi \cdot D_1}{2p} = \frac{\pi \cdot 1,2}{8} = 0,47 \text{ m} \quad (2.5)$$

2.3 Návrh vinutí induktu

S ohledem na průměr a napětí volím mezidrážkovou rozteč:

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

Tomu odpovídá:

počet drážek induktu:

$$Q = \frac{\pi \cdot D_1}{t_{d1}} = \frac{\pi \cdot 1200}{40} = 94,24 \rightarrow 94 \quad (2.6)$$

a počet drážek na pól a fázi:

$$q = \frac{Q}{2 \cdot p \cdot m} = \frac{94}{8 \cdot 3} = 3,92 \quad (2.7)$$

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

Aby byl počet drážek v každé fázi stejný, tedy $Q_f = \frac{Q}{m} = \frac{2p \cdot m \cdot q}{m} = 2p \cdot q = 2p \cdot \frac{n}{c} =$
 č. celé, může být jmenovatel zlomku $c = 2$ nebo 4 .

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

$$q = \frac{8}{2}$$

$$\text{a pak je } Q = 2p \cdot m \cdot q = 8 \cdot 3 \cdot \frac{8}{2} = 96 = 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 6 \quad (2.8)$$

Jestliže při skládání plechů je možný poloviční nebo třetinový překlad ($k = 2$ nebo 3) musí platit: $Q = k \cdot n_s \cdot Q_{př}$, (2.9)

kde je n_s počet segmentů

$Q_{př}$ počet drážek na překlad

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

Po volbě překladového čísla $k = 2$ obdržíme:

překladové číslo $k = 2$

počet segmentů $n_s = 6$

počet drážek na překlad $Q_{př} = 8$

Počet závitů jedné fáze v sérii:

$$N_s = \frac{\pi \cdot D_1 \cdot A}{2 \cdot m \cdot l_1} = \frac{\pi \cdot 1,2 \cdot 56000}{2 \cdot 3 \cdot 192,45} = 182,83 \quad (2.10)$$

Počet vodičů v drážce:

$$n_d = \frac{a_{\approx} \cdot N_s}{p \cdot q} = \frac{1 \cdot 182,83}{4 \cdot \frac{8}{2}} = 11,42 \rightarrow 12 \quad (2.11)$$

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

Zaokrouhlím na: $n_d = 12$

Počet závitů v sérii jedné fáze:

$$N_s = \frac{n_d \cdot p \cdot q}{a_{st}} = \frac{12 \cdot 4 \cdot \frac{8}{2}}{1} = 192 \quad (2.12)$$

Skutečné hodnota obvodové proudové hustoty:

$$A = \frac{2 \cdot m \cdot I_1}{\pi \cdot D_1} \cdot N_s = \frac{2 \cdot 3 \cdot 192,45}{\pi \cdot 1,2} \cdot 192 = 58\,808,39 \text{ A/m} \quad (2.13)$$

2.3.1 Parametry vinutí

Počet drážek: $Q = 96$

Počet pólů: $2p = 8$

Počet fází: $m = 3$

Matematický počet fází: $m' = 6$

Počet drážek na pól a fázi: $q = \frac{8}{2}$

Typ vinutí: vlnové

Počet drážek na pól:

$$Q_p = \frac{Q}{2p} = \frac{96}{8} = 12 \quad (2.14)$$

Volíme cívkový krok:

$$y_{1d} = Q_p \cdot 0,8\bar{3} = 12 \cdot 0,8\bar{3} = 9,96 \rightarrow 10 \quad (2.15)$$

Poměrné zkrácení kroku:

$$\beta = \frac{y_{1d}}{Q_p} = \frac{10}{12} = 0,83 \quad (2.16)$$

Počet lamel komutátoru:

$$K = u \cdot Q = 1 \cdot 96 = 96 \quad (2.17)$$

Krok na komutátoru:

$$y_k = \frac{\varepsilon \cdot K \pm a_{ss}}{p} = \frac{1 \cdot 96 \pm 4}{4} = \frac{96-4}{4} = 23 \quad (2.18)$$

Přední cívkový krok:

$$y_1 = 2 \cdot u \cdot y_{1d} + 1 = 2 \cdot 1 \cdot 10 + 1 = 21 \quad (2.19)$$

Zadní cívkový krok:

$$y_2 = 2 \cdot y_k - y_1 = 2 \cdot 23 - 21 = 25 \quad (2.20)$$

Vinutí střídavé:

$$a_{ss} \cdot m' = 4 \cdot 6 = 24 \quad (2.21)$$

Počet skupin v jedné fázi:

$$\frac{a_{SS} \cdot m'}{m} = \frac{4 \cdot 6}{3} = 8 \quad (2.22)$$

Počet cívek ve skupině:

$$\frac{Q}{a_{SS} \cdot m'} = \frac{96}{4 \cdot 6} = 4 \quad (2.23)$$

2.3.2 Výpočet činitelů vinutí

Činitel vinutí v -té harmonické:

$$k_{vv} = \sin\left(\nu \cdot \beta \cdot \frac{\pi}{2}\right) \frac{\sin \nu \cdot \frac{\pi}{m'}}{n \cdot \sin \nu \cdot \frac{\pi}{m' \cdot n}} = \sin\left(1 \cdot 0,83 \cdot \frac{\pi}{2}\right) \frac{\sin 1 \cdot \frac{\pi}{6}}{8 \cdot \sin 1 \cdot \frac{\pi}{6 \cdot 8}} = 0,9231 = k_{v1} \quad (2.24)$$

Kde:

ν řád harmonické

β poměrné zkrácení kroku

m' matematický počet fází

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

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

$$k_{v5} = 0,0503$$

$$k_{v7} = -0,0366$$

$$k_{v11} = -0,0916$$

$$k_{v13} = -0,0803$$

Nyní můžeme určit skutečnou hodnotu Essonova činitele elektromagnetického využití stroje:

$$C = \frac{\pi^2}{60 \cdot \sqrt{2}} \cdot A \cdot B_{\delta} \cdot k_{v1} = \frac{\pi^2}{60 \cdot \sqrt{2}} \cdot 58803,39 \cdot 0,81 \cdot 0,923 = 5,11 \frac{kVA}{m^3 \cdot \frac{0T}{min}} \quad (2.25)$$

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

Z toho vychází efektivní délka stroje:

$$l_e = \frac{S}{C \cdot D_1^2 \cdot n} = \frac{2100}{5,11 \cdot 1,2^2 \cdot 750} = 0,38022 \text{ m} \quad (2.26)$$

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

Počet paketů:

$$i = \frac{l_e}{\check{s}_p} = \frac{0,38022}{0,05} = 7,6 \rightarrow 8 \quad (2.27)$$

Počet kanálů:

$$i_k = i - 1 = 8 - 1 = 7 \quad (2.28)$$

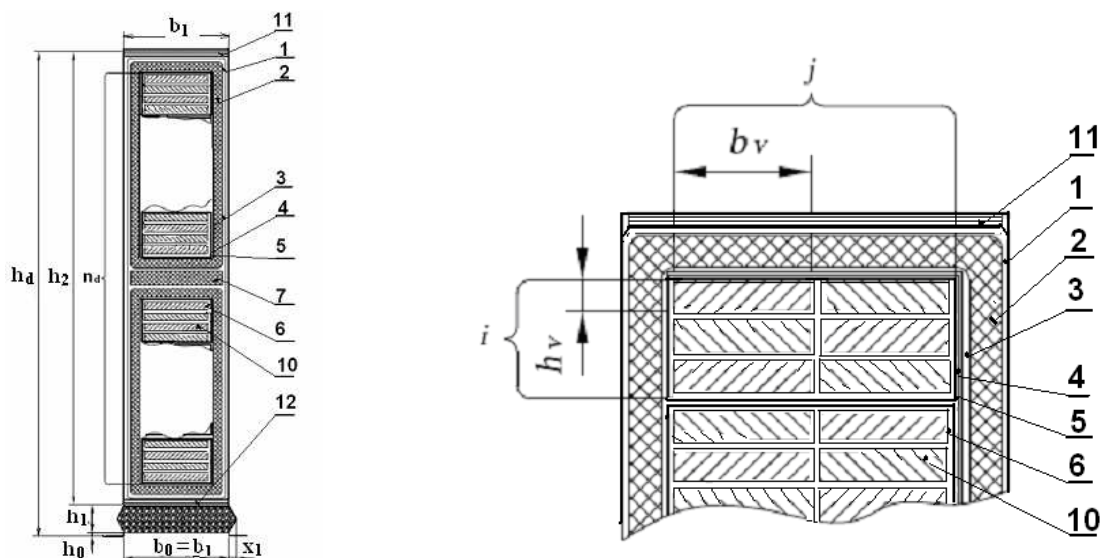
Celková délka induktu (včetně radiálních kanálů):

$$L = l_e + \check{s}_k \cdot i_k = 0,38022 + 0,01 \cdot 7 = 0,45022 \text{ m} \quad (2.29)$$

2.3.3 Návrh drážky

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

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



Obrázek 2.1 Uspořádání drážky tvaru M

Velikost drážkové rozteče na průměr D_1 :

$$t_{d1} = \frac{\pi \cdot D_1}{Q} = \frac{\pi \cdot 1200}{96} = 39,26 \text{ mm} \quad (2.30)$$

Šířka zubu:

$$z_1 = \frac{B_{\delta} \cdot t_{d1}}{B'_{z1} \cdot k_{Fe}} = \frac{0,81 \cdot 39,26}{1,7 \cdot 0,92} = 20,33 \text{ mm} \quad (2.31)$$

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

k_{Fe} činitel plnění železa

Tomu odpovídá šířka drážky:

$$b_d = t_d - z_1 = 39,26 - 20,338 = 18,93 \text{ mm} \quad (2.32)$$

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

$$b_d = 19 \text{ mm}$$

a skutečná šířka zubu:

$$z_1 = t_{d1} - b_d = 39,26 - 19 = 20,26 \text{ mm} \quad (2.33)$$

Jedná se o závitové vinutí ($n_d=12$), tomu odpovídá pro napětí 6,3 kV následující uspořádání vodičů a izolace v drážce:

Poz	Položka	Šířka	Hloubka
1	Vyložení drážky 1)	2 . 0,15	3 . 0,15
2	Izolace proti železu	2 . $t_i \rightarrow 2 . 2,7$	4 . $t_i \rightarrow 4 . 2,7$
3	Tmelení	2 . 0,1	4 . 0,1
4	Stažení vodičů	2 . 0,15	4 . 0,15
5	Izolace závitů	2 . 0,38	2 . $n_d . 0,48 \rightarrow 2 . 12 . 0,48$
6	Izolace vodičů 2)	1 j.0,37 \rightarrow 1.2.0,37	$n_d . i . 0,37 \rightarrow 12 . 2 . 0,37$
7	Mezivrstva	-	1 . $m_v \rightarrow 1 . 4$
8	Σ izolace		7,7
9	Vůle na šířku	0,2 až 0,6	0,3
10	Holý vodič 3)	j.b.v. \rightarrow 2.5,5	11
11	Vložka na dno	-	1 . 1
12	Vložka pod klín	-	1 . 0,5
13	Vůle na hloubku	-	0,4 až 2,0
14	Rozměr drážky bez klínu	b_d	19
15	Klín + můstek	-	$h_0 + h_1 \rightarrow 1 + 6$
16	Konečný rozměr drážky	b_d	19
			h_d
			100

Tabulka 2.1 Rozměry drážky

- 1) jen do napětí 6,3 kV, pro vyšší napětí se povrch cívky je natírá polovodivým nátěrem a ten musí přijít do styku s povrchem drážky a proto se vyložení drážky nepoužívá

- 2) jde o oboustranný přírůstek izolace
 3) rozměry vodičů jsou podle ČSN (Příloha č.4)

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

Tabulka 2.2 Rozměry izolací

Průřez vodiče:

$$S'_{Cu1} = \frac{I_1}{a_{st}\sigma_{Cu1}} = \frac{192,45}{1,4,156} = 46,3 \text{ mm}^2 \quad (2.34)$$

když jsme proudovou hustotu ve vodiči určili z empirického vztahu:

$$\sigma_{Cu1} = \sqrt{\frac{K}{b_v}} = \sqrt{\frac{190}{11}} = 4,156 \text{ A/mm}^2 \quad (2.35)$$

b_v - šířka holého vodiče v drážce

kde K je konstanta závislá na napětí:

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

Tabulka 2.3 Závislost K na napětí

Výška vodiče h_v při jeho šířce 11 mm, jak vychází z bilance drážky na šířku:

$$h_v = \frac{S_{Cu1}}{b_v} = \frac{46,3}{11} = 4,2 \rightarrow 2,2,1 \rightarrow 2,2 \text{ mm} \quad (2.36)$$

Původní vodič je rozdělen na šířku na dva ($j=2$) a na výšku na dva vodiče ($i=2$) o rozměrech 5,5 x 2,2 mm

Skutečný průřez jednoho vodiče:

$$S_1 = 11,5 \text{ mm}^2$$

Výsledný průřez vodičů tvořícího jeden závit:

$$S_{Cu1} = j \cdot i \cdot S_1 = 2 \cdot 2 \cdot 11,5 = 46 \text{ mm}^2 \quad (2.37)$$

a skutečná proudová hustota:

$$\sigma_{Cu1} = \frac{I_1}{a_{st} S_{Cu1}} = \frac{192,45}{1,46,3} = 4,183 \text{ A/mm}^2 \quad (2.38)$$

2.3.4 Odpor a rozptylová reaktance statorového vinutí

Úhel sklonu čel válcového vinutí:

$$\sin \alpha_{\zeta} = \frac{b_{\zeta} + c}{t_{d1}} = \frac{19 + 7,15}{39,26} = 0,6659 \quad (2.39)$$

$$\alpha_{\zeta} = \arcsin 0,6659 = 41,75^\circ$$

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

$$c = 4 + \frac{U[kV]}{2} = 4 + \frac{6,3}{2} = 7,15 \text{ mm} \quad (2.40)$$

$$x = \frac{\beta \cdot t_p}{2 \cdot \cos \alpha_{\zeta}} = \frac{0,83 \cdot 471}{2 \cdot \cos 41,75^\circ} = 261,99 \text{ mm} \quad (2.41)$$

$$B = \frac{h_2}{2} + r = \frac{93}{2} + 10 = 56,5 \text{ mm} \quad (2.42)$$

$$y = \frac{\beta \cdot t_p}{2} \cdot \operatorname{tg} \alpha_{\zeta} = \frac{0,83 \cdot 471}{2} \cdot \operatorname{tg} 41,75^\circ = 174,45 \text{ mm} \quad (2.43)$$

$$h_{\zeta} = \frac{1}{2} \cdot (h_2 - m) = \frac{1}{2} \cdot (93 - 4) = 44,5 \text{ mm} \quad (2.44)$$

$$R = \frac{h_{\zeta}}{2} + r = \frac{44,5}{2} + 10 = 32,25 \text{ mm} \quad (2.45)$$

Délka oka:

$$o = \frac{\pi \cdot R}{2} = \frac{\pi \cdot 32,25}{2} = 50,65 \text{ mm} \quad (2.46)$$

Vyložení čel:

$$E = v + y + b = 50 + 174,45 + 56,5 = 280,959 \text{ mm} \quad (2.47)$$

Délka čela:

$$l_{\zeta} = 2 \cdot (v + x + o) = 2 \cdot (50 + 261,99 + 50,65) \quad (2.48)$$

$$l_{\zeta} = 725,31 \text{ mm} = 0,725 \text{ m}$$

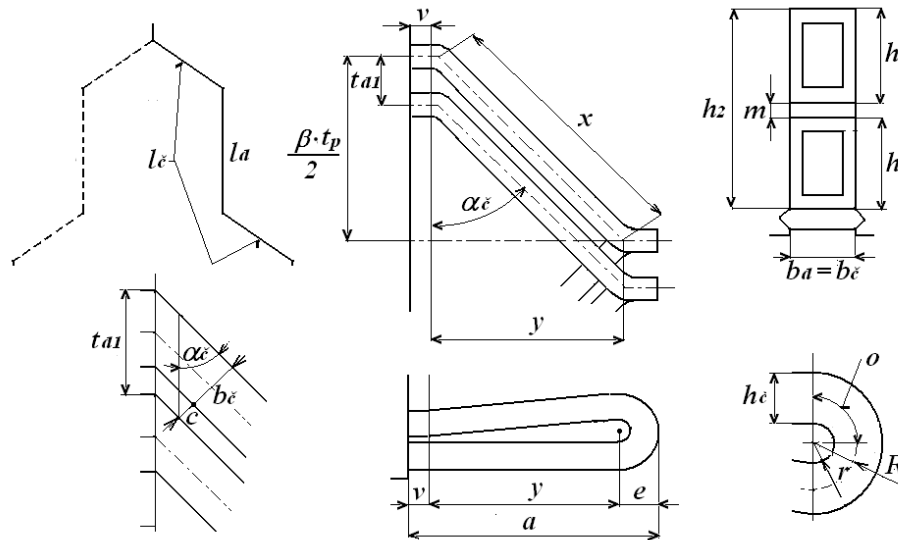
Délka vodiče:

$$l_v = L + l_{\zeta} = 0,450 + 0,725 = 1,1755 \text{ m} \quad (2.49)$$

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

U [kV]	méně než 0,6	3	6	10 ÷ 15
v [mm]	25	35 ÷ 40	40 ÷ 60	60 ÷ 70

Tabulka 2.4 Závislost v na napětí



Obrázek 2.2 Rozměry čel vinutí

Odpor jedné fáze:

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

$$R'_{1/20} = \rho_{Cu} \cdot \frac{2 \cdot l_v \cdot N_s}{a_{st} \cdot S_{Cu1}} = \frac{1}{56} \cdot \frac{2 \cdot 1,175 \cdot 192}{1 \cdot 46} = 0,175 \Omega \quad (2.50)$$

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

Vliv skinefektu:

Náhradní výška vodiče:

$$\xi = 2\pi h_v \sqrt{\frac{j b_v f}{b_d \rho}} 10^{-7} = 2\pi 2,2 \sqrt{\frac{2,5 \cdot 5,50}{19 \cdot \frac{1}{56}}} 10^{-7} = 0,175 \quad (2.51)$$

Činitel zvýšení elektrického odporu:

$$k_{Cu} = \frac{g^2 - 0,2}{9} \xi^4 = \frac{24^2 - 0,2}{9} 0,175^4 = 0,0613 \quad (2.52)$$

Kde g je celkový počet vodičů v drážce nad sebou:

$$g = i \cdot n_d = 2 \cdot 12 = 24 \quad (2.53)$$

Odpor při střídavém proudu při 20°C:

$$R_{1/20} = (1 + k_{Cu}) R'_{1/20} = (1 + 0,0613) 0,175 = 0,185 \Omega \quad (2.54)$$

Odpor při 75 °C:

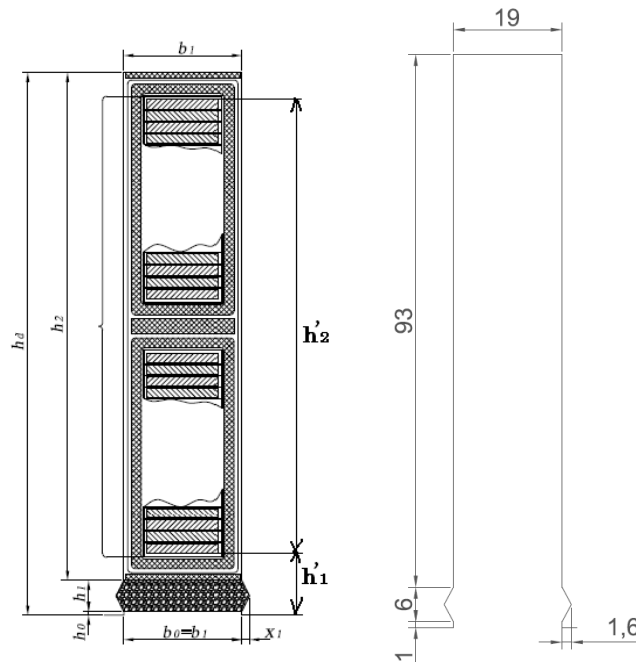
$$R_{1/75} = 1,22 \cdot R_{\frac{1}{20}} = 1,22 \cdot 0,185 = 0,226 \Omega \quad (2.55)$$

Procentní hodnota úbytku napětí na ohmickém odporu:

$$u_R = \frac{R_{1/75} \cdot I_1}{U_f} \cdot 100 = \frac{0,226 \cdot 192,45}{3637,3} \cdot 100 = 1,2 \% \quad (2.56)$$

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

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



Obrázek 2.3 Drážka tvaru M

$$h'_2 = 85,65 \text{ mm}$$

$$h'_1 = 13,5 \text{ mm}$$

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

$$X_\sigma = \frac{(4 \cdot \pi)^2 \cdot 50 \cdot 192^2}{4 \cdot 4} \cdot 0,380 \cdot \left[\left(\frac{85,65}{3 \cdot 19} + \frac{13,5}{19} \right) + \frac{0,725}{0,380} \cdot 4 \cdot \left(0,187 + 0,166 \cdot \frac{0,471}{0,725} \cdot 0,83 \right) + \ln \left(1 + \frac{\pi \cdot 20,26}{2 \cdot 19} \right) \right] \cdot 10^{-7}$$

$$X_\sigma = 2,56 \Omega \quad (2.57)$$

Procentní hodnota úbytku napětí na rozptylové reaktanci:

$$u_{\sigma} = \frac{X_{\sigma} \cdot I_1}{U_f} \cdot 100 = \frac{2,563 \cdot 192,4}{3637,3} \cdot 100 = 13,56 \% \quad (2.58)$$

Procentní hodnota rozptylové reaktance:

$$X_{\sigma} = u_{\sigma} = 13,56 \%$$

2.4 Návrh magnetického obvodu

2.4.1 Určení magnetického toku

Magnetický tok:

$$\Phi = \frac{U_f}{4,44 \cdot f \cdot N_s \cdot k_{\nu 1}} = \frac{3637,3}{4,44 \cdot 50 \cdot 192 \cdot 0,923} = 0,09244 \text{ Vs} \quad (2.59)$$

Kontrola:

$$\Phi = \frac{2}{\pi} \cdot t_p \cdot l_e \cdot B_{\delta} = \frac{2}{\pi} \cdot 0,471 \cdot 0,380 \cdot 0,81 = 0,09234 \text{ Vs} \quad (2.60)$$

Hodnoty velmi dobře souhlasí, počítám nadále s hodnotou:

$$\Phi = 0,09244 \text{ Vs}$$

2.4.2 Velikost vzduchové mezery

$$\delta = k \cdot \frac{A \cdot t_p}{B_{\delta}} \cdot \frac{10^{-6}}{X_d - X_{\sigma}} = 47 \cdot \frac{58808,39 \cdot 0,471}{0,81} \cdot \frac{10^{-6}}{137 - 13,56} = 0,013 \text{ m} \quad (2.61)$$

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

x_d -procentní hodnota nesyčené synchronní reaktance, dle níže uvedené tabulky volím:

$$x_d = 137\%$$

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

Tabulka 2.5 Závislost reaktance na počtu pólů

Volím: $\delta = 13 \text{ mm}$

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

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

2.4.3 Magnetické napětí reakce kotvy

Amplituda základní harmonické reakce kotvy:

$$F'_a = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{1}{C_1} \cdot A \cdot t_p \cdot k_{v1} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{1}{1,29} \cdot 58803,39 \cdot 0,471 \cdot 0,923 = 8918,9 \text{ A} \quad (2.62)$$

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

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

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

$$a = 1,45$$

$$b = 0,89$$

$$C_1 = a \cdot b = 1,45 \cdot 0,89 = 1,29 \quad (2.63)$$

$$F_{d1} = C_{d1} \cdot F'_a = 0,648 \cdot 8918,9 = 5779,5 \text{ A} \quad (2.64)$$

$$F_{q1} = C_{q1} \cdot F'_a = 0,4205 \cdot 8918,9 = 3750,4 \text{ A} \quad (2.65)$$

kde:

$$C_{d1} = e \cdot f = 0,81 \cdot 0,8 = 0,648 \quad (2.66)$$

$$C_{q1} = g \cdot h = 1,45 \cdot 0,29 = 0,42 \quad (2.67)$$

$$\text{pro: } \frac{\delta_{max}}{\delta} = 1,5 \quad \frac{\delta}{t_p} = \frac{0,013}{0,471} = 0,0276 \quad \alpha = 0,65$$

2.4.4 Dimenzování magnetického obvodu

výška pólu:

$$h_p = 0,3 \cdot t_p = 0,3 \cdot 0,471 = 0,1413 \text{ m} \quad (2.68)$$

výška nástavce:

$$h_n = 0,1 \cdot t_p = 0,1 \cdot 0,471 = 0,0471 \text{ m} \quad (2.69)$$

šířka pólu:

$$b_p = \frac{(1+\nu) \cdot \Phi}{B_p \cdot L_p} = \frac{(1+0,15) \cdot 0,09244}{1,5 \cdot 0,45} = 0,157 \text{ m} \quad (2.70)$$

šířka pólového nástavce:

$$b_n = \alpha \cdot t_p = 0,65 \cdot 0,471 = 0,306 \text{ m} \quad (2.71)$$

kde ν je předpokládaná poměrná hodnota mezipólového rozptylového toku ($\nu = 0,1 \div 0,2$)

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

výška jha rotoru:

$$h_{jr} = \frac{(1+\nu) \cdot \Phi}{2 \cdot B_{jr} \cdot L_r} = \frac{(1+0,15) \cdot 0,09244}{2 \cdot 1,1 \cdot 0,55} = 0,0878 \text{ m} \quad (2.72)$$

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

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

výška jádra induktu:

$$h_{js} = \frac{\Phi}{2 \cdot B_{js} \cdot k_{Fe} \cdot l_e} = \frac{0,09244}{2 \cdot 1,3 \cdot 0,92 \cdot 0,38} = 0,1016 \text{ m} \quad (2.73)$$

Délky středních siločar částí magnetického obvodu:

pól:

$$l_p = h_p + h_n = 0,1413 + 0,0471 = 0,1884 \text{ m} \quad (2.74)$$

jho rotoru:

$$l_r = \frac{\pi \cdot [D_1 - 2 \cdot (\delta + h_p + h_n)]}{4 \cdot p} = \frac{\pi \cdot [1,2 - 2 \cdot (0,013 + 0,1413 + 0,0471)]}{4 \cdot 4} = 0,1565 \text{ m} \quad (2.75)$$

jádro induktu:

$$l_s = \frac{\pi \cdot [D_1 + 2 \cdot (h_d + h_{js})]}{4 \cdot p} = \frac{\pi \cdot [1,2 + 2 \cdot (0,1 + 0,1016)]}{4 \cdot 4} = 0,314 \text{ m} \quad (2.76)$$

2.4.5 Charakteristika naprázdno

Carterův činitel respektující vliv drážkování induktu

$$\frac{b_0}{z_1} = \frac{19}{20,26} = 0,937 \quad b_0 = b_d \quad \text{platí pro otevřenou drážku}$$

$$\frac{b_0}{\delta} = \frac{19}{13} = 1,46$$

Z nomogramu - $k_{cd} = 1,12$ (Příloha č. 7)

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

$$k_{ck} = \frac{1}{1 + \frac{\delta \cdot \check{s}_k \cdot i}{2 + \delta \cdot l_e}} = \frac{1}{1 + \frac{13 \cdot 10 \cdot 8}{2 + 13 \cdot 380}} = 0,845 \quad m \quad (2.77)$$

Kde \check{s}_k je šířka radiálního kanálu

i počet paketů

Výsledná hodnota Carterova činitele:

$$k_c = k_{cd} \cdot k_{ck} = 1,12 \cdot 0,8457 = 0,9471 \quad (2.78)$$

Magnetické napětí na vzduchové mezeře:

$$F_\delta = 0,8 \cdot k_c \cdot \delta \cdot B_\delta \cdot 10^6 = 0,8 \cdot 0,947 \cdot 0,013 \cdot 0,81 \cdot 10^6 = 7979 \text{ A} \quad (2.79)$$

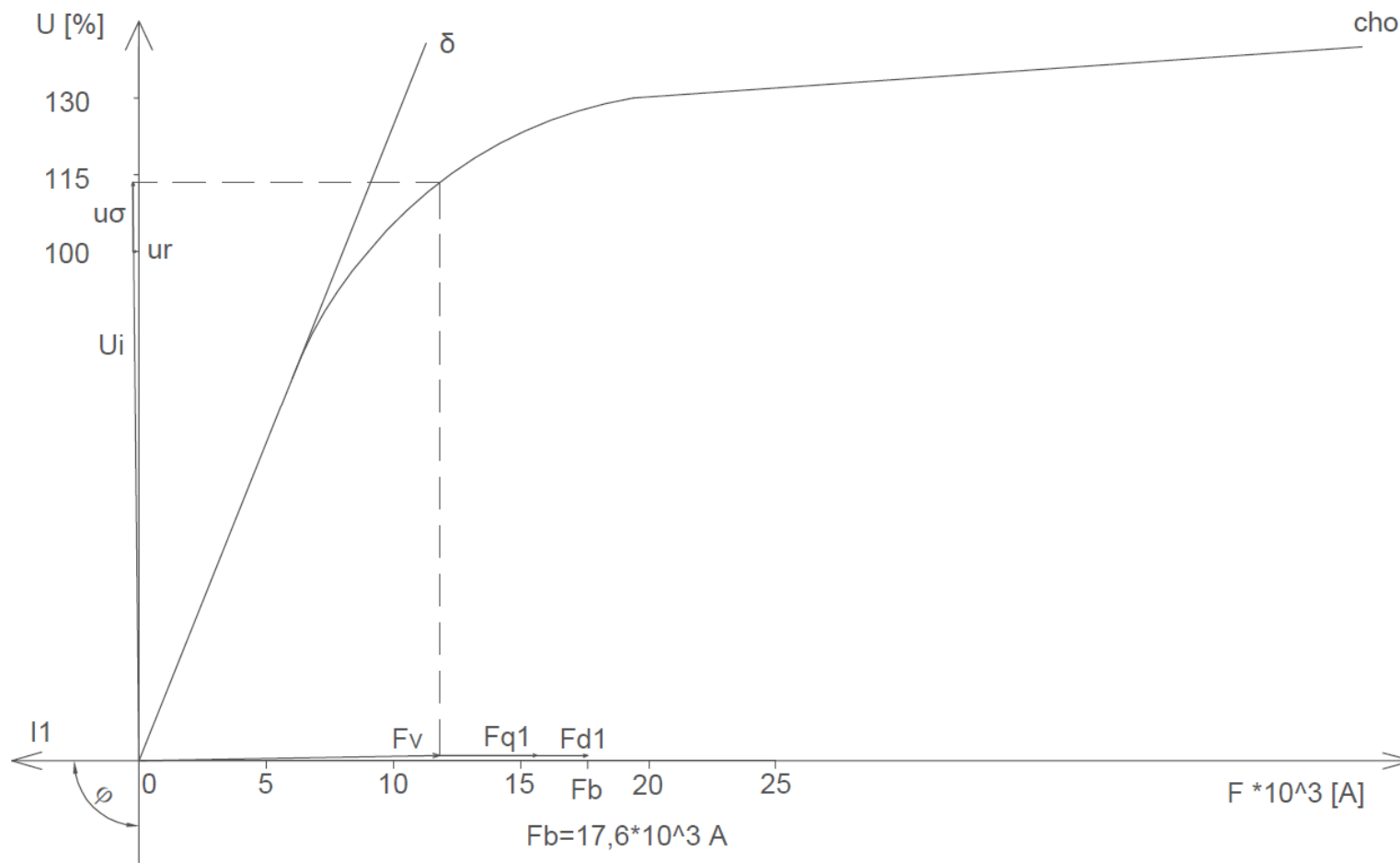
Výpočet charakteristiky naprázdno je proveden v tabulkách uvedených níže.

D_1	$D_1= 1200$	$t_{d1}= 39,3$	$z_1= 20,27$	$k_{z1}= 1,11$	$B'_{z1}= 1,706$	$B_{z1}= 1,68$	$H_{z1}= 6000$	$H_{zstr}= 3266,67$	$F_z= 326,67$				
$D_2=D_1\pm h_d$	$D_2= 1300$	$t_{d2}= 42,5$	$z_2= 23,5$	$k_{z2}= 0,97$	$B'_{z2}= 1,592$	$B_{z2}= 1,58$	$H_{z2}= 3000$						
$D_3=D_1\pm 2h_d$	$D_3= 1400$	$t_{d3}= 45,8$	$z_3= 26,8$	$k_{z3}= 0,86$	$B'_{z3}= 1,505$	$B_{z3}= 1,50$	$H_{z3}= 1600$						
k_1	$i=1, 2, 3$ + stator - rotor	$t_{di}=\pi D_i/Q$ $k_{zi}=t_{di}/(z_i \cdot k_{Fe})-1$ $H_{str}=(H_{z1}+4H_{z2}+H_{z3})/6$	$z_i=td_i-b_d$ $B'_{zi}=B_{\delta} \cdot t_{di}/(z_i \cdot k_{Fe})$ $F_z=H_{str} \cdot h_d$	$k_1 \cdot \varphi$	$B'_{z1}= 1,962$	$B_{z1}= 1,92$	$H_{z1}= 19000$	$H_{zstr}= 12250$	$F_z= 1225$				
1,15					$B'_{z2}= 1,831$	$B_{z2}= 1,81$	$H_{z2}= 12000$						
					$B'_{z3}= 1,731$	$B_{z3}= 1,71$	$H_{z3}= 6500$						
k_2								$k_2 \cdot \varphi$	$B'_{z1}= 2,218$	$B_{z1}= 2,08$	$H_{z1}= 42000$	$H_{zstr}= 30166,7$	$F_z= 3016,67$
1,3					$B'_{z2}= 2,07$	$B_{z2}= 2,01$	$H_{z2}= 30000$						
					$B'_{z3}= 1,957$	$B_{z3}= 1,92$	$H_{z3}= 19000$						

Tabulka 2.6 Magnetizační charakteristika zubové vrstvy

			ϕ			$k_1 \cdot \phi$			$k_2 \cdot \phi$			
			B	H	F	B	H	F	B	H	F	
Vzduch. Mezera		δ [m]=	0,013	0,81		7979			9175,9			10372,8
Zuby	Hlava	$k_{z1} = 1,11$	$B_{z'1}$	1,706	6000		1,962	19000		2,218	42000	
			B_{z1}	1,68			1,92			2,08		
	Střed	$k_{z2} = 0,97$	$B_{z'2}$	1,592	3000		1,831	12000		2,07	30000	
			B_{z2}	1,58			1,81			2,01		
	Pata	$k_{z3} = 0,86$	$B_{z'3}$	1,505	1600		1,731	6500		1,957	19000	
			B_{z3}	1,5			1,71			1,92		
Střed. hodnota		$h_z =$	100		3266,67	326,67		12250	1215		30166,6	3016,67
Jádro induktu		$l_s =$	0,315	1,3	630	198,45	1,495	1600	504	1,69	6000	1890
Pól		$l_p =$	0,188	1,5	2210	415,48	1,725	6522	1226,14	1,95	20400	3835,2
Jho		$l_r =$	0,157	1,1	600	94,2	1,265	950	149,15	1,43	1800	282,6
$\Sigma F = F_\delta + F_z + F_{ji} + F_p + F_j$			9013,84			12280,18			19397,22			

Tabulka 2.7 Magnetizační charakteristika celého magnetického obvodu



Obrázek 2.4 Charakteristika naprázdno

Grafickým postupem jsem zjistil velikost budícího magnetického napětí pro jmenovité zatížení a účinník:

$$F_b = 17600 \text{ A}$$

2.4.6 Návrh budícího vinutí

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

Přesahující část pólového nástavce:

$$a = \frac{b_n - b_p}{2} = \frac{0,30615 - 0,1574}{2} = 0,0743 \text{ m} \quad (2.80)$$

Při tloušťce kostříčky budící cívky $t_k = 7 \text{ mm}$ zbývá pro šířku cívky $67,37 \text{ mm}$, nemá-li cívka přesahovat přes pólový nástavec.

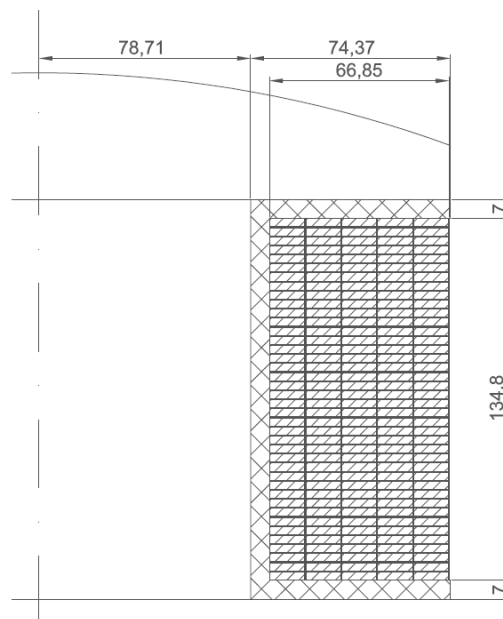
Střední délka závitu cívky:

$$l_{bs} = 2 \cdot (L_p + b_p + 2 \cdot a) = 2 \cdot (0,450 + 0,1574 + 2 \cdot 0,0743) \quad (2.81)$$

$$l_{bs} = 1,512 \text{ m}$$

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

$$U_b = 110 \text{ V}$$



Obrázek 2.5 Pólová cívka

Průřez vodiče budící cívky:

$$S'_{Cub} = \frac{\rho_{Cu} \cdot l_{bs} \cdot 2p \cdot F_b}{0,9 \cdot U_b} = \frac{\frac{1}{56} \cdot 1,512 \cdot 8 \cdot 17600}{0,9 \cdot 110} = 38,418 \text{ mm}^2 \quad (2.82)$$

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

Podle ČSN volím vodič o rozměrech 13 x 3 / 13,37 x 3,37

se skutečným průřezem: $S_{Cub} = 38,4 \text{ mm}^2$

Budící proud:

$$I_b = \sigma_{Cub} \cdot S_{Cub} = 2,3 \cdot 38,4 = 88,32 \text{ A} \quad (2.83)$$

Počet závitů budící cívky:

$$N_b = \frac{F_b}{I_b} = \frac{17600}{88,32} = 199,27 \rightarrow 199 \quad (2.84)$$

Volím tloušťku kostřičky cívky: $t_k = 7 \text{ mm}$

Počet poloh cívky:

$$n'_p = \frac{a - t_k}{h_{vi}} = \frac{74,37 - 7}{13,37} = 5,03 \quad (2.85)$$

$$n_p = 5$$

Tloušťka cívky:

$$b_c = h_{vi} \cdot n_p = 13,37 \cdot 5 = 66,85 \text{ mm} \quad (2.86)$$

Počet závitů v jedné poloze:

$$N'_{p1} = \frac{N_b}{n_p} = \frac{199}{5} = 39,8 \quad (2.87)$$

$$N_{p1} = 40$$

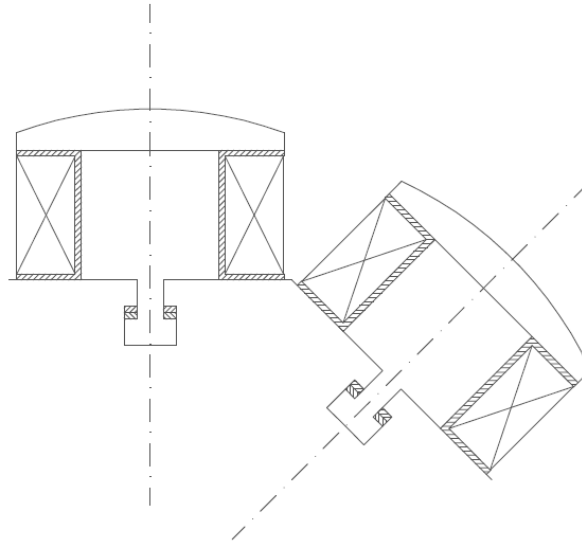
Výška budící cívky:

$$h_c = N_{p1} \cdot b_{vi} = 40 \cdot 3,37 = 134,8 \text{ mm} \quad (2.88)$$

Výška pólu:

$$h_p = h_c + 2 \cdot t_k = 134,8 + 2 \cdot 7 = 148,8 \text{ mm} \quad (2.89)$$

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



Obrázek 2.6 Mezipólový prostor s budícími cívkami

2.5 Kroužky a kartáče

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

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

Celkový průřez kartáčů jedné polaroty:

$$S_k = \frac{I_b}{\sigma_k} = \frac{88,32}{10} = 8,83 \text{ cm}^2 \quad (2.90)$$

Podle doporučených rozměrů kartáčů volím rozměr $b_k \times l_k = 40 \times 25$ a tomu odpovídá průřez: $S_{k1} = 10 \text{ cm}^2$

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

l_k rozměr v obvodovém směru

Počet kartáčů jedné polaritě na obvodu kroužku:

$$i_k = \frac{S_k}{S_{k1}} = \frac{8,83}{10} = 0,883 \quad (2.91)$$

Volím počet kartáčů $i_k=1$ a počet kartáčů obou polarit je tedy

$$2 \cdot i_k = 2 \cdot 1 = 2.$$

V tomto případě stačí pouze jeden kartáč jedné polaritě, na obvodu budou celkem 2 kartáče.

2.6 Výpočet celkových ztrát

Jouleovy ztráty:

ve vinutí statoru:

$$\Delta P_{Cu1} = m \cdot R_{\frac{1}{75}} \cdot I_1^2 = 3 \cdot 0,226 \cdot 192,4^2 = 25209,97 \text{ W} \quad (2.92)$$

v budícím vinutí:

$$\Delta P_{Cub} = R_{Cub} \cdot I_b^2 = 1,389 \cdot 88,32^2 = 10840,25 \text{ W} \quad (2.93)$$

Ztráty v železe:

v jádře induktu:

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

hmotnost jádra statoru:

$$m_{Fej} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_{je}^2 - D_3^2) \cdot l_e \cdot k_{Fe} \cdot \rho_{Fe} = \frac{\pi}{4} \cdot (1,603^2 - 1,4^2) \cdot 0,380 \cdot 0,92 \cdot 7800$$

$$m_{Fej} = 1306,35 \text{ kg} \quad (2.94)$$

Kde

$$D_{je} = D_1 + 2 \cdot (h_d + h_{js}) = 1,2 + 2 \cdot (0,1 + 0,1016) = 1,603 \text{ m} \quad (2.95)$$

je vnější průměr statoru

ztráty v jádře induktu (statoru):

$$\Delta P_{Fej} = 1,8 \cdot \Delta P_{Fe} \cdot B_{js}^2 \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} \cdot m_{Fej} = 1,8 \cdot 1,8 \cdot 1,3^2 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1,3} \cdot 1306,35$$

$$\Delta P_{Fej} = 7153,05 \text{ W} \quad (2.96)$$

v zubech statoru:

hmotnost zubů statoru:

$$m_{Fez} = Q \cdot z_2 \cdot h_d \cdot l_e \cdot k_{Fe} \cdot \rho_{Fe} = 96 \cdot 0,0235 \cdot 0,1 \cdot 0,380 \cdot 0,92 \cdot 7800$$

$$m_{Fez} = 615,54 \text{ kg} \quad (2.97)$$

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

h_d hloubka drážky

ztráty v zubech statoru:

$$\Delta P_{Fez} = 2 \cdot \Delta p_{Fe} \cdot B_{z2}^2 \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} \cdot m_{Fez} = 2 \cdot 1,8 \cdot 1,58^2 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1,3} \cdot 615,54$$

$$\Delta P_{Fez} = 5531,88 \text{ W} \quad (2.98)$$

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

Povrchové ztráty:

$$\Delta P_p = \frac{\pi}{2} \cdot D_1 \cdot \alpha \cdot L_p \cdot k_0 \cdot \left(\frac{Q \cdot n}{10000}\right)^{1,5} \cdot (t_{d1} \cdot \beta \cdot 1000 \cdot B_\delta \cdot k_c)^2 \quad (2.99)$$

$$\Delta P_p = \frac{\pi}{2} \cdot 1,2 \cdot 0,65 \cdot 0,450 \cdot 2,8 \cdot \left(\frac{96 \cdot 750}{10000}\right)^{1,5} \cdot (0,0392 \cdot 0,105 \cdot 1000 \cdot 0,81 \cdot 0,947)^2$$

$$\Delta P_p = 298,47 \text{ W}$$

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

Mechanické ztráty:

$$\Delta P_m = v^{2,5} \cdot D_1 \cdot \sqrt{l_e} = 47,124^{2,5} \cdot 1,2 \cdot \sqrt{0,380} = 11279,87 \text{ W} \quad (2.100)$$

kde v je obvodová rychlost rotoru

$$v = \frac{\pi \cdot D_1 \cdot n}{60} = \frac{\pi \cdot 1,2 \cdot 750}{60} = 47,12 \text{ m/s} \quad (2.101)$$

Přídavné ztráty:

$$\Delta P_{přid} = 0,003 \cdot S = 0,003 \cdot 2100 \cdot 10^3 = 6300 \text{ W} \quad (2.102)$$

Celkové ztráty:

$$\Delta P = \Delta P_{Cu1} + \Delta P_{Cub} + \Delta P_{Fej} + \Delta P_{Fez} + \Delta P_P + \Delta P_m + \Delta P_{příd} \quad (2.103)$$

$$\Delta P = (25209,97 + 10840,25 + 7153,05 + 5531,8 + 298,47 + 11279,8 + 6300)$$

$$\Delta P = 66613,49 \text{ W} = 66,613 \text{ kW}$$

2.7 Výpočet tlumícího (rozběhového) vinutí

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

Průřez tyče:

$$S_t = \frac{(0,15 \text{ až } 0,35)t_p A}{N_t J_1} = \frac{0,3 \cdot 0,471 \cdot 58808,39}{9 \cdot 4,67 \cdot 10^6} = 1,97 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \quad (2.104)$$

Průměr tyče tlumícího vinutí:

$$d_t = 1,13 \cdot \sqrt{S_t} = 1,13 \cdot \sqrt{1,97 \cdot 10^{-4}} = 0,0158 \text{ m} \quad (2.105)$$

Drážková rozteč na rotoru:

$$t_{d2} = \frac{b_{pn} - d_t - 2z}{N_t - 1} = \frac{0,306 - 0,0158 - 2 \cdot 0,005}{9 - 1} = 0,035 \text{ m} \quad (2.106)$$

U motorů se pro zmenšení přídavných ztrát a zamezení „lepení“ rotoru při spouštění volí počet tyčí N_t a jejich drážková rozteč t_{d2} tak, aby byly splněny tyto podmínky:

$$t_{d2} \geq 0,8t_{d1}$$

$$(N_t - 1) \left(1 - \frac{t_{d2}}{t_{d1}}\right) > 0,75$$

Obě výše uvedené podmínky jsou splněny.

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

Průměr drážky:

$$d_d = d_t + (0,1 \text{ až } 0,2) = 15,8 + 0,2 = 16 \text{ mm} \quad (2.107)$$

Šířka otevření drážky:

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

Výška krčku:

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

Délka tyče:

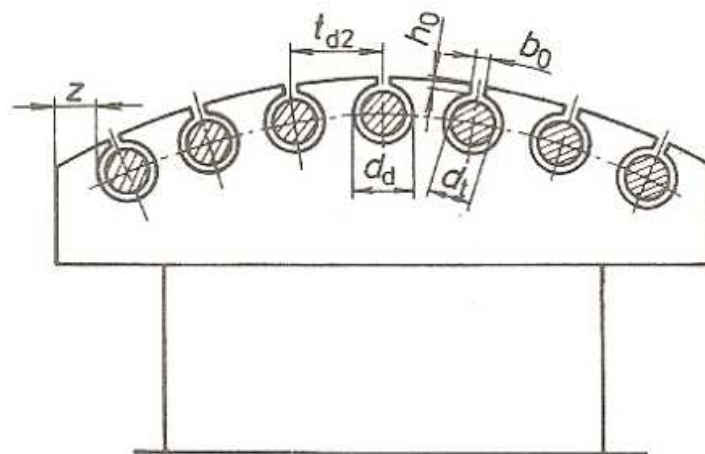
$$l_t = l_{pn} + (0,2 \text{ až } 0,4)t_p = 0,598 + 0,3 \cdot 0,471 = 0,740 \text{ m} \quad (2.108)$$

Průřez segmentu nakrátko:

$$S_{sek} = b_{sek} \cdot h_{sek} = (0,85 \text{ až } 1,15)0,5N_t S_t = 0,9 \cdot 0,5 \cdot 9 \cdot 1,97 \cdot 10^{-4}$$

$$S_{sek} = 797,85 \text{ mm}^2 \quad (2.109)$$

Z vypočteného průřezu volím normalizovaný pás 80x10 mm



Obrázek 2.7 Uložení vinutí na pólu

[2] [3] [4]

3 Návrh přípevnění pólů stroje

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

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

$$F_p = \omega_m^2 \cdot (m_p \cdot r_p + m_n \cdot r_n + m_c \cdot r_c) \quad (3.1)$$

$$F_p = 94,24^2 \cdot (82,251 \cdot 0,465 + 67,36 \cdot 0,549 + 102,88 \cdot 0,479)$$

$$F_p = 1107369,45 \text{ N} \rightarrow 1,107 \text{ MN}$$

Kde r_p , r_c , r_n jsou vzdálenosti od středu rotoru k těžišti jednotlivých částí.

Maximální hodnota úhlové rychlosti:

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

Hmotnost cívky:

$$m_c = \rho_{cu} \cdot l_{zstř} \cdot S_{cub} \cdot N_b = 8900 \cdot 1,512 \cdot 38,4 \cdot 10^{-6} \cdot 199 \quad (3.3)$$

$$m_c = 102,88 \text{ kg}$$

Hmotnost pólu:

$$m_p = \rho_{Fe} \cdot V_p = 7800 \cdot 0,01054 = 82,25 \text{ kg} \quad (3.4)$$

Kde V_p je objem pólu:

$$V_p = b_p \cdot l_p \cdot h_p = 0,157 \cdot 0,450 \cdot 0,148 = 0,0105 \text{ m}^3 \quad (3.5)$$

Hmotnost pólového nástavce:

$$m_n = \rho_{Fe} \cdot V_n = 7800 \cdot 8,63 \cdot 10^{-3} = 67,36 \text{ kg} \quad (3.6)$$

Kde V_n je objem pólového nástavce:

$$V_n = b_n \cdot l_n \cdot h_n = 0,306 \cdot 0,598 \cdot 0,047 = 8,63 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \quad (3.7)$$

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

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

kde L_p je délka pólu.

$$F_1 = \frac{1107369,41}{0,450} = 2,459 \cdot 10^6 \text{ N/m} \quad (3.8)$$

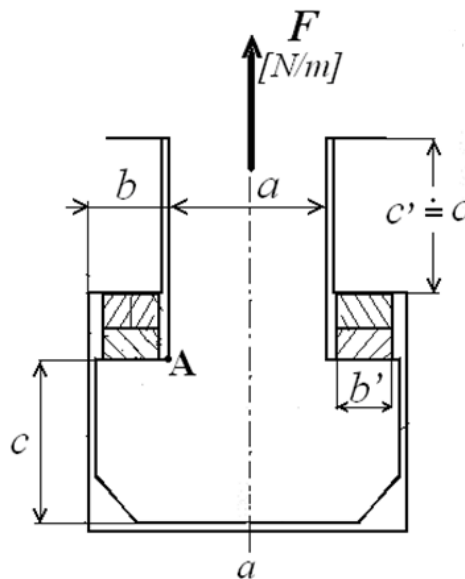
3.1 Připevnění pomocí kladiva

Pokud je namáhání od odstředivých sil příliš veliké, zpravidla $F > (2 \div 2,5) 10^6 \text{ N/m}$

použije se připevnění pólu pomocí kladiv. Při použití kladiva se vychází z určení šířky krčku a , který je namáhán na tah a použije se vztahu:

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

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



Obrázek 3.1 Rozměry kladiva

Kontrola kombinovaného namáhání se provede s použitím vztahu:

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

$$a = 0,03 \text{ m}$$

$$b \sim 0,5 \cdot a = 0,015 \text{ m}$$

$$c \doteq 0,03 \text{ m}$$

$$\sigma_{c \max} = \frac{2,45 \cdot 10^6}{0,03} \left[\frac{3,0,015}{4,0,03} + \sqrt{1 + \left(\frac{3,0,015}{4,0,03} \right)^2} \right]$$

$$\sigma_{c \max} = 118,27 \text{ MPa}$$

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

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

Velikost dovoleného namáhání se volí podle použitého materiálu pólu:

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

$$118,27 \leq 120 \text{ MPa}$$

Pro výše zvolené rozměry kladiva je podmínka namáhání splněna.

[2] [3]

4 Výpočet oteplení statoru a pólové cívky

4.1 Tepelné obvody

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

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

Teplota - je stav daného místa nebo objektu, který zjistíme pomocí čidla, jako je dotykový teploměr, termočlánek...

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

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

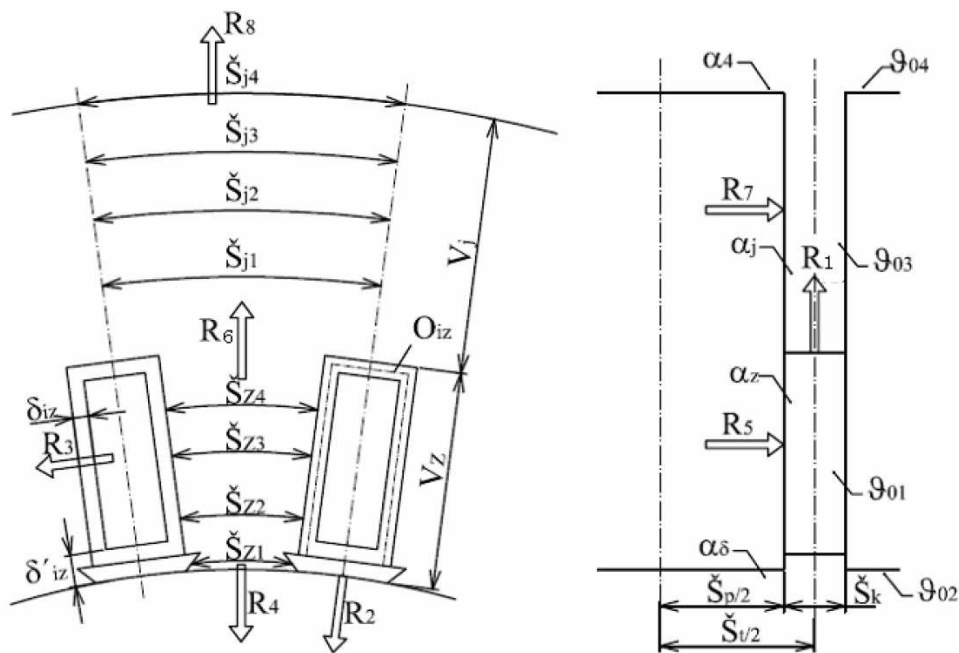
Tabulka 4.1 Maximální teplota a oteplení pro jednotlivé druhy izolací

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

4.2 Výpočet oteplení induktu

4.2.1 Výpočet oteplení v drážkové části vinutí

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



Obrázek 4.1 Vymezený úsek induktu stroje

Ztráty v drážkové části vinutí:

$$\Delta P_{Cud} = \Delta P_{Cu} \frac{l_d}{l_{celk}} = 25209,97 \frac{0,450}{1,175} = 9655,24 \text{ W} \quad (4.1)$$

Ztráty v čelech vinutí:

$$\Delta P_{Cu\check{c}} = \Delta P_{Cu} \frac{l_{\check{c}}}{l_{celk}} = 25209,97 \frac{0,725}{1,175} = 15554,72 \text{ W} \quad (4.2)$$

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

Ztráty ve vymezeném úseku:

Vinutí:

$$\Delta P_{Cud1} = \frac{\Delta P_{Cud} + \Delta P_{př}}{2Q_c(i+1)} = \frac{9655,24 + 6300}{2 \cdot 96(7+1)} = 10,38 \text{ W} \quad (4.3)$$

Zub:

$$\Delta P_{Fez1} = \frac{\Delta P_{Fez}}{2Q_c(i+1)} = \frac{5531,88}{2 \cdot 96(7+1)} = 3,601 \text{ W} \quad (4.4)$$

jádro induktu...

$$\Delta P_{Fej1} = \frac{\Delta P_{Fej}}{2Q_c(i+1)} = \frac{7153,05}{2 \cdot 96(7+1)} = 4,65 \text{ W} \quad (4.5)$$

Kde:

$\Delta P_{př}$ jsou přídavné ztráty v drážkové části vinutí způsobené skin efektem
 Q_c je počet čel, který je zpravidla stejný jako počet drážek induktu
 i je počet radiálních ventilačních kanálů - počet paketů je $(i+1)$

Výpočet tepelných odporů:

z vinutí do ventilačního kanálu:

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

$$R_1 = \frac{0,00366}{0,25 \cdot 0,179 \cdot \frac{0,010}{2}} + \frac{0,0001}{0,026 \cdot 0,179 \cdot \frac{0,010}{2}} + \frac{1}{100 \cdot 0,179 \cdot \frac{0,010}{2}}$$

$$R_1 = 31,81 \text{ m}^2\text{K/W} \quad (4.6)$$

z vinutí do vzduchové mezery:

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

$$R_2 = \frac{0,00366}{0,25 \cdot 0,019 \cdot \frac{0,060}{2}} + \frac{0,0001}{0,026 \cdot 0,019 \cdot \frac{0,060}{2}} + \frac{1}{120 \cdot 0,019 \cdot \frac{0,060}{2}}$$

$$R_2 = 47,1 \text{ m}^2\text{K/W} \quad (4.7)$$

z vinutí do zubu:

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

$$R_3 = \frac{0,00366}{0,25 \cdot 0,179 \cdot \frac{0,050}{2}} + \frac{0,0001}{0,026 \cdot 0,179 \cdot \frac{0,050}{2}} + \frac{\frac{0,0238}{2}}{3 \cdot 40 \cdot 0,179 \cdot \frac{0,050}{2}}$$

$$R_3 = 4,14 \text{ m}^2\text{K/W} \quad (4.8)$$

ze zubu do vzduchové mezery:

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

$$R_4 = \frac{\frac{0,1}{2}}{3 \cdot 40 \cdot 0,022 \cdot \frac{0,050}{2}} + \frac{1}{120 \cdot 0,017 \cdot \frac{0,050}{2}}$$

$$R_4 = 19,98 \text{ m}^2\text{K/W} \quad (4.9)$$

ze zubu do ventilačního kanálu:

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

$$R_5 = \frac{\frac{0,050}{2}}{3 \cdot 1 \cdot 0,023 \cdot 0,1} + \frac{1}{100 \cdot 0,023 \cdot 0,1}$$

$$R_5 = 7,68 \text{ m}^2\text{K/W} \quad (4.10)$$

z plechů zubu do plechů jádra:

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

$$R_6 = \frac{\frac{0,1}{2}}{3 \cdot 40 \cdot 0,025 \cdot \frac{0,050}{2}} + \frac{\frac{0,101}{2}}{3 \cdot 40 \cdot 0,047 \cdot \frac{0,050}{2}}$$

$$R_6 = 1,01 \text{ m}^2\text{K/W} \quad (4.11)$$

z plechů jádra do ventilačního kanálu:

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

$$R_7 = \frac{\frac{0,050}{2}}{3 \cdot 1 \cdot 0,049 \cdot 0,101} + \frac{1}{80 \cdot 0,049 \cdot 0,101}$$

$$R_7 = 4,176 \text{ m}^2\text{K/W} \quad (4.12)$$

z plechů jádra na vnější obvod statoru

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

$$R_8 = \frac{\frac{0,101}{2}}{3 \cdot 40 \cdot 0,0507 \cdot \frac{0,050}{2}} + \frac{1}{60 \cdot 0,052 \cdot \frac{0,050}{2}}$$

$$R_8 = 13,04 \text{ m}^2\text{K/W} \quad (4.13)$$

Kde:

δ_{vzd} je součet vzduchových vrstviček mezi vrstvami izolace a závisí na celkové tloušťce izolace a technologickém postupu; zpravidla se volí $\delta_{vzd} = 0,0001\text{m}$

λ_{iz} měrná tepelná vodivost izolace ($\lambda_{iz} = 0,15 \div 0,3\text{W}/^\circ\text{Cm}$)

λ_{vzd} měrná tepelná vodivost vzduchu
(při teplotě 20°C je $\lambda_{vzd} = 0,026\text{W}/^\circ\text{Cm}$)

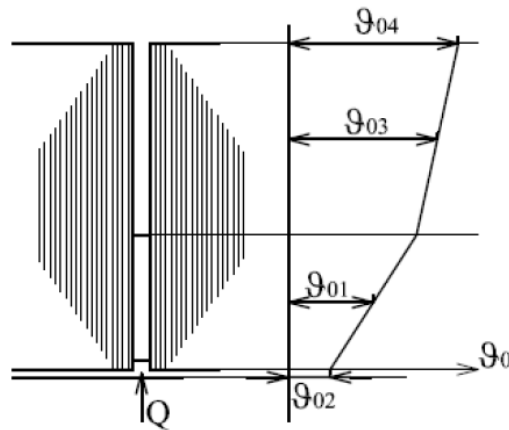
λ_{Fel} měrná tepelná vodivost plechového svazku ve směru plechů
($\lambda_{Fel} = 40\text{W}/^\circ\text{Cm}$)

λ_{Feq} měrná tepelná vodivost plechového svazku ve směru kolmém
($\lambda_{Feq} = 1\text{W}/^\circ\text{Cm}$)

$\alpha_\delta, \alpha_z, \alpha_j, \alpha_4$ součinitelé přestupu tepla v daném místě, závisí na rychlosti proudění vzduchu a pohybují se v rozmezí ($40 \div 150$) $\text{W}/^\circ\text{Cm}^2$

Určení okolních teplot vymezeného úseku:

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



Obrázek 4.2 Průběh teploty chladiva v radiálním kanálu

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

$$Q = \frac{\Sigma \Delta P}{\rho \cdot c_p \cdot \Delta \vartheta} = \frac{\Sigma \Delta P}{c_v \cdot \Delta \vartheta} = \frac{51058,78}{1250 \cdot 20} = 2,04 \text{ m}^3/\text{s} \quad (4.14)$$

Kde:

Q je množství chladiva, které má projít strojem [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]

$\Sigma \Delta P$ součet všech ztrát, které se budou chladícím médiem odvádět [W]

ρ hustota chladicího média [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

c_p hmotnostní měrné teplo chladicího média [$W \cdot s \cdot \text{kg}^{-1} \cdot K^{-1}$]

$\Delta \vartheta$ oteplení chladicího média, které prošlo strojem [K]

oteplení chladiva ve vzduchové mezeře:

$$\vartheta_{02} = \vartheta_0 + \frac{\Delta P_{rot}}{c_v Q} = 0 + \frac{11138,72}{1250 \cdot 2,04} = 4,36 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4.15)$$

oteplení chladiva v okolí zubu kanálu:

$$\vartheta_{01} = \vartheta_{02} + \frac{\Delta P_{Fez} + \Delta P_{Cud}}{2 c_v Q} = 4,36 + \frac{5531,8 + 9655,24}{2 \cdot 1250 \cdot 2,04} = 7,33 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4.16)$$

oteplení chladiva v okolí jádra induktu kanálu:

$$\vartheta_{03} = \vartheta_{02} + \frac{\Delta P_{Fez} + \Delta P_{Cud} + \frac{1}{2} \Delta P_{Fej}}{c_v Q} = 4,36 + \frac{5531,8 + 9655,24 + \frac{1}{2} \cdot 7153}{1250 \cdot 2,04}$$

$$\vartheta_{03} = 11,71 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4.17)$$

oteplení chladiva vystupujícího z kanálu:

$$\vartheta_{04} = \vartheta_{02} + \frac{\Delta P_{Fez} + \Delta P_{Cud} + \Delta P_{Fej}}{c_v Q} = 4,36 + \frac{5531,8 + 9655,24 + 7153}{1250 \cdot 2,04}$$

$$\vartheta_{04} = 13,12 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4.18)$$

Kde:

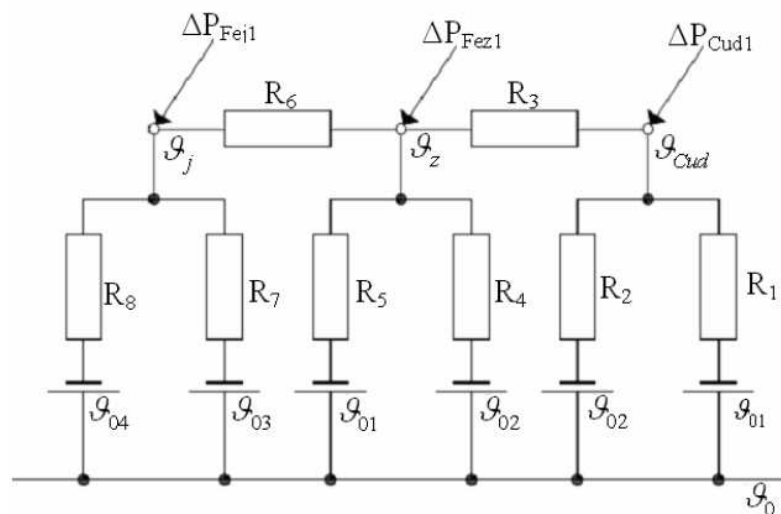
ϑ_0 je teplota chladiva vstupující do stroje

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

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

Sestavení a řešení náhradního tepelného obvodu oblasti:

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



Obrázek 4.3 Náhradní schéma tepelného obvodu vymezeného úseku

$$\frac{\vartheta_{Cud} - \vartheta_{01}}{R_1} + \frac{\vartheta_{Cud} - \vartheta_{02}}{R_2} + \frac{\vartheta_{Cud} - \vartheta_z}{R_3} = \Delta P_{Cud1} \quad (4.19)$$

$$\frac{\vartheta_z - \vartheta_{Cud}}{R_3} + \frac{\vartheta_z - \vartheta_{02}}{R_4} + \frac{\vartheta_z - \vartheta_{01}}{R_5} + \frac{\vartheta_z - \vartheta_j}{R_6} = \Delta P_{Fez1} \quad (4.20)$$

$$\frac{\vartheta_j - \vartheta_z}{R_6} + \frac{j - \vartheta_{03}}{R_7} + \frac{\vartheta_j - \vartheta_{04}}{R_8} = \Delta P_{Fej1} \quad (4.21)$$

Řešením výše uvedené soustavy rovnic jsem určil teploty uzlů: $\vartheta_{cud}, \vartheta_z, \vartheta_j$.

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

Výsledné hodnoty oteplení:

$$\Delta\vartheta_{cud} = 71,78 \text{ °C}$$

$$\Delta\vartheta_z = 43,12 \text{ °C}$$

$$\Delta\vartheta_j = 39,16 \text{ °C}$$

4.2.2 Výpočet oteplení čel vinutí

Při výpočtu vycházím z předpokladu, že všechna čela budou mít stejné chladicí podmínky, takže si zvolím jako element jedno čelo o délce l_ζ a vnějším obvodu O_ζ .

Ztráty vzniklé v jednom čele:

$$\Delta P_{Cu\zeta 1} = \frac{\Delta P_{Cu\zeta}}{Q_\zeta} = \frac{15554,72}{96} = 162,03 \text{ W} \quad (4.22)$$

kde Q_ζ je počet čel a bývá zpravidla stejný jako počet drážek Q .

Tepelný odpor mezi vodičem čel a okolím je:

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

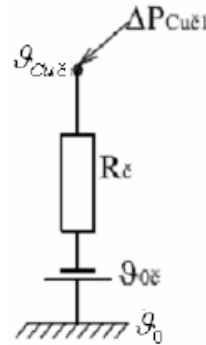
$$R_\zeta = \frac{0,00366}{0,25 \cdot 0,101 \cdot 0,725} + \frac{0,0001}{0,026 \cdot 0,101 \cdot 0,725} + \frac{1}{90 \cdot 0,65 \cdot 0,101 \cdot 0,725}$$

$$R_\zeta = 0,483 \text{ m}^2\text{K/W} \quad (4.23)$$

Kde:

α_ζ je součinitel přestupu tepla v okolí čel

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



Obrázek 4.4 Náhradní tepelné schéma čel vinutí

Oteplení čela:

$$\Delta\vartheta_{\check{c}} = \Delta P_{Cu\check{c}1} \cdot R_{\check{c}} + \vartheta_{o\check{c}} = 162,03 \cdot 0,483 + 0 = 78,26 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4.24)$$

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

$$\Delta\vartheta_{SCu} = \frac{\Delta\vartheta_{Cu\check{c}}l_{\check{c}} + \Delta\vartheta_{Cu\check{d}}l_{\check{d}}}{l_{\check{c}} + l_{\check{d}}} = \frac{78,26 \cdot 0,725 + 71,78 \cdot 0,450}{0,725 + 0,450} = 75,74 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4.25)$$

4.3 Orientační výpočet oteplení pólové cívky

Vnější obvod budící cívky:

$$l_{be} = 2 \cdot [L_p + b_p + 4(b_c + t_k)] \quad (4.26)$$

$$l_{be} = 2 \cdot [0,450 + 0,157 + 4 \cdot (0,0668 + 0,007)] = 1,806 \text{ m}$$

Střední obvod budící cívky:

$$l_{bs} = 2 \left[L_p + b_p + 4 \left(t_k + \frac{b_c}{2} \right) \right] \quad (4.27)$$

$$l_{bs} = 2 \left[0,450 + 0,157 + 4 \left(0,007 + \frac{0,0668}{2} \right) \right] = 1,538 \text{ m}$$

Ochlazovací povrch všech cívek:

$$O_{2pc} = h_c \cdot l_{be} \cdot 2p = 0,134 \cdot 1,806 \cdot 8 = 1,947 \text{ m}^2 \quad (4.28)$$

Odpor všech cívek budícího vinutí:

$$R_{b/75} = 1,22 \cdot \rho \cdot \frac{l_{bs} \cdot N_b \cdot 2p}{S_{Cub}} = 1,22 \cdot \frac{1}{56} \cdot \frac{1,538 \cdot 199 \cdot 8}{38,4} = 1,389 \text{ } \Omega \quad (4.29)$$

Ztráty v budícím vinutí:

$$\Delta P_{Cub} = R_{b/75} \cdot I_b^2 = 1,389 \cdot 88,32^2 = 10840,25 \text{ W} \quad (4.30)$$

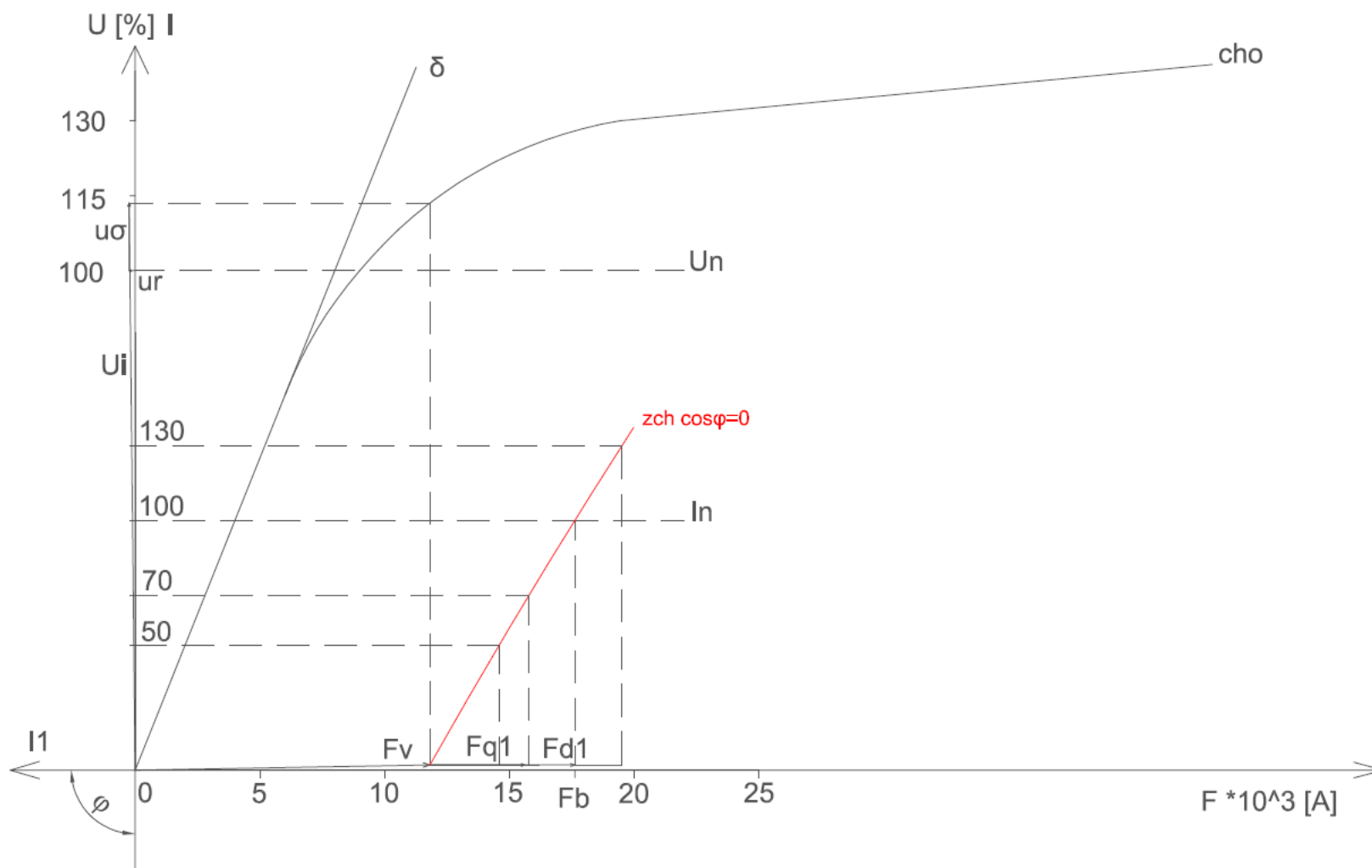
Oteplení cívky:

$$\Delta \vartheta_{Cub} = \frac{1,18 \cdot \Delta P_{Cub}}{\alpha \cdot O_{2pc}} = \frac{1,18 \cdot 10840,25}{90 \cdot 1,947} = 72,97 \text{ }^\circ\text{C} \quad (4.31)$$

[2] [3]

5 Zatěžovací charakteristika stroje

Při sestrování zatěžovací charakteristiky stroje jsem vycházel z charakteristiky naprázdno. Nejprve jsem si vynesl jmenovitou hodnotu proudu $I_n = 100\%$, kterou jsem spojil s hodnotou magnetického napětí F_{d1} , čímž mi vznikl výchozí bod. Tentýž postup jsem opakoval pro 50%, 70% a 130% hodnoty proudu a magnetického napětí, čímž mi vznikly další tři body. Proložení těchto výsledných bodů jsem získal zatěžovací charakteristiku stroje, jenž je v následujícím obrázku vyznačena červenou barvou.



Obrázek 5.1 Zatěžovací charakteristika synchronního kompenzátoru

6 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo navrhnout vzduchem chlazený synchronní kompenzátor s vyniklými póly dle zadaných parametrů. Úkolem elektromagnetického návrhu bylo určení hlavních rozměrů stroje. Dále pak výpočet statorového, budícího a tlumícího (rozběhového) vinutí. Následné dimenzování magnetického obvodu a s tím spojené sestavení charakteristiky naprázdno, výpočet ztrát v jednotlivých částech stroje a následné určení celkových ztrát ve stroji. Elektromagnetický výpočet, který je uveden v této práci je do určité míry zjednodušen. V praxi se v současné době používá programů vytvořených speciálně pro návrh daného typu stroje.

Dalším úkolem bylo pomocí náhradních tepelných obvodů určit hodnoty oteplení statoru a pólové cívky. Tomuto výpočtu nepředcházela ventilační výpočet. Výpočet oteplení statoru je rozdělen na dvě části. V první části je proveden výpočet oteplení drážkové části statorového svazku. Ve druhé části je proveden výpočet oteplení čel vnutí. Jelikož vyšel malý rozdíl oteplení mezi drážkovou částí a čelem řádově několik °C, byla stanovena střední hodnota oteplení $\Delta\vartheta_{SCu} = 75,74$ °C. Tato hodnota vyhovuje izolaci třídy B. Výpočet oteplení pólové cívky byl proveden zjednodušeně. Oteplení pólové cívky $\Delta\vartheta_{Cub} = 72,97$ °C také vyhovuje izolaci třídy B.

Konstrukční uspořádání stroje vychází z klasické koncepce vzduchem chlazených strojů malých a středních výkonů. Vnější konstrukční uspořádání stroje, jako je tvar krytu a další vnější prvky jako jsou ložiskové stojany a základová deska s kostrou, je inspirováno stroji vyráběnými v době nedávno minulé. Jelikož součástí návrhu není ventilační výpočet, jsou vnitřní rozměry stroje, jako například lopatky radiálního ventilátoru a chladicí otvory ve jhu rotoru, odhadnuty. Tato zjednodušení nijak výrazně neovlivňují celkovou podobu stroje. Pro ilustraci konstrukčního uspořádání stroje jsou výkresy uvedené v příloze dostačující.

Seznam použité a citované literatury

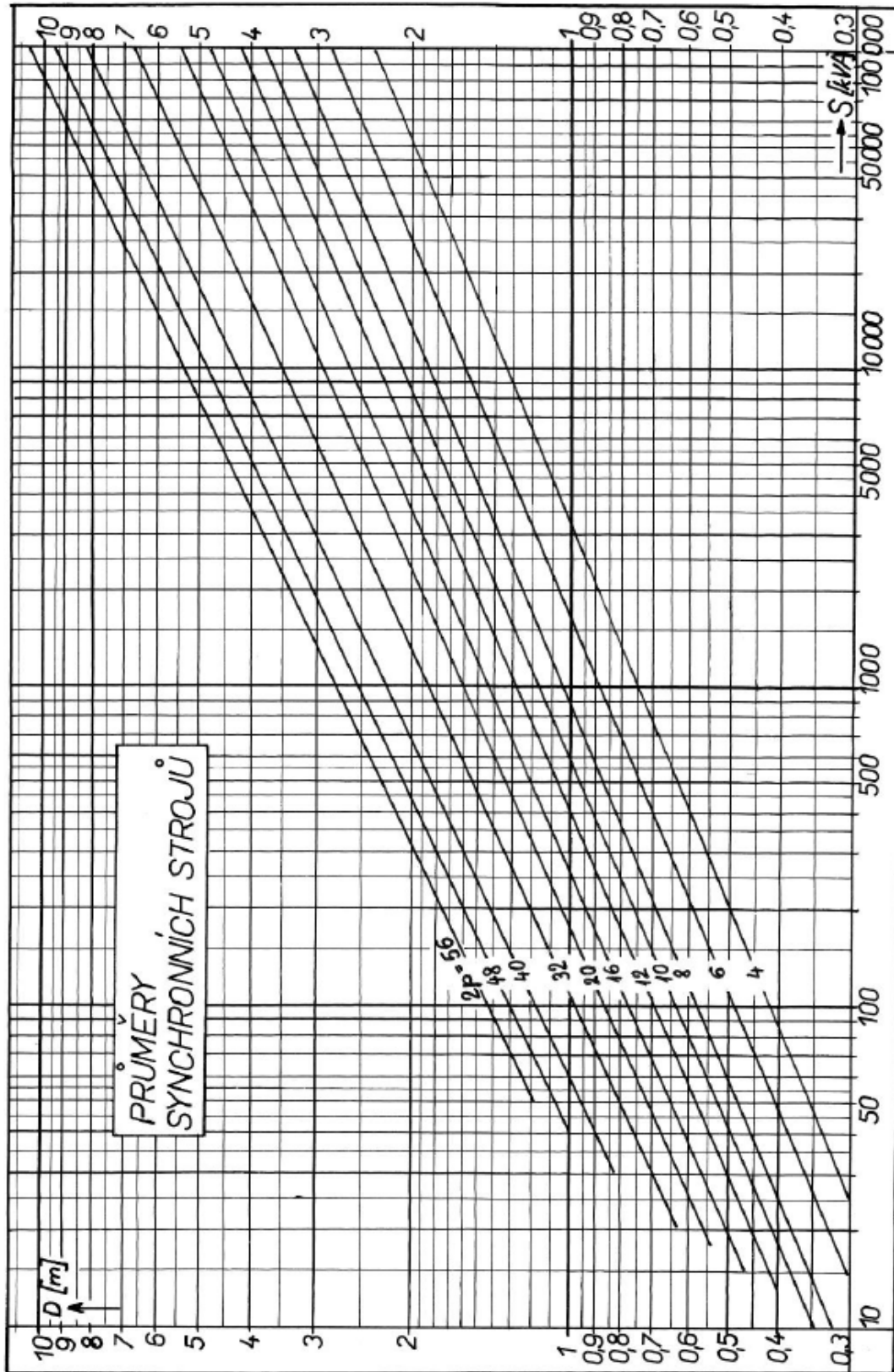
- [1] WIEDEMANN, E. *Konstrukce elektrických strojů*. Praha: SNTL, 1973.
- [2] ČERVENÝ, Josef. *Stavba elektrických strojů*. Portal ZCU v Plzni Courseware, 2012
- [3] ČERVENÝ, Josef. *Postup při návrhu synchronního stroje*. Portal ZCU v Plzni Courseware, 2012
- [4] KOPYLOV, Igor Petrovič. *Stavba elektrických strojů*. Praha: SNTL, 1988.
- [5] CIGÁNEK, Ladislav. *Stavba elektrických strojů*. Praha: SNTL, 1958.
- [6] PETROV, G, N. *Elektrické stroje 2*. Praha: ACADEMIA, 1982.

Seznam příloh

- Příloha 1:** Diagram průměrů synchronních strojů
- Příloha 2:** Diagram obvodové proudové hustoty a indukce ve vzduchové mezeře
- Příloha 3:** Tabulka rozměrů drážky M
- Příloha 4:** Tabulka rozměrů měděných pasů
- Příloha 5:** Diagram činitele základní harmonické a činitele tvaru magnetického toku
- Příloha 6:** Diagram deformačního činitele magnetického napětí
- Příloha 7:** Diagram Carterova činitele na drážkování
- Příloha 8:** Diagram činitele povrchových ztrát v pólovém nástavci
- Příloha 9:** Tabulka rozměrů kartáčů
- Příloha 10:** Diagram dynamových plechů
- Příloha 11:** Nomogram k určení skutečné indukce v zubech induktu
- Příloha 12:** Tabulka rozměrů plochých měděných tyčí se zaoblenými hranami
- Příloha 13:** Příčný řez stroje
- Příloha 14:** Podélný řez stroje

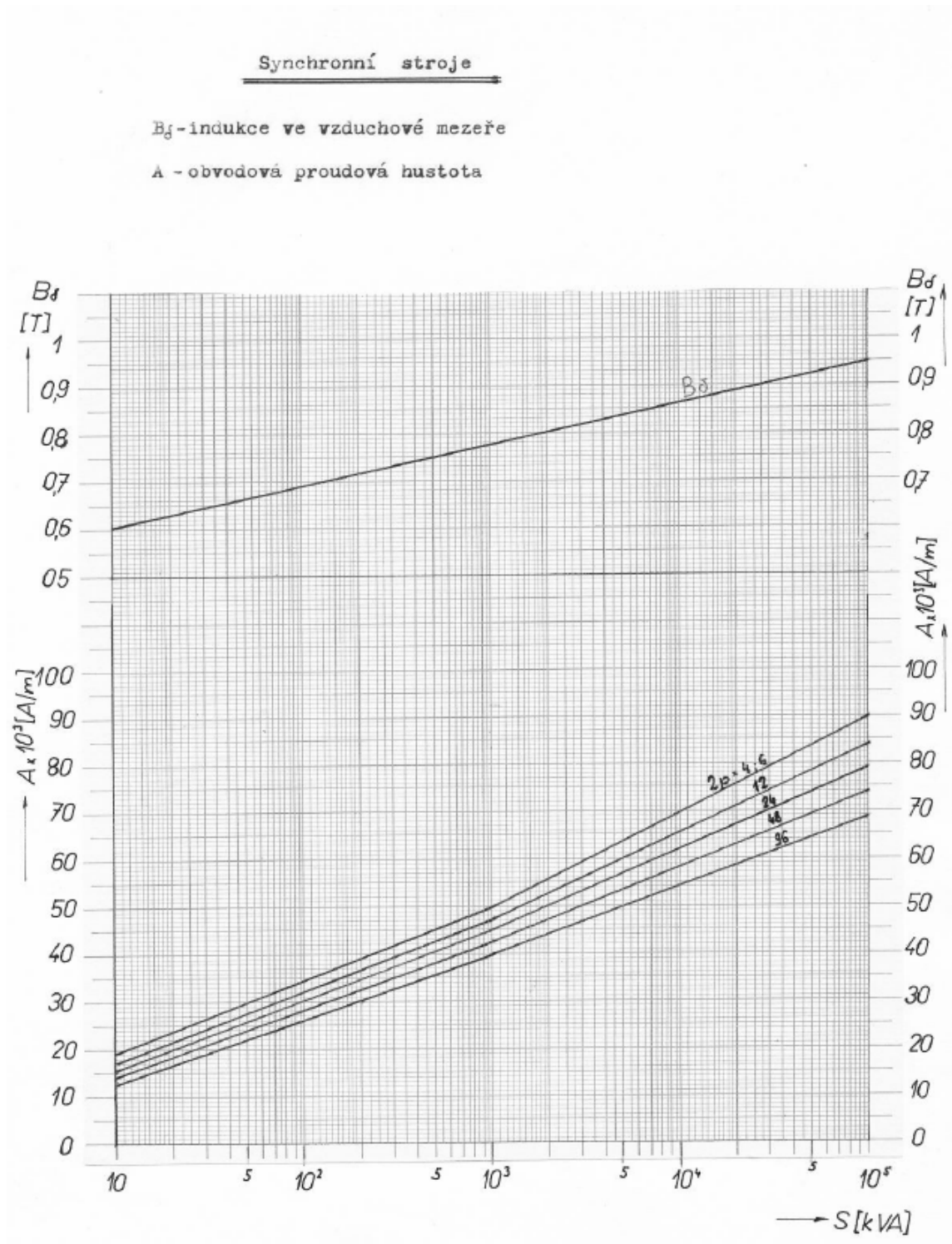
Přílohy

Příloha 1: Diagram průměrů synchronních strojů



[2][3]

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



[2][3]

Příloha 3: Tabulka rozměrů drážky M

Drážka M'					Drážka W						Drážka U
b_1	f_0	f_1	a_1	λ_0	b_1	f_1	f_2	f_3	u	λ_0	b_1
3		3,5	1,2	0,704	4	2,2		0,90	1,30	0,561	1,4
3,2		3,3	1,1	0,658	4,2			1,00	1,40	0,587	1,5
3,5		3,6	1,2	0,664	4,4			0,95	1,55	0,516	1,6
3,8		3,5	1,2	0,621	4,6			1,05	1,45	0,540	1,7
6		3,3	1,1	0,581	4,8			1,15	1,35	0,562	1,8
6,3		4,0	1,4	0,630	5	2,5		1,25	1,25	0,583	1,9
6,6		3,6	1,25	0,580	5,2			1,35	1,15	0,609	2
7		4,0	1,4	0,576	5,5			1,35	1,25	0,553	2,2
7,3		3,6	1,25	0,517	5,8	2,8		1,50	1,10	0,580	2,4
7,6		4,0	1,4	0,536	6			1,50	1,00	0,550	2,6
8	0,7	4,0	1,4	0,522	6,2	3,0	0,5	1,60	0,90	0,567	2,8
8,5		3,6	1,15	0,455	6,5			1,75	0,75	0,590	3
9		4,0	1,4	0,462	6,8			1,90	0,60	0,613	3,2
9,5		3,6	1,15	0,412	7			1,90	0,50	0,585	3,4
10				0,420	7,2	3,2		2,00	0,40	0,599	3,6
10,5				0,402	7,5			1,60	1,40	0,477	3,8
11				0,386	7,8	3,5		1,72	1,28	0,493	4
11,5		4,0	1,4	0,371	8			1,80	1,20	0,503	4,2
12				0,356	8,5			1,80	1,20	0,506	4,4
12,5				0,343	9	4,0		2,00	1,00	0,528	4,6
13				0,331	9,5			2,20	0,80	0,550	4,8
13,5				0,404	10			2,20	0,80	0,505	5
14				0,390	10,5	4,5		2,40	0,60	0,524	5,2
14,5				0,372	11			2,60	0,40	0,541	5,5
15		5,0	1,65	0,366	11,5			1,95	1,05	0,412	5,8
15,5				0,355	12	5,0	0,7	2,10	0,90	0,424	6
16				0,343	12,5			2,25	0,75	0,436	6,2
16,5				0,392	13			2,25	1,25	0,407	6,5
17				0,391	13,5			2,40	1,10	0,418	6,8
17,2		6,0	1,6	0,368	14	5,5		2,55	0,95	0,428	7
18				0,362	14,5			2,55	0,95	0,403	7,2
18,5				0,352	15			2,70	0,80	0,432	7,5
19				0,344	15,5			2,85	0,65	0,472	7,8
19,5				0,461	16			3,00	0,50	0,480	8
20	1,0			0,450	16,5			3,15	0,65	0,489	8,5
20,5				0,441	17			3,30	0,70	0,497	9
21				0,430	17,5			3,45	0,55	0,504	9,5
21,5				0,415	18	6,0		3,60	0,40	0,512	10
22				0,405	18,5			3,75	0,25	0,519	10,5
22,5				0,397	19			3,90	0,10	0,525	11
23		9,0	2,45	0,389	20		1,0	2,80	1,20	0,414	11,5
23,5				0,388	21			3,00	1,00	0,422	12
24				0,382	22			3,20	0,80	0,430	12,5
25				0,367	23			3,40	0,60	0,436	13
26				0,354	24			3,40	0,60	0,395	13,5
27				0,342	25			3,60	0,40	0,402	14
28				0,322	26			3,80	0,20	0,408	14,5
30				0,310	27	7,0		4,00	0,00	0,413	15
32				0,292	28			4,20	0,80	0,419	

[2][3]

Příloha 4: Tabulka rozměrů měděných pasů

M Ě D Ě N Ě P A S Y

Jmenovitá tloušťka [mm]	Rozměry měděných pasů																	
	0,8	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,8	2,0	2,2	2,5	2,8					
0,30	1,8	1,3	1,66															
	2,0	1,46	1,86	2,18	2,38	2,63	2,69	2,89										
	2,2	1,62	2,06	2,42	2,64	2,86	2,99	3,21										
	2,5	1,86	2,36	2,78	3,03	3,28	3,44	3,69	4,19	4,45								
	2,8	2,1	2,66	2,94	3,14	3,42	3,70	3,89	4,17	4,73	5,05							
0,35	3,0	2,26	2,86	3,16	3,38	3,68	3,85	4,19	4,49	5,09	5,45	6,05	6,9					
	3,5	2,66	3,36	3,71	3,98	4,33	4,65	4,94	5,29	5,89	6,45	7,15	8,2	9,25				
	4,0	3,06	3,86	4,26	4,58	4,98	5,38	5,69	6,09	6,89	7,45	8,25	9,45	10,6				
	4,5	3,46	4,36	4,81	5,18	5,63	6,08	6,44	6,89	7,79	8,45	9,35	10,7	12,0				
	5,0	3,86	4,86	5,36	5,78	6,28	6,78	7,19	7,69	8,69	9,45	10,4	12,0	13,5				
	5,5	4,26	5,36	5,91	6,38	6,93	7,48	7,94	8,49	9,59	10,4	11,5	13,2	14,8				
	6,0	4,66	5,86	6,46	6,98	7,58	8,18	8,69	9,29	10,5	11,4	12,6	14,5	16,3				
0,40	(6,5)	5,06	6,36	7,01	7,58	8,23	8,85	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	18,0				
	8	6,26	7,86	8,66	9,38	10,2	11,0	11,7	12,5	14,1	15,4	17,0	19,5	21,8				
	9	7,06	8,86		10,6	11,5	12,4	13,2	14,1	15,9	17,4	19,2	22,0	24,6				
	10	7,86	9,86		11,8	12,8	13,8	14,7	15,7	17,7	19,4	21,4	24,5	27,4				
	11	8,66	10,9		13,0	14,1	15,2	16,2	17,3	19,5	21,4	23,6	27,0	30,2				
	12	9,46	11,9		14,2	15,4	16,6	17,7	18,9	21,3	23,4	25,8	29,5	33,0				
0,50	(13)									23,1	25,4	28,0	32,0	35,8				
	14									20,7	22,1	24,9	27,4	30,2	34,5	38,6		
(15)										26,7	29,4	32,4	37,0	41,4				
16										28,5	31,4	34,6	39,5	44,2				
18										33,4	39,0	44,5	49,8					
20										39,4	43,4	49,5	55,4					
0,65	25												62,0	69,4				
30														74,5	83,4			

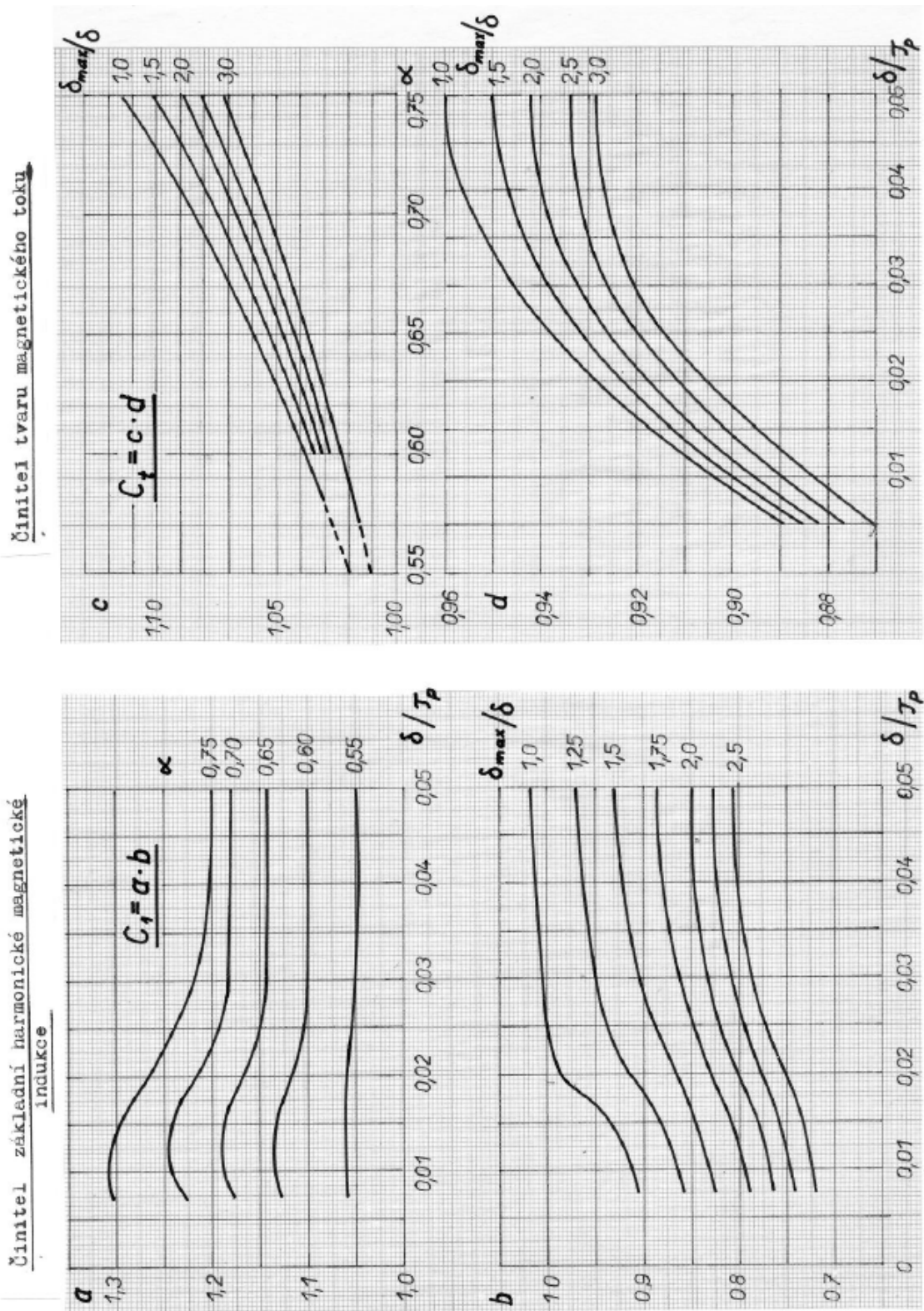
Jmenovitá sířka [mm]	Rozměry měděných pasů											
	3,0	3,5	4	4,5	5	5,5	6	(6,5)	7	8	9	10
11,4												
12,9		13,5										
14,4		16,6	19,1									
15,9		18,4	21,1									
17,4		20,1	23,1									
18,9	19,9	21,0	25,1									
20,4	21,4	23,6	27,1	30,3	33,8							
22,4	24,7	27,1	31,1	34,8	38,8	42,8	46,8					
26,4	27,9	30,6	35,1	39,3	43,8	48,3	52,5					
29,4	31,1	34,1	39,1	43,8	48,8	53,8	58,5					
32,4	34,3	37,6	43,1	48,3	53,8	59,3	64,5					
35,4	37,5	41,1	47,1	52,8	58,8	64,8	70,5		93,8			
38,4	40,7	44,6							101,8			
41,4	43,9	48,1	55,1	61,8	68,8	75,8	82,5		109,8			
44,4	47,1	51,6	59,1	66,3					117,8			147,8
47,4	50,3	55,1	63,1	70,8	78,8	86,8	94,5	102,5	110,5	125,8		157,8
53,4	56,7	62,1	71,1	79,8	88,8	97,8	106,5	115,5	124,5	141,8	159,8	177,8
59,4	63,1	69,1	79,1	88,8	98,8	108,8	118,8	128,8	138,8	157,8	173,8	197,8
74,4	79,1	86,6	99,1	111,3	123,8	136,3	148,3	161,0	173,5	197,8	222,8	247,8
89,4	95,1	104,1	119,1	138,8	148,8	163,8	178,5	193,5	208,5	237,8	267,8	297,8

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

[2][3]

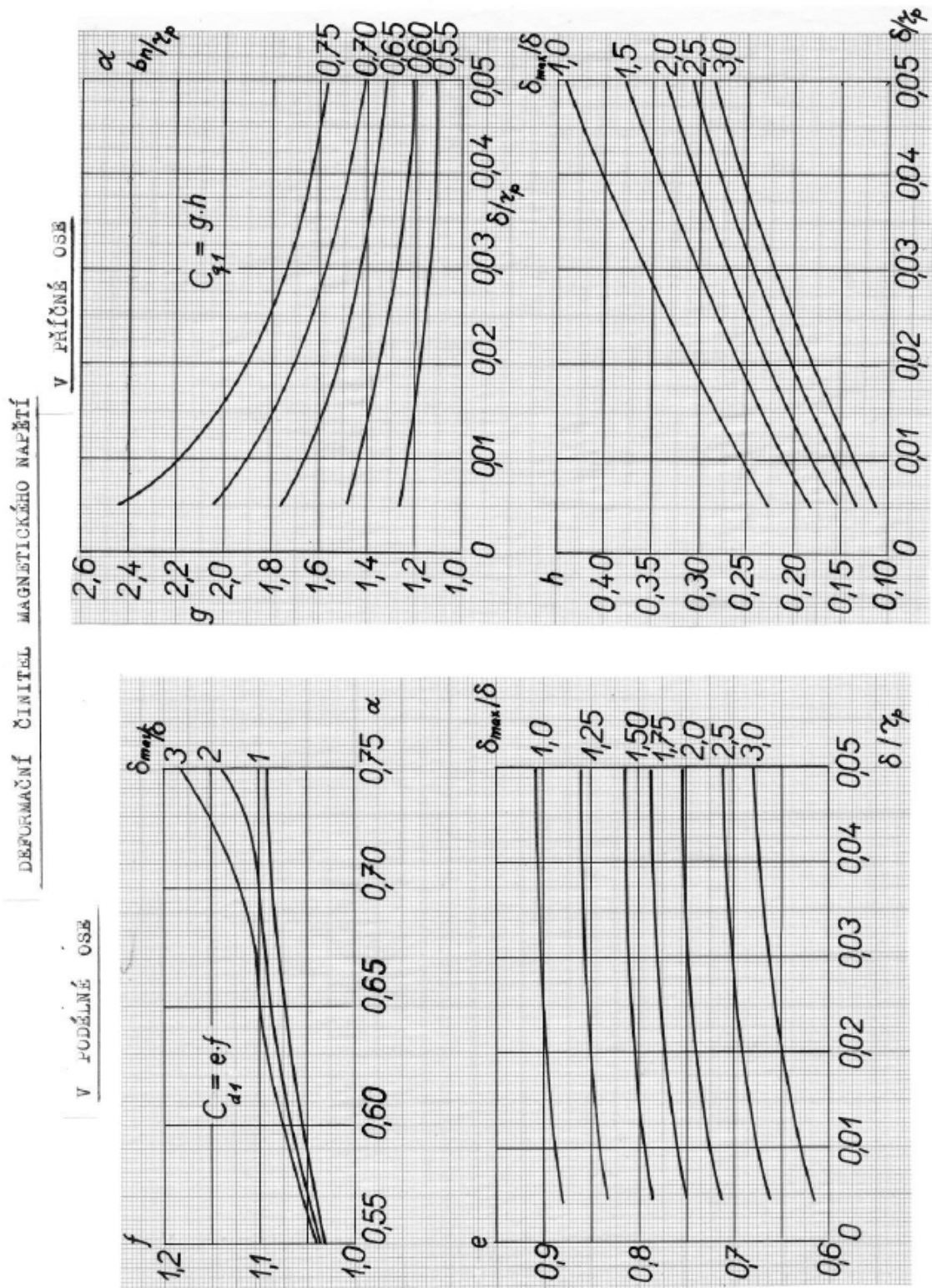
Rozměry v závorkách nepatří pro nové konstrukce.

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



[2][3]

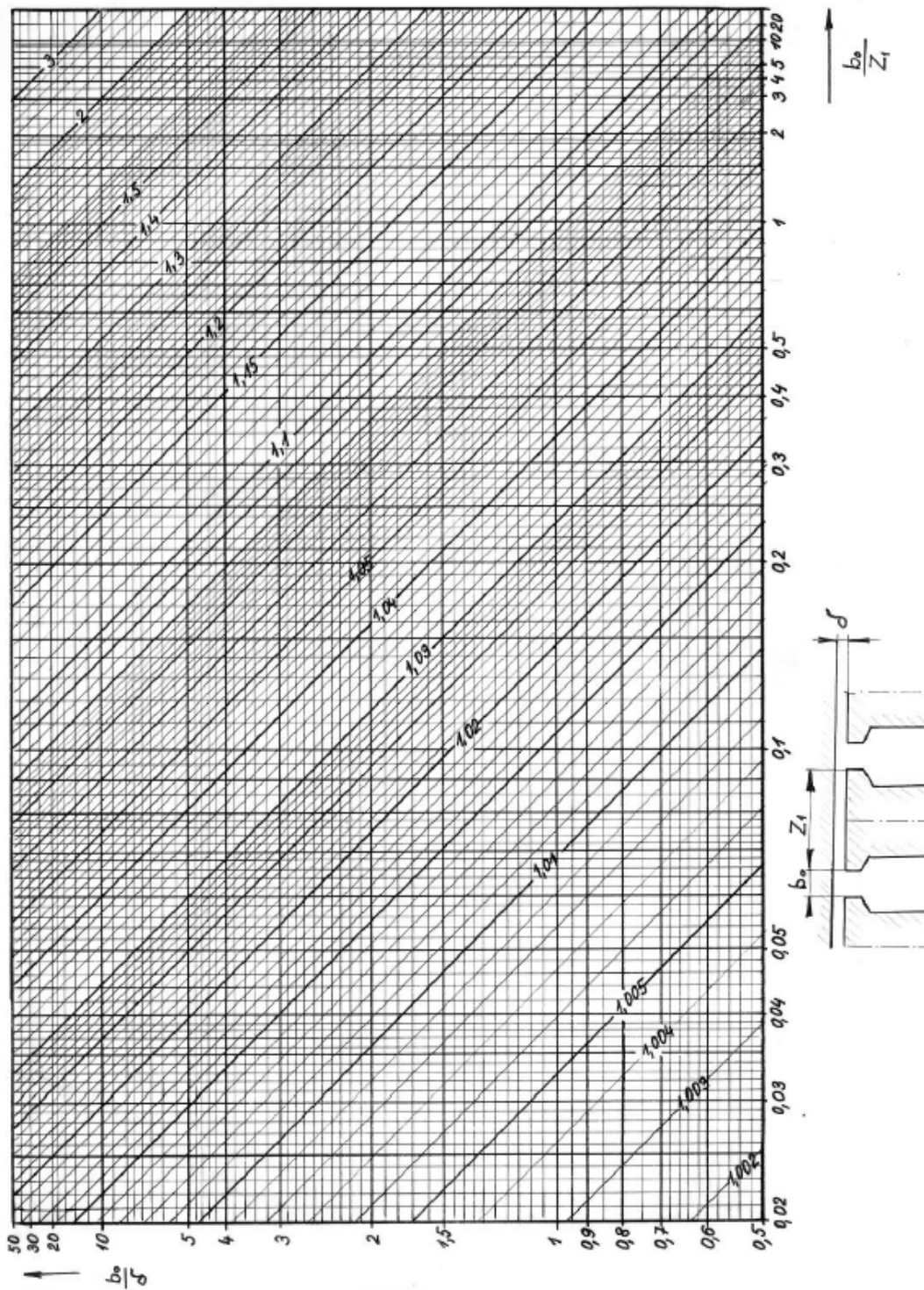
Příloha 6: Diagram deformačního činitele magnetického napětí



[2][3]

Příloha 7: Diagram Carterova činitele na drážkování

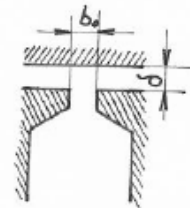
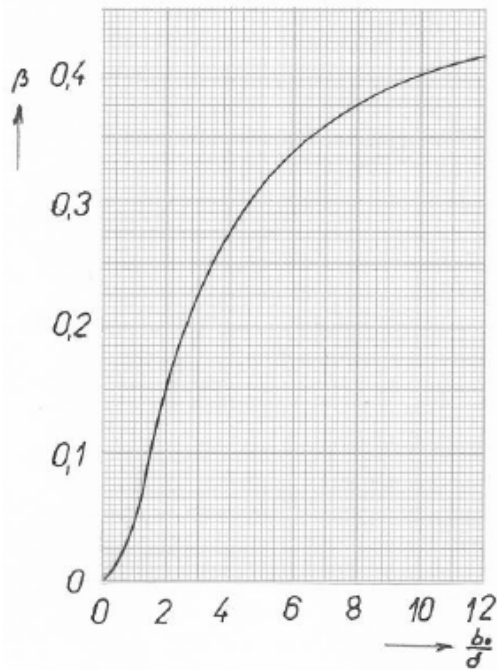
CARTERŮV ČINITEL NA DRÁŽKOVÁNÍ



[2][3]

Příloha 8: Diagram činitele povrchových ztrát v pólovém nástavci

- 49 -



$k_o = 23,5$ kovaná ocel
 17,5 litina
 8,6 plech 2 mm
 2,8 plech 0,5 mm

k_o, β - činitelé povrchových ztrát v pólovém nástavci

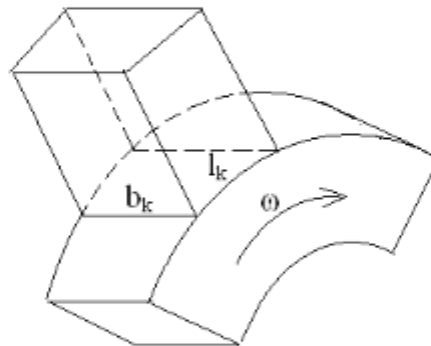
Činitel mechanických ztrát :

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

[2][3]

Příloha 9: Tabulka rozměrů kartáčů**Doporučené rozměry kartáčů**

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

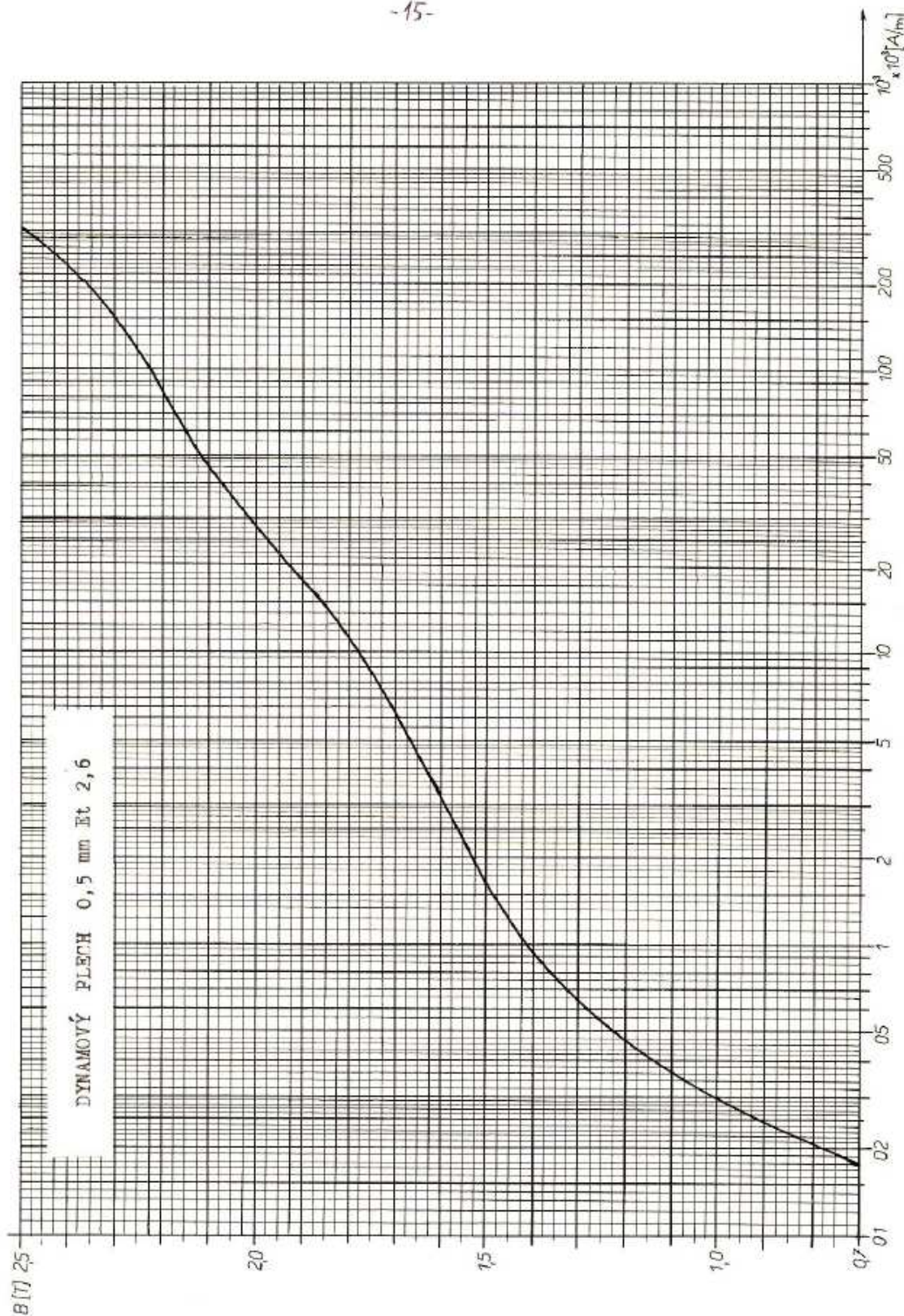
**Kartáče pro kroužky – vlastnosti**

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

[2][3]

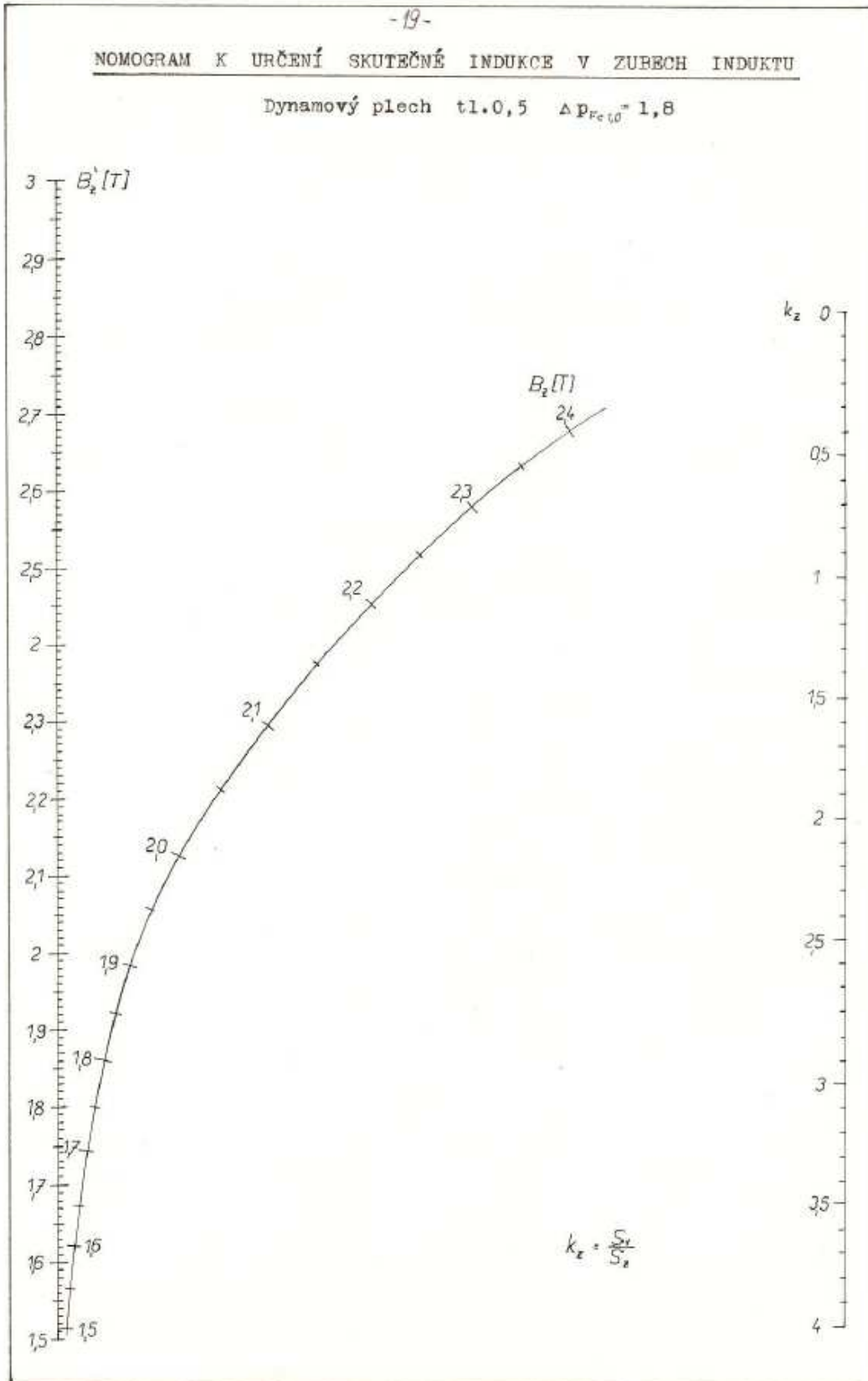
Příloha 10: Diagram dynamových plechů

-15-



[2][3]

Příloha 11: Nomogram k určení skutečné indukce v zubech induktu



[2][3]

Příloha 12: Tabulka rozměrů plochých měděných tyčí se zaoblenými hranami

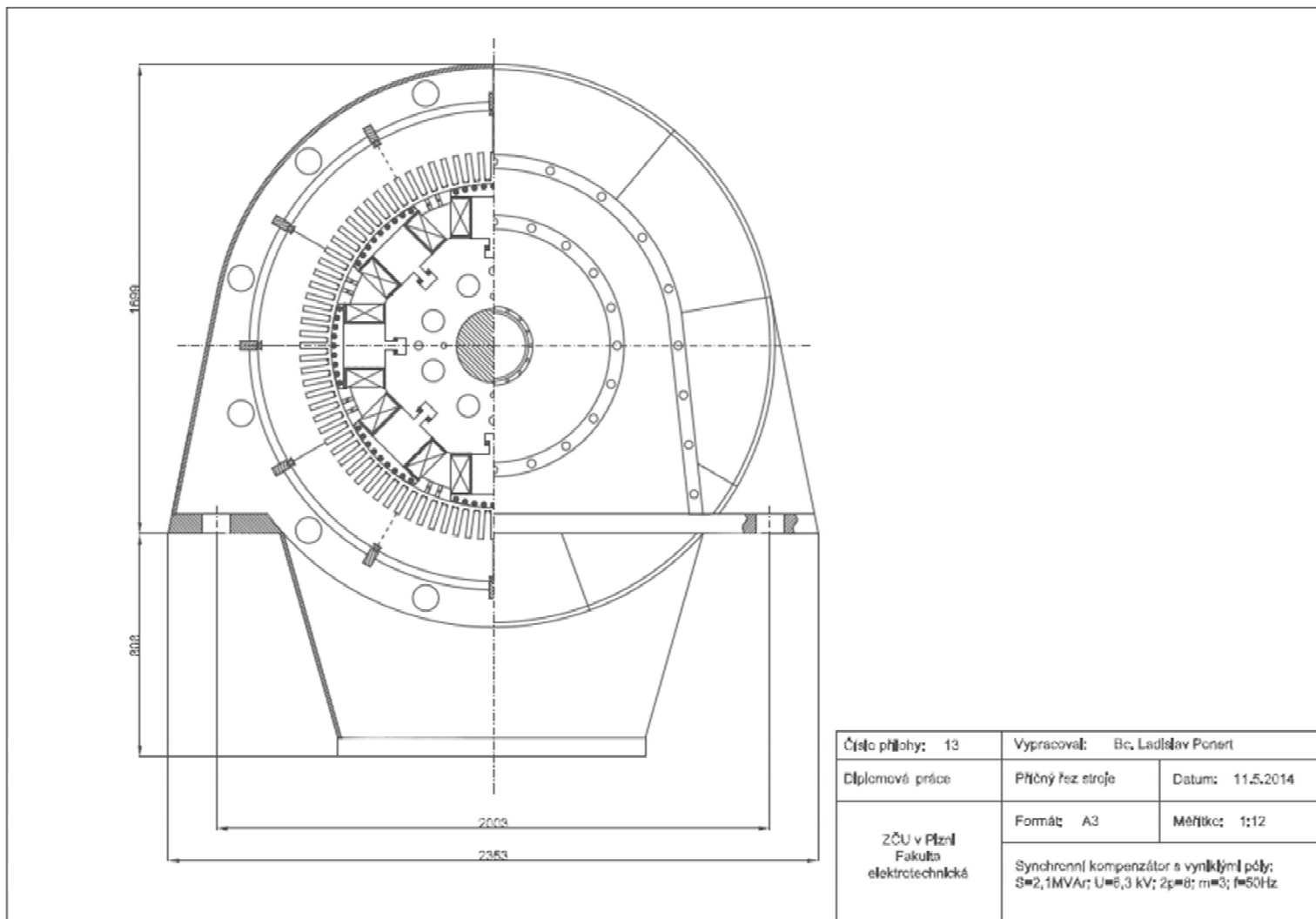
Tloušťka (mm)

Šířka (mm)	Tloušťka (mm)													
	5	5,5	6	6,5	7	8	9	10	11	12	14	16	18	20
7	33,76	37,26	40,32	43,82	47,32	61,80	78,80							
8	38,76	42,76	46,32	50,32	54,32	69,80	87,80							
9	43,76	48,26	52,32	56,82	61,32	77,80	96,80	118,80						
10	48,76	53,76	58,32	63,32	68,32	85,80	105,80	129,80	141,80					
11	53,76	59,26	64,32	69,82	75,32	93,80	114,80	140,80	153,80	193,80				
12	58,76	64,76	70,32	76,32	82,32	101,80	123,80	147,80	165,80	207,80				
13	63,76	70,26	76,32	82,82	89,32	109,80	132,80	159,80	177,80	221,80				
14	68,76	75,76	82,32	89,32	96,32	117,80	141,80	177,80	195,80	249,80				
15	73,76	81,26	88,32	95,82	103,32	125,80	159,80	197,80	217,80	277,80				
16	78,76	86,76	94,32	102,32	110,32	141,80	177,80	221,80	237,80	305,80				
18	88,76	97,76	106,32	115,32	124,32	157,80	197,80	249,80	261,80	348,57				
20	98,76	108,76	118,32	128,32	138,32	173,80	217,80	277,80	287,80	389,80				
22	108,76	119,76	130,32	141,32	152,32	197,80	249,80	317,80	327,80	444,57				
25	123,76	136,26	148,32	160,82	173,32	221,80	285,80	357,80	367,80	500,57				
28	138,76	152,76	166,32	180,32	194,32	237,80	307,80	387,80	397,80	536,57				
30	148,76	163,76	178,32	193,32	208,32	253,80	327,80	417,80	427,80	572,57				
32	158,76	174,76	190,32	206,32	222,32	277,80	347,80	445,80	457,80	626,57				
35	173,76	191,26	208,32	225,82	243,32	312,80	397,80	500,57	512,80	678,57				
40	198,76	218,76	238,32	258,32	278,32	357,80	447,80	572,57	587,80	796,57				
45	223,76	246,26	268,32	290,82	313,32	397,80	492,80	636,57	652,80	886,57				
50	248,76	273,76	298,32	323,32	348,32	437,80	547,80	707,80	727,80	996,57				
55	273,76	301,26	328,32	355,82	383,32	477,80	597,80	787,80	812,80	1096,57				
60	298,76	328,76	358,32	388,32	418,32	517,80	647,80	857,80	887,80	1196,57				
65	323,76	356,26	388,32	420,82	453,32	557,80	697,80	917,80	952,80	1296,57				
70	348,76	383,76	418,32	453,32	488,32	597,80	747,80	987,80	1027,80	1396,57				
75	378,76	411,26	448,32	483,82	523,32	637,80	797,80	1047,80	1087,80	1496,57				
80	398,76	438,76	478,32	518,32	558,32	677,80	847,80	1107,80	1157,80	1596,57				
90	448,76	493,76	538,32	583,32	628,32	777,80	947,80	1227,80	1287,80	1796,57				
100	498,76	548,76	598,32	648,32	698,32	827,80	1027,80	1327,80	1397,80	1896,57				
120	598,76	658,76	718,32	778,32	838,32	957,80	1177,80	1527,80	1617,80	2096,57				
150														

556

[4]

Příloha 13: Příčný řez stroje



Příloha 14: Podélný řez stroje

