

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Návrh turboalternátoru**

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Lukáš ZÍKA**  
Osobní číslo: **E13N0051P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Průmyslová elektronika a elektromechanika**  
Název tématu: **Návrh turboalternátoru**  
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. Provedte elektromagnetický návrh vzduchem chlazeného turboalternátoru následujících parametrů:  $S = 50000\text{kVA}$ ;  $U = 10500\text{ V}$ ;  $m = 3$ ;  $f = 50\text{ Hz}$ ;  $\cos \varphi = 0,8$ .
2. Metodou náhradních tepelných obvodů proveďte orientační výpočet oteplení induktu a budícího vinutí.
3. Nakreslete schematicky konstrukční uspořádání stroje v podélné a příčné poloze.

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


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

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

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

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



  
Prof. Ing. Václav Kús, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

## **Abstrakt**

Předkládaná diplomová práce se zabývá návrhem vzduchem chlazeného synchronního generátoru s válcovým rotorem - turboalternátoru. V první kapitole je uveden elektromagnetický návrh synchronního stroje vycházející ze zadaných parametrů. V druhé kapitole je proveden orientační výpočet oteplení statoru a budícího vinutí generátoru. Výpočet oteplení uvažovaných částí stroje je proveden metodou náhradních tepelných obvodů. Součástí této práce jsou schematické výkresy konstrukčního uspořádání stroje v příčném a podélném řezu.

## **Klíčová slova**

Turboalternátor, synchronní generátor, válcový rotor, elektromagnetický návrh, tepelný výpočet.

## **Abstract**

The presented diploma thesis deals with the design of an air-cooled synchronous generator with cylindrical rotor - turbo-alternator. The first chapter describes the electromagnetic design of a synchronous machine based on the specified parameters. The second chapter is focused on approximate calculation of the temperature rise of stator and exciter windings. Calculation of the temperature rise of considered parts of the machine is performed by method of equivalent thermal circuits. This thesis also consists of schematic drawings of the structural configuration of the machine in transverse and longitudinal section.

## **Keywords**

Turbo-alternator, synchronous generator, cylindrical rotor, electromagnetic design, thermal calculation.

## **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 1. 5. 2015

Bc. Lukáš Zíka

.....

## **Poděkování**

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

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>9</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>11</b>
<b>1 ELEKTROMAGNETICKÝ NÁVRH</b> .....	<b>12</b>
1.1 ZADANÉ HODNOTY .....	12
1.2 ZÁKLADNÍ HODNOTY .....	12
1.3 NÁVRH VINUTÍ INDUKTU (STATORU) .....	13
1.3.1 Parametry vinutí .....	14
1.3.2 Výpočet činitelů vinutí .....	16
1.3.3 Návrh drážky .....	17
1.3.4 Určení čelní části statorového vinutí .....	20
1.3.5 Odpor a rozptylová reaktance statorového vinutí .....	22
1.4 NÁVRH MAGNETICKÉHO OBVODU .....	24
1.4.1 Určení magnetického toku .....	24
1.4.2 Velikost vzduchové mezery .....	25
1.4.3 Magnetické napětí reakce kotvy .....	25
1.4.4 Dimenzování magnetického obvodu .....	25
1.4.5 Délky středních siločar částí magnetického obvodu .....	26
1.4.6 Charakteristika naprázdno .....	26
1.5 NÁVRH BUDÍČÍHO VINUTÍ .....	32
1.6 KROUŽKY A KARTÁČE .....	34
1.7 ZTRÁTY A ÚČINNOST .....	36
1.7.1 Ztráty .....	36
1.7.2 Účinnost .....	38
<b>2 TEPELNÝ VÝPOČET</b> .....	<b>39</b>
2.1 URČENÍ NÁHRADNÍ TEPELNÉ SÍTĚ .....	39
2.2 VÝPOČET OTEPLENÍ INDUKTU .....	40
2.2.1 Určení ztrát v uvažovaném úseku .....	41
2.2.2 Výpočet tepelných odporů .....	41
2.2.3 Určení okolních teplot vymezeného úseku .....	44
2.2.4 Sestavení a řešení náhradního tepelného obvodu vymezeného úseku .....	46
2.2.5 Oteplení čel vinutí .....	47
2.3 VÝPOČET OTEPLENÍ BUDÍČÍHO VINUTÍ .....	48
2.3.1 Výpočet tepelných odporů .....	49
2.3.2 Sestavení a řešení náhradního tepelného obvodu vymezeného úseku .....	52
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>54</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b> .....	<b>56</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH</b> .....	<b>57</b>



## Seznam symbolů a zkratek

A.....	Obvodová proudová hustota [ $A \cdot m^{-1}$ ]
a.....	Počet paralelních větví [-]
$A_m$ .....	Činitel mechanických ztrát [-]
B.....	Magnetická indukce [T]
C.....	Essonův činitel elektromagnetického využití [ $kVA \cdot m^{-3} \cdot (ot/min)^{-1}$ ]
c.....	Vzdálenost mezi čely [m]
$C_1$ .....	Deformační činitel průběhu magnetické indukce ve vzduchové mezeře [-]
$\cos \varphi$ .....	Účinitel [-]
$c_p$ .....	Hmotnostní měrné teplo [ $W \cdot s \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ]
$c_v$ .....	Objemové měrné teplo [ $W \cdot s \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$ ]
f.....	Frekvence [Hz]
F.....	Magnetické napětí [A]
H.....	Intenzita magnetického pole [ $A \cdot m^{-1}$ ]
I.....	Elektrický proud [A]
$k_c$ .....	Carterův činitel [-]
m .....	Hmotnost [kg]
m .....	Počet fází [-]
$m'$ .....	Matematický počet fází [-]
n .....	Otáčky [ $ot \cdot min^{-1}$ ]
o .....	Délka oka čela [m]
P.....	Činný výkon [W]
p .....	Počet pólových dvojic [-]
Q.....	Počet drážek statoru [-]
q .....	Počet drážek na pól a fázi [-]
R.....	Elektrický odpor [ $\Omega$ ]
R.....	Tepelný odpor [ $K \cdot W^{-1}$ ]
S.....	Zdánlivý výkon [VA]
U.....	Elektrické napětí [V]
u .....	Procentní hodnota elektrického napětí [%]
v .....	Výběh vinutí z drážky [m]
X.....	Reaktance [ $\Omega$ ]
x .....	Procentní hodnota reaktance [%]

$y$	.....	Cívkový krok [-]
$z$	.....	Šířka zubu [m]
$\alpha$	.....	Součinitel přestupu tepla [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ]
$\alpha_\varepsilon$	.....	Úhel sklonu čel [°]
$\beta$	.....	Poměrné zkrácení kroku vinutí [-]
$\gamma_\sigma$	.....	Poměrná hodnota rozptylového magnetického toku [-]
$\delta$	.....	Velikost vzduchové mezery [m]
$\Delta P$	.....	Ztrátový výkon [W]
$\Delta p_{\text{Fe}}$	.....	Ztrátové číslo plechů [ $\text{W} \cdot \text{kg}^{-1}$ ]
$\Delta \vartheta$	.....	Oteplení [K]
$\eta$	.....	Účinnost [-]
$\vartheta$	.....	Teplota [°C]
$\lambda$	.....	Součinitel tepelné vodivosti [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ]
$\nu$	.....	Řád harmonické [-]
$\xi$	.....	Náhradní výška vodiče [m]
$\rho$	.....	Hustota [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]
$\rho$	.....	Měrný elektrický odpor [ $\Omega \cdot \text{m}$ ]
$\sigma$	.....	Proudová hustota [ $\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$ ]
$\Phi$	.....	Magnetický tok [Wb]

## Úvod

Turboalternátory jsou synchronní generátory, které jsou využívány k výrobě elektrické energie v tepelných a jaderných elektrárnách. Zde jsou poháněny parní nebo plynovou turbínou. Tyto turbíny mají ekonomický provoz při vysokých otáčkách. Proto se tyto stroje používají při frekvenci 50 Hz jako dvoupólové, tedy na  $3000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ . Při frekvenci 60 Hz se mohou použít i jako čtyřpólové, kdy je otáčivá rychlost rotoru  $1800 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ . Vzhledem k vysoké otáčivé rychlosti působí na rotor značné odstředivé síly, a proto je omezen průměr rotoru  $D_r = 1,1 \div 1,2 \text{ m}$ . Z tohoto důvodu vychází stroje s hladkým rotorem štíhlé, tzn. o malém průměru a velké délce ve srovnání se stroji s vyniklými póly. To však klade větší nároky na intenzivní chlazení generátoru, aby se ztrátové teplo odvedlo i ze střední části dlouhého statoru a rotoru.

V současné době není na trhu poptávka po strojích velkých výkonů, ale po strojích relativně menších výkonů (do 250 MW) a hlavně jednoduché konstrukce, tzn. se vzduchovým chlazením.

Dříve se turboalternátory od cca. 80 MW běžně vyráběly s vodíkovým chlazením a od cca. 230 MW s kombinovaným chlazením voda-vodík. Vývoj materiálů a návrhových metod elektrických strojů umožnil výrobu turboalternátorů pouze se vzduchovým chlazením až do výkonu cca. 250 MW. Velké zásluhy na tom nese vývoj izolačních materiálů používaných na izolaci vinutí, kdy se nyní využívá izolace s lepšími izolačními schopnostmi, a proto se může dovolit menší tloušťka izolace vinutí, tzn. v drážce je více místa pro aktivní vodiče a je umožněn lepší přestup ztrátového tepla z vodiče do jeho okolí. Dalším důvodem je vývoj materiálů pro elektrotechnické plechy, kdy při shodném sycení magnetickou indukcí vykazují tyto materiály menší ztráty.

Nadměrné zvýšení teploty v elektrickém stroji způsobuje zkrácení životnosti izolace vinutí a tedy i zkrácení životnosti celého stroje, proto výpočet oteplení a návrh ventilačního systému představují důležité části návrhu elektrického stroje. Důležitost chlazení elektrických strojů dokazuje skutečnost, že chlazení rozhoduje o využití aktivních materiálů nově navrhovaných strojů a tím i o zmenšování hmotnosti na jednotku výkonu a je jedním z rozhodujících činitelů provozní spolehlivosti.

# 1 Elektromagnetický návrh

Elektromagnetický návrh obsahuje:

- určení hlavních rozměrů a parametrů stroje
- návrh vinutí induktu včetně izolačního systému a uspořádání vinutí v drážce
- dimenzování magnetického obvodu a sestavení charakteristiky naprázdno
- návrh budícího vinutí
- určení odporů a reaktancí
- výpočet ztrát a účinnosti

Postup elektromagnetického návrhu je sestaven pomocí [1], [3] a [4].

## 1.1 Zadané hodnoty

Pro výpočet jsou zadány následující hodnoty:

Zdánlivý výkon	$S = 50 \text{ MVA}$
Sdružené napětí	$U = 10,5 \text{ kV}$
Počet fází	$m = 3$
Jmenovité otáčky	$n = 3000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$
Frekvence	$f = 50 \text{ Hz}$
Účinník	$\cos\varphi = 0,8$

## 1.2 Základní hodnoty

Ze zadaných hodnot jsou vypočteny základní hodnoty potřebné pro následující výpočty.

Činný výkon

$$P = S \cdot \cos\varphi = 50000 \cdot 0,8 = 40000 \text{ kW} \quad (1.1)$$

Fázové napětí

$$U_f = \frac{U}{\sqrt{3}} = \frac{10\,500}{\sqrt{3}} = 6062 \text{ V} \quad (1.2)$$

Počet pólpárů

$$p = \frac{60f}{n} = \frac{60 \cdot 50}{3000} = 1 \quad (1.3)$$

Počet pólů

$$2p = 2 \quad (1.4)$$

Fázový proud

$$I_1 = \frac{S}{\sqrt{3}U_s} = \frac{50000 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 10500} = 2749 \text{ A} \quad (1.5)$$

Vnitřní průměr (vrtání) statoru:

a) Podle empirického vztahu

$$D_1 = 0,08 \cdot (2p)^{0,625} \cdot S^{0,185} = 0,08 \cdot 2^{0,625} \cdot 50\,000^{0,185} = 0,913 \text{ m} \quad (1.6)$$

b) Z grafu (sestrojeného na základě zkušeností z mnoha již provedených strojů)

([3] str. 487, obr. 644)

$$D_1 = 0,95 \text{ m}$$

Volím vnitřní průměr statoru

$$D_1 = 0,913 \text{ m}$$

Mezipólová rozteč

$$t_p = \frac{\pi \cdot D_1}{2p} = \frac{\pi \cdot 0,913}{2} = 1,434 \text{ m} \quad (1.7)$$

Předběžná obvodová proudová hustota

$$\text{odečteno z grafu Příloha č. 1: } A = 90\,000 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$$

Indukce ve vzduchové mezeře

$$\text{odečteno z grafu Příloha č. 1: } B_\delta = 0,92 \text{ T}$$

### 1.3 Návrh vinutí induktu (statoru)

S ohledem na vnitřní průměr statoru a napětí volím mezidrážkovou rozteč na vnitřním průměru statoru

$$t_{d1} = 50 \text{ mm}$$

Tomu odpovídá:

Počet drážek induktu

$$Q = \frac{\pi \cdot D_1}{t_{d1}} = \frac{\pi \cdot 913}{50} = 57,37 \Rightarrow Q = 58 \quad (1.8)$$

Počet drážek na pól a fázi

$$q = \frac{Q}{2p \cdot m} = \frac{58}{2 \cdot 3} = 9,67 \Rightarrow q = 10 \quad (1.9)$$

Přesný počet drážek induktu

$$Q = 2p \cdot m \cdot q = 2 \cdot 3 \cdot 10 = 60 = 2 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 5 \quad (1.10)$$

Po volbě překladového čísla  $k = 2$  obdržím počet segmentů  $n_s = 6$  a počet drážek na překlad  $Q_{pr} = 5$ .

Předběžný počet závitů jedné fáze v sérii

$$N_s = \frac{\pi \cdot D_1 \cdot A}{2 \cdot m \cdot I_1} = \frac{\pi \cdot 0,913 \cdot 90\,000}{2 \cdot 3 \cdot 2749} = 15,65 \quad (1.11)$$

Počet vodičů v drážce

$$n_d = \frac{a_{\approx} \cdot N_s}{p \cdot q} = \frac{4 \cdot 15,65}{1 \cdot 10} = 6,26 \Rightarrow n_d = 6 \quad (1.12)$$

kde  $a_{\approx}$  (volím  $a_{\approx} = 4$ ) je počet paralelních větví každé fáze střídavého vinutí.

Po určení počtu paralelních větví a vodičů v drážce vypočtu skutečný počet závitů jedné fáze v sérii a skutečnou hodnotu obvodové proudové hustoty:

Skutečný počet závitů jedné fáze v sérii

$$N_s = \frac{n_d \cdot p \cdot q}{a_{\approx}} = \frac{6 \cdot 1 \cdot 10}{4} = 15 \quad (1.13)$$

Skutečná hodnota obvodové proudové hustoty

$$A = \frac{2 \cdot m \cdot I_1}{\pi \cdot D_1} \cdot N_s = \frac{2 \cdot 3 \cdot 2749}{\pi \cdot 0,913} \cdot 15 = 86\,257 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1} \quad (1.14)$$

### 1.3.1 Parametry vinutí

Počet drážek	$Q = 60$
Počet pólů	$2p = 2$
Počet fází	$m = 3$
Matematický počet fází	$m' = 6$
Počet drážek na pól a fázi	$q = 10$
Typ vinutí	smyčkové, nekřížené

Počet drážek na pól

$$Q_p = \frac{Q}{2p} = \frac{60}{2} = 30 \quad (1.15)$$

Volím cívkový krok tak, aby ve výstupním statorovém napětí byl co možná největší podíl 1. harmonické složky a co nejmenší podíl 5. harmonické složky, což se docílí tím, že cívkový krok zvolím tak, aby hodnota poměrného zkrácení kroku se co nejvíce blížila číslu 0,8333:

$$y_{1d} = 25$$

Poměrné zkrácení kroku

$$\beta = \frac{y_{1d}}{Q_p} = \frac{25}{30} = 0,8333 \quad (1.16)$$

Krok na komutátoru

$$y_k = \frac{\varepsilon \cdot K \pm a_{ss}}{p} = \frac{2}{1} = 2 \quad (1.17)$$

Základní stejnosměrné vinutí je smyčkové ( $\varepsilon = 0$ ), nekřížené (v čitateli je znaménko „+“).

Kroky v počtu cívkových stran:

Přední cívkový krok

$$y_1 = 2u \cdot y_{1d} + 1 = 2 \cdot 1 \cdot 25 + 1 = 51 \quad (1.18)$$

Zadní cívkový krok

$$y_2 = 2y_k - y_1 = 2 \cdot 2 - 51 = -47 \quad (1.19)$$

Vinutí střídavé:

Počet skupin vinutí

$$a_{ss} \cdot m' = 2 \cdot 6 = 12 \quad (1.20)$$

Počet skupin v jedné fázi

$$\frac{a_{ss} \cdot m'}{m} = \frac{2 \cdot 6}{3} = 4 \quad (1.21)$$

Počet cívek ve skupině

$$\frac{Q}{a_{ss} \cdot m'} = \frac{60}{2 \cdot 6} = 5 \quad (1.22)$$

### 1.3.2 Výpočet činitelů vinutí

Činitel vinutí  $\nu$ -té harmonické

$$k_{\nu\nu} = \sin\left(\nu \cdot \beta \cdot \frac{\pi}{2}\right) \cdot \frac{\sin \nu \cdot \frac{\pi}{m'}}{n \cdot \sin \nu \cdot \frac{\pi}{m' \cdot n}} \quad (1.23)$$

kde

$\nu$  řád harmonické

$\beta$  poměrné zkrácení kroku

$m'$  matematický počet fází

$n$  čísel ve zlomkovém tvaru počtu drážek na pól

a fází ( $q = \frac{n}{c} = \frac{10}{1}$ )

Činitel vinutí základní harmonické ( $\nu = 1$ )

$$k_{\nu 1} = \sin\left(1 \cdot 0,8333 \cdot \frac{\pi}{2}\right) \cdot \frac{\sin 1 \cdot \frac{\pi}{6}}{10 \cdot \sin 1 \cdot \frac{\pi}{6 \cdot 10}} = 0,9228 \quad (1.24)$$

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

$$k_{\nu 5} = 0,05$$

$$k_{\nu 7} = -0,0361$$

$$k_{\nu 11} = -0,0887$$

$$k_{\nu 13} = -0,0767$$

Nyní mohu určit hodnotu Essonova činitele elektromagnetického využití stroje

$$C = \frac{\pi^2}{60 \cdot \sqrt{2}} \cdot A \cdot B_{\delta} \cdot k_{\nu 1} = \frac{\pi^2}{60 \cdot \sqrt{2}} \cdot 86,257 \cdot 0,92 \cdot 0,9228 = 8,52 \frac{kVA}{m^{-3} \cdot \frac{ot}{min}} \quad (1.25)$$

když obvodová proudová hustota  $A$  je dosazena v  $[kA]$ .



Z toho vychází efektivní délka stroje

$$l_e = \frac{S}{C \cdot D_1^2 \cdot n} = \frac{50\,000}{8,52 \cdot 0,913^2 \cdot 3\,000} = 2,347 \text{ m} \quad (1.26)$$

Předpokládám použití radiálních ventilačních kanálů, které rozdělí plechový svazek induktu na pakety o zvolené šířce  $\check{s}_p = 50 \text{ mm}$ , přičemž volím šířku ventilačního kanálu  $\check{s}_k = 10 \text{ mm}$ .

Počet paketů

$$i = \frac{l_e}{\check{s}_p} = \frac{2,347}{0,05} = 46,94 \Rightarrow i = 47 \quad (1.27)$$

Počet ventilačních kanálů

$$i_k = i - 1 = 47 - 1 = 46 \quad (1.28)$$

Celková délka induktu (včetně radiálních ventilačních kanálů)

$$L = l_e + \check{s}_k \cdot i_k = 2,347 + 0,01 \cdot 46 = 2,807 \text{ m} \quad (1.29)$$

### 1.3.3 Návrh drážky

V případě, kdy jsou 2 vodiče v drážce ( $n_d = 2$ ), se použije permutovaná (Roebelova) tyč, v mém návrhu je 6 vodičů v drážce ( $n_d = 6$ ), jedná se tedy o závitové vinutí. Prostor pro šířku holého vodiče a hloubku drážky se určí dle *Tab. 1.1*. Na induktu použiju otevřenou obdélníkovou drážku tvaru M, tzn., že zuby budou lichoběžníkového tvaru.

Velikost drážkové rozteče na průměru  $D_1$

$$t_{d1} = \frac{\pi \cdot D_1}{Q} = \frac{\pi \cdot 913}{60} = 47,8 \text{ mm} \quad (1.30)$$

Šířka zubu

$$z_1 = \frac{B_\delta \cdot t_{d1}}{B'_{z1} \cdot k_{Fe}} = \frac{0,92 \cdot 47,8}{1,7 \cdot 0,92} = 28,1 \text{ mm} \quad (1.31)$$

kde  $B'_{z1} = 1,7 \text{ T}$  je hodnota magnetické indukce v hlavě zubu (na průměru  $D_1$ ) a  $k_{Fe} = 0,92$  je činitel plnění železa. Obě tyto hodnoty byly zvoleny na základě doporučení vedoucího práce.

Tomu odpovídá šířka drážky

$$b_d = t_{d1} - z_1 = 47,8 - 28,1 = 19,7 \text{ mm} \quad (1.32)$$

Nejblíže normalizovaná šířka drážky určená z tab. pro drážku M ([4] str. 662, tab. D 4.1d)

$$b_d = 19,5 \text{ mm}$$

Skutečná šířka zubu na průměru  $D_1$

$$z_1 = t_{d1} - b_d = 47,8 - 19,5 = 28,3 \text{ mm} \quad (1.33)$$

Jak už bylo řečeno výše, jedná se o závitové vinutí ( $n_d = 6$ ), tomu odpovídá pro napětí 10,5 kV následující uspořádání vodičů a izolace v drážce:

Položka	Šířka		Hloubka	
Vyložení drážky	jen do 6,3 kV	-	jen do 6,3 kV	-
Izolace proti železu	$2 \cdot t_i \rightarrow 2 \cdot 3,1$	6,2	$4 \cdot t_i \rightarrow 4 \cdot 3,1$	12,4
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	$2 \cdot n_d \cdot 0,48 \rightarrow 2 \cdot 6 \cdot 0,48$	5,76
Izolace vodičů (oboustranná)	$1 \cdot j \cdot 0,5 \rightarrow 1 \cdot 1 \cdot 0,5$	0,5	$n_d \cdot i \cdot 0,5 \rightarrow 6 \cdot 6 \cdot 0,5$	18
Mezivrstva	-	-	$1 \cdot m_v \rightarrow 1 \cdot 6$	6
$\Sigma$ izolace		8,16		43,16
Holý vodič	$j \cdot b \rightarrow 1 \cdot 11$	11	$n_d \cdot i \cdot h \rightarrow 6 \cdot 6 \cdot 2,8$	100,8
Vůle na šířku	0,2 až 0,6	0,34	-	-
Vložka na dno	-	-	$1 \cdot 1$	1
Vložka pod klín	-	-	$1 \cdot 0,5$	0,5
Vůle na hloubku	-	-	0,4 až 2	2,54
Rozměr drážky bez klínu	$b_d$	19,5	$h_2$	148
Klín + můstek	-	-	$h_0 + h_1 \rightarrow 1 + 9$	10
<b>Konečný rozměr drážky</b>	<b><math>b_d</math></b>	<b>19,5</b>	<b><math>h_d</math></b>	<b>158</b>

Tab. 1.1 Uspořádání vodičů a izolace v drážce

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	<b>3,1</b>	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	

Tab. 1.2 Tloušťka izolace proti železu (zvýrazněna zvolená izolace) [1]

Hloubku drážky bez klínu ( $h_2$ ) volím dle doporučení ČSN, aby její velikost byla zakončena číslicí 0 nebo 2 nebo 5 a nebo 8. Např.  $h_2 = 90$  (nebo 92, 95, 98, 100). Ze součtu celkové výšky všech vodičů v drážce a izolací a nejbližší vyšší velikosti  $h_2$  obdržím vůli na hloubku. Ta se vyplní vložkou pod drážkovým klínem. [1]

Předběžný průřez vodiče

$$S'_{Cu1} = \frac{I_1}{a_{\approx} \cdot \sigma_{Cu1}} = \frac{2749}{4 \cdot 3,75} = 183,27 \text{ mm}^2 \quad (1.34)$$

když jsem předběžnou proudovou hustotu ve vodiči určil z empirického vztahu

$$\sigma_{Cu1} = \sqrt{\frac{K}{b_v}} = \sqrt{\frac{155}{11}} = 3,75 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2} \quad (1.35)$$

kde  $K$  je součinitel závislý na napětí (dle Tab. 1.3) a  $b_v$  je šířka holého vodiče v drážce, která byla určena z rozměrů drážky a izolací a z normalizovaných rozměrů holých vodičů (viz Příloha č. 2).

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

Tab. 1.3 Součinitel pro určení proudové hustoty ve vodiči [1]

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

$$h_v = \frac{S'_{Cu1}}{b_v} = \frac{183,27}{11} = 16,66 \text{ mm} \quad (1.36)$$

Protože při takto vysokém vodiči by byly neúnosně velké přídavné ztráty vlivem skinefektu, je třeba rozdělit původní vodič na větší počet paralelních vodičů menších rozměrů. Vodiče volím dle normalizovaných rozměrů (viz Příloha č. 2) a jim odpovídajícímu skutečnému průřezu, který respektuje zaoblení hran i nerovnost povrchu. [1]

Původní vodič je rozdělen na výšku na 6 vodičů ( $i=6$ ) o rozměrech holého / izolovaného vodiče: (11×2,8 / 11,5×3,3) mm, když skutečný průřez jednoho vodiče je dle ČSN (viz Příloha č. 2):  $S_1 = 30,2 \text{ mm}^2$ .

Výsledný průřez vodičů tvořícího jeden závit

$$S_{Cu1} = j \cdot i \cdot S_1 = 1 \cdot 6 \cdot 30,2 = 181,2 \text{ mm}^2 \quad (1.37)$$

Skutečná proudová hustota

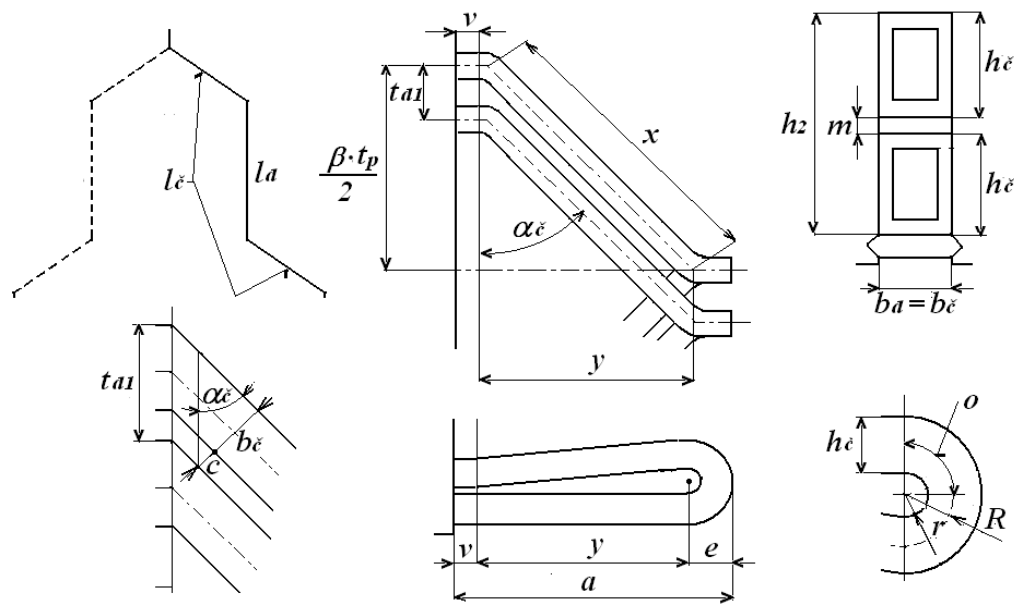
$$\sigma_{Cu1} = \frac{I_1}{a_{\approx} \cdot S_{Cu1}} = \frac{2749}{4 \cdot 181,2} = 3,79 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2} \quad (1.38)$$

Nákres statorové drážky je uveden v Příloze č. 3.

### 1.3.4 Určení čelní části statorového vinutí

Vzhledem k doporučení vedoucího práce využívám při určení čelní části statorového vinutí postup výpočtu pro vinutí válcové. U řešeného stroje se však použije vinutí kuželové, které je pro turboalternátory typické. Důvodem použití výpočtu pro válcové vinutí je vyšší náročnost výpočtu kuželového vinutí. Vzhledem k tomu, že délka čela válcového a kuželového vinutí je přibližně stejná, nedopouštím se tímto zjednodušením velké chyby.

Při výpočtu délky čela vycházím z Obr. 1.1.



Obr. 1.1 Válcové vinutí [1]

Výběh cívky z drážky  $v$  je závislý na napětí stroje dle následující tab.:

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

Tab. 1.4 Výběh cívky z drážky  $v$  závislosti na napětí [1]

Volím pro  $U = 10,5 \text{ kV}$  výběh cívky z drážky  $v = 0,08 \text{ m}$ .

Vnitřní poloměr oka  $r$  je závislý především na rozměrech vodiče, dále na velikosti cívek, napětí, požadavku na chlazení čel a pohybuje se v rozmezí  $r = (5 \div 20) \text{ mm}$ .

Volím vnitřní poloměr oka  $r = 10 \text{ mm}$ .

Výška čela

$$h_c \doteq \frac{1}{2} \cdot (h_2 - m) = \frac{1}{2} \cdot (148 - 6) = 71 \text{ mm} \quad (1.39)$$

kde  $h_2$  je hloubka drážky od jejího dna po klín a  $m$  je tloušťka mezivrstvy (viz Obr. 1.1).

Střední poloměr oka

$$R = r + \frac{h_\varepsilon}{2} = 10 + \frac{71}{2} = 45,5 \text{ mm} \quad (1.40)$$

Vzdálenost mezi čely  $c$  se volí např. v závislosti na velikosti napětí dle vztahu:

$$c = 4 + \frac{U [\text{kV}]}{2} = 4 + \frac{10,5}{2} = 9 \text{ mm} \quad (1.41)$$

Úhel sklonu čel válcového vinutí

$$\sin \alpha_\varepsilon = \frac{b_\varepsilon + c}{t_{d1}} = \frac{19,5 + 9}{47,8} = 0,596 \quad (1.42)$$

$$\alpha_\varepsilon = \arcsin 0,596 = 37^\circ \quad (1.43)$$

když šířku čela  $b_\varepsilon$  volím stejnou jako šířku drážky  $b_d$ .

Délka šroubovice tvořící část čela

$$x = \frac{\beta \cdot t_p}{2 \cdot \cos \alpha_\varepsilon} = \frac{0,8333 \cdot 1434}{2 \cdot \cos 37^\circ} = 748 \text{ mm} \quad (1.44)$$

Délka oka

$$o = \frac{\pi \cdot R}{2} = \frac{\pi \cdot 45,5}{2} = 71 \text{ mm} \quad (1.45)$$

Délka čela

$$l_\varepsilon = 2 \cdot (v + x + o) = 2 \cdot (0,08 + 0,748 + 0,071) = 1,798 \text{ m} \quad (1.46)$$

Délka vodiče

$$l_v = L + l_\varepsilon = 2,807 + 1,798 = 4,605 \text{ m} \quad (1.47)$$

Vyložení čel v podélném směru:

Délka oka

$$e = h_\varepsilon + r = 71 + 10 = 81 \text{ mm} \quad (1.48)$$

Průmět  $x$  do osového směru

$$y = \frac{\beta \cdot t_p}{2} \cdot \text{tg} \alpha_\varepsilon = \frac{0,8333 \cdot 1434}{2} \cdot \text{tg} 37^\circ = 450 \text{ mm} \quad (1.49)$$

Celkové vyložení

$$a = v + y + e = 0,08 + 0,45 + 0,081 = 611 \text{ mm} \quad (1.50)$$

### 1.3.5 Odpor a rozptylová reaktance statorového vinutí

Odpor jedné fáze:

Elektrický odpor pro stejnosměrný proud (tedy bez uvažování skin efektu)

$$R'_{1/20} = \rho_{Cu} \cdot \frac{2 \cdot l_v \cdot N_s}{a_{\approx} \cdot S_{Cu1}} = \frac{1}{56} \cdot \frac{2 \cdot 4,605 \cdot 15}{4 \cdot 181,2} = 3,4 \cdot 10^{-3} \Omega \quad (1.51)$$

kde  $\rho_{Cu}$  je měrný elektrický odpor měděného vodiče při teplotě 20 °C.

Vliv skin efektu:

Náhradní výška vodiče

$$\xi = 2 \cdot \pi \cdot h \cdot \sqrt{\frac{j \cdot b \cdot f}{b_d \cdot \rho_{Cu}} \cdot 10^{-7}} = 2 \cdot \pi \cdot 2,8 \cdot \sqrt{\frac{1 \cdot 11 \cdot 50}{19,5 \cdot \frac{1}{56}} \cdot 10^{-7}} = 0,22 \quad (1.52)$$

kde  $j$  je počet vodičů, na kolik se rozdělil původní vodič na šířku.

Činitel zvýšení elektrického odporu

$$k_{Cu} = \frac{g^2 - 0,2}{9} \cdot \xi^4 = \frac{36^2 - 0,2}{9} \cdot 0,22^4 = 0,337 \quad (1.53)$$

Celkový počet vodičů v drážce nad sebou

$$g = i \cdot n_d = 6 \cdot 6 = 36 \quad (1.54)$$

kde  $i$  je počet vodičů, na kolik se rozdělil původní vodič na výšku.

Odpor při střídavém proudu při 20 °C

$$R_{1/20} = (1 + k_{Cu}) \cdot R'_{1/20} = (1 + 0,337) \cdot 3,4 \cdot 10^{-3} = 4,5 \cdot 10^{-3} \Omega \quad (1.55)$$

Odpor při střídavém proudu při 75 °C

$$R_{1/75} = 1,22 \cdot R_{1/20} = 1,22 \cdot 4,5 \cdot 10^{-3} = 5,49 \cdot 10^{-3} \Omega \quad (1.56)$$

Procentní hodnota úbytku napětí na ohmickém odporu

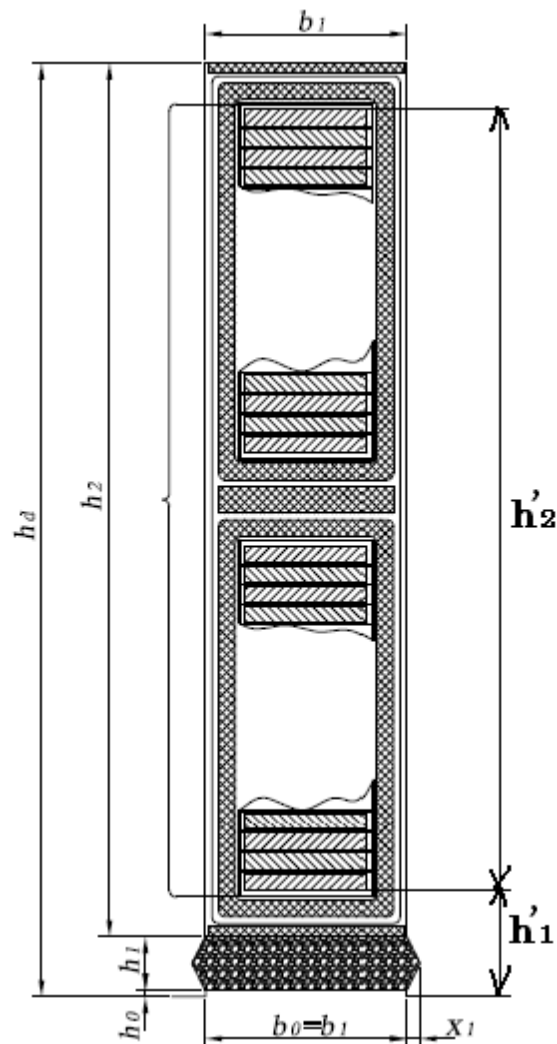
$$u_R = \frac{R_{1/75} \cdot I_1}{U_f} \cdot 100 = \frac{5,49 \cdot 10^{-3} \cdot 2749}{6062} \cdot 100 = 0,25\% \quad (1.57)$$

Rozptylová reaktance statorového vinutí:

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 rovnice 1.58.

Co se týče vzorce pro výpočet rozptylové reaktance statorového vinutí, tak  $h'_2$  je vzdálenost krajních vláken vodičů v drážce a  $h'_1$  je vzdálenost horního krajního vodiče od kraje drážky (viz Obr. 1.2). Hodnota  $b_d$  je šířka drážky a je rovna  $b_1$ .

$$\begin{aligned}
 X_{\sigma} &= \frac{(4\pi)^2 \cdot f \cdot N_s^2}{p \cdot q} \cdot l_e \cdot \left[ \left( \frac{h'_2}{3b_d} + \frac{h'_1}{b_d} \right) + \frac{l_{\xi}}{l_e} \cdot q \cdot \left( 0,187 + 0,166 \cdot \frac{t_p}{l_{\xi}} \cdot \beta \right) + \ln \left( 1 + \frac{\pi \cdot z_1}{2b_d} \right) \right] \cdot 10^{-7} = \\
 &= \frac{(4\pi)^2 \cdot 50 \cdot 15^2}{1 \cdot 10} \cdot 2,347 \cdot \\
 &\cdot \left[ \left( \frac{135,8}{3 \cdot 19,5} + \frac{17,12}{19,5} \right) + \frac{1,798}{2,347} \cdot 10 \cdot \left( 0,187 + 0,166 \cdot \frac{1,434}{1,798} \cdot 0,8333 \right) + \ln \left( 1 + \frac{\pi \cdot 28,3}{2 \cdot 19,5} \right) \right] \cdot 10^{-7} = \\
 &= 0,278 \Omega
 \end{aligned} \tag{1.58}$$



Obr. 1.2 Schematický náčrt statorové drážky [1]

Procentní hodnota úbytku napětí na rozptylové reaktanci

$$u_{\sigma} = \frac{X_{\sigma} \cdot I_1}{U_f} \cdot 100 = \frac{0,278 \cdot 2749}{6062} \cdot 100 = 12,61\% \tag{1.59}$$

Procentní hodnota rozptylové reaktance

$$x_{\sigma} = u_{\sigma} = 12,61 \% \quad (1.60)$$

## 1.4 Návrh magnetického obvodu

Magnetickým obvodem se nazývá ta část elektrického stroje, kudy se uzavírá žádoucí magnetický tok stroje. Ten je tvořen železem a vzduchovou mezerou. Železo zajišťuje dobrou magnetickou vodivost a výrazně přispívá k velikosti magnetického toku.

Vzduchová mezera by měla být volena co možná nejmenší, protože představuje velký magnetický odpor, který velmi ovlivňuje velikost budícího proudu potřebného k vybuzení příslušného magnetického toku. Zároveň vzduchová mezera nesmí být příliš malá z důvodu přesnosti uložení a tuhosti rotoru a nárůstu pulsací drážkové harmonické.

Při návrhu vycházím z velikosti magnetického toku a vlastností použitých materiálů. Pro zjednodušení výpočtu magnetického obvodu je uvažováno, že magnetický tok prochází pouze širokým zubem rotoru. Ve skutečnosti tomu tak není a část toku prochází i úzkými zuby. Respektování této skutečnosti však přináší řadu komplikací ve výpočtu magnetického obvodu, které přesahují rámec této práce. V praxi se tato problematika řeší např. pomocí metody konečných prvků.

### 1.4.1 Určení magnetického toku

Velikost magnetického toku určím z rovnice pro indukované napětí a provedu kontrolu podle rozměrů stroje a velikosti magnetické indukce ve vzduchové mezeře (předpokládám její přibližně sinusový průběh).

Magnetický tok

$$\Phi = \frac{U_f}{4,44 \cdot f \cdot N_s \cdot k_{v1}} = \frac{6062}{4,44 \cdot 50 \cdot 15 \cdot 0,9228} = 1,973 \text{Wb} \quad (1.61)$$

Kontrola

$$\Phi = \frac{2}{\pi} \cdot t_p \cdot l_e \cdot B_{\delta} = \frac{2}{\pi} \cdot 1,434 \cdot 2,347 \cdot 0,92 = 1,971 \text{Wb} \quad (1.62)$$

Hodnoty velmi dobře souhlasí, počítám nadále s hodnotou:  $\Phi = 1,973 \text{Wb}$ .

Při určení magnetické indukce v jednotlivých částech magnetického obvodu se musí počítat s celkovým magnetickým tokem, tedy součtem hlavního a rozptylového magnetického toku, který se v prvním návrhu odhadne.



Celkový magnetický tok

$$\Phi' = \Phi + \Phi_{\sigma} = (1 + \gamma_{\sigma}) \cdot \Phi \quad (1.63)$$

kde  $\gamma_{\sigma} = \frac{\Phi_{\sigma}}{\Phi}$  je předpokládaná hodnota rozptylového magnetického toku ve vzduchové mezeře (volím  $\gamma_{\sigma} = 0,08$ ).

#### 1.4.2 Velikost vzduchové mezery

Při volbě velikosti vzduchové mezery vycházím z požadované procentní hodnoty nesyčené synchronní reaktance. Velikost vzduchové mezery výrazně ovlivňuje hodnotu nesyčené synchronní reaktance.

Velikost vzduchové mezery

$$\delta = k \cdot \frac{A \cdot t_p}{B_{\delta}} \cdot \frac{10^{-6}}{x_d - x_{\sigma}} = 47 \cdot \frac{86257 \cdot 1,434}{0,92} \cdot \frac{10^{-6}}{220 - 12,61} = 30,5 \text{ mm} \quad (1.64)$$

kde  $k = (43 \div 50)$  závisí na velikosti Carterova činitele a jiných parametrech (volím  $k = 47$ ) a  $x_d$  je procentní hodnota nesyčené synchronní reaktance, není-li zadána, volí se podle počtu pólů (pro  $2p = 2$  je  $x_d = 200 \div 220$ , volím  $x_d = 220$ ).

#### 1.4.3 Magnetické napětí reakce kotvy

Amplituda základní harmonické reakce kotvy

$$F_a' = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{1}{C_1} \cdot A \cdot t_p \cdot k_{v1} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{1}{1,05} \cdot 86257 \cdot 1,434 \cdot 0,9228 = 48936 \text{ A} \quad (1.65)$$

kde  $C_1$  je deformační činitel průběhu základní harmonické magnetické indukce ve vzduchové mezeře, který jsem zvolil  $C_1 = 1,05$ .

#### 1.4.4 Dimenzování magnetického obvodu

Výška jha satoru

$$h_{js} = \frac{\Phi}{2 \cdot B_{js} \cdot k_{Fe} \cdot l_e} = \frac{1,973}{2 \cdot 1,3 \cdot 0,92 \cdot 2,347} = 0,351 \text{ m} \quad (1.66)$$

kde  $B_{js}$  je magnetická indukce v jhu satoru, kterou jsem zvolil  $B_{js} = 1,3 \text{ T}$ .

Vnější průměr satorových plechů

$$D_e = 2 \cdot h_{js} + 2 \cdot h_d + D_1 = 2 \cdot 0,351 + 2 \cdot 0,158 + 0,913 = 1,931 \text{ m} \quad (1.67)$$

Vnější průměr rotoru

$$D_r = D_1 - 2 \cdot \delta = 0,913 - 2 \cdot 0,0305 = 0,852 \text{ m} \quad (1.68)$$

Hloubka první rotorové drážky vedle širokého zubu (odhad)

$$h_{r1} = 0,15 \text{ m} \quad (1.69)$$

Hloubka ostatních rotorových drážek (odhad)

$$h_{r2} = 0,18 \text{ m} \quad (1.70)$$

Výška pólu

$$h_p = h_{r1} = 0,15 \text{ m} \quad (1.71)$$

Výška jha rotoru

$$h_{jr} = D_r - 2 \cdot h_{r1} = 0,852 - 2 \cdot 0,15 = 0,552 \text{ m} \quad (1.72)$$

#### 1.4.5 Délky středních siločar částí magnetického obvodu

Pól

$$l_p = h_p = h_{r1} = 0,15 \text{ m} \quad (1.73)$$

Jho rotoru

$$l_{jr} = \frac{D_r}{2} - l_p = \frac{0,852}{2} - 0,15 = 0,276 \text{ m} \quad (1.74)$$

Zub statoru

$$l_z = h_d = 0,158 \text{ m} \quad (1.75)$$

Jádro induktu

$$l_{ji} = \frac{\pi \cdot [D_1 + 2 \cdot (h_d + h_{js})]}{4p} = \frac{\pi \cdot [0,913 + 2 \cdot (0,158 + 0,351)]}{4 \cdot 1} = 1,517 \text{ m} \quad (1.76)$$

#### 1.4.6 Charakteristika naprázdno

Na vodorovnou osu se vynáší magnetické napětí  $F[A]$ , které je úměrné budicímu proudu. Na svislé ose jsou hodnoty elektrického napětí  $U[V]$ . Na svislou osu se též může vynést magnetický tok  $\Phi[Wb]$  nebo magnetická indukce  $B[T]$ . Aby se nemusely vynášet na svislou osu dvě, resp. tři stupnice, je vhodnější uvádět všechny uvedené veličiny v procentech, kdy se vystačí s jednou stupnicí.

K sestrojení charakteristiky naprázdno stačí určit charakteristiku vzduchové mezery, kterou je přímka procházející počátkem a která je tečnou k charakteristice naprázdno a pak tři body, vždy pro 100 % napětí a pak ještě např. pro 115 a 130 % napětí. Při výpočtu se vychází ze vztahu  $F = H \cdot l$ , kde  $H[A \cdot m^{-1}]$  je intenzita magnetického pole odpovídající magnetické indukci  $B[T]$  v uvažované části magnetického obvodu a  $l[m]$  je délka střední siločáry příslušného úseku.

Pro určení magnetického napětí železné části magnetického obvodu musí být k dispozici magnetizační charakteristiky všech materiálů, ze kterých je magnetický obvod sestaven. Pro magnetickou indukci  $B$  v daném úseku se z odpovídající charakteristiky určí velikost intenzity magnetického pole  $H$  a když vynásobím takto získanou intenzitu magnetického pole délkou střední siločáry  $l$ , získám velikost magnetického napětí  $F$  úseku. Výsledné magnetické napětí je pak dáno součtem magnetických napětí všech úseků magnetického obvodu.

Stejným způsobem se postupuje pro získání dalších bodů charakteristiky naprázdno, kdy se určí magnetické napětí postupně např. pro 1,15 a 1,3 násobky jmenovitých magnetických indukcí v jednotlivých částech magnetického obvodu.

Magnetické napětí na vzduchové mezeře

$$F_{\delta} = 0,8 \cdot k_c \cdot \delta \cdot B_{\delta} \cdot 10^6 = 0,8 \cdot 0,87 \cdot 0,0305 \cdot 0,92 \cdot 10^6 = 19\,530 \text{ A} \quad (1.77)$$

kde  $k_c$  je hodnota Carterova činitele

$$k_c = k_{cd} \cdot k_{ck} = 1,04 \cdot 0,84 = 0,87 \quad (1.78)$$

kde  $k_{cd}$  je Carterův činitel respektující vliv drážkování induktu

$$\frac{b_0}{z_1} = \frac{19,5}{28,3} = 0,69 \quad (1.79)$$

pro otevřenou drážku platí  $b_0 = b_d$

$$\frac{b_0}{\delta} = \frac{19,5}{30,5} = 0,64 \quad (1.80)$$

z nomogramu (Příloha č. 4)

$$k_{cd} = 1,04 \quad (1.81)$$

a  $k_{ck}$  je Carterův činitel respektující vliv radiálních ventilačních kanálů

$$k_{ck} = \frac{1}{1 + \frac{\delta}{2 + \delta} \cdot \frac{\check{s}_k \cdot i}{l_e}} = \frac{1}{1 + \frac{30,5}{2 + 30,5} \cdot \frac{10 \cdot 47}{2347}} = 0,84 \quad (1.82)$$

Při výpočtu magnetického napětí v zubu statoru nastává případ, kdy nelze zanedbat skutečnost, že při použití obdélníkové drážky se šířka zubu s narůstajícím průměrem zvětšuje a s tím se mění průřez železa, tedy i magnetická indukce. Jelikož je magnetizační charakteristika železa nelineární, budu postupovat následujícím způsobem.

Zjistím šířku zubu  $z_1$  na průměru vrtání statorových plechů  $D_1$ , dále šířku zubu  $z_2$  na průměru

$$D_2 = D_1 + h_d \quad (1.83)$$

procházejícím středem hloubky drážek a šířku zubu  $z_3$  na průměru patní kružnice zubu

$$D_3 = D_1 + 2 \cdot h_d \quad (1.84)$$

Obecně lze napsat pro  $i = 1, 2, 3$

$$z_i = t_{di} - b_d \quad (1.85)$$

kde  $t_{di}$  je drážková rozteč

$$t_{di} = \frac{\pi \cdot D_i}{Q} \quad (1.86)$$

Pak zdánlivá magnetická indukce ve zvoleném místě bude

$$B'_{zi} = \frac{t_{di} \cdot B_\delta}{z_i \cdot k_{Fe}} \quad (1.87)$$

Zdánlivá magnetická indukce je taková indukce magnetického pole, když předpokládáme, že magnetický tok bude procházet pouze zubem. Avšak při hodnotách sycení větších než cca. 1,6 T klesá relativní permeabilita železa, tím narůstá magnetický odpor, a proto část magnetického toku bude procházet paralelně drážkou, což způsobí pokles skutečné hodnoty magnetické indukce v zubu. S narůstajícím sycením zubu rozdíl mezi zdánlivou a skutečnou hodnotou magnetické indukce v zubu výrazně narůstá. Skutečná magnetická indukce  $B_{zi}$  se zjišťuje ze zdánlivé magnetické indukce  $B'_{zi}$  z nomogramu pro příslušný materiál pomocí tzv. koeficientu odlehčení, který je dán poměrem mezi kolmými průřezy drážky a zubu.

$$k_{zi} = \frac{S_d}{S_z} = \frac{b_d \cdot l_e}{z_i \cdot l_e \cdot k_{Fe}} = \frac{t_{di} \cdot l_e - z_i \cdot l_e \cdot k_{Fe}}{z_i \cdot l_e \cdot k_{Fe}} = \frac{t_{di}}{z_i \cdot k_{Fe}} - 1 \quad (1.88)$$

Pro takto získané hodnoty magnetických indukcí  $B_{z1}$ ,  $B_{z2}$ ,  $B_{z3}$  určíme pomocí magnetizační charakteristiky materiálu zubů velikosti intenzity magnetického pole  $H_{z1}$ ,  $H_{z2}$ ,  $H_{z3}$ . Za předpokladu parabolického průběhu intenzity magnetického pole podél výšky zubu stanovím střední hodnotu intenzity magnetického pole podle Simpsonova pravidla.

$$H_{zstř} = \frac{H_{z1} + 4 \cdot H_{z2} + H_{z3}}{6} \quad (1.89)$$

Pak velikost magnetického napětí zubu bude

$$F_z = H_{zstř} \cdot l_z \quad (1.90)$$

Vypočtené hodnoty magnetizační charakteristiky zubové vrstvy statoru získané pomocí výše uvedeného postupu, magnetizační charakteristiky statorových plechů (Příloha č. 5) a

nomogramu k určení skutečné magnetické indukce v zubech statoru (Příloha č. 6) jsou uvedeny v *Tab. 1.5*.

i	$D_i$ [mm]	$t_{di}$ [mm]	$z_i$ [mm]	$k_{zi}$ [-]	$B'_{zi}$ [T]	$B_{zi}$ [T]	$H_{zi}$ [ $A \cdot m^{-1}$ ]	$H_{zstř}$ [ $A \cdot m^{-1}$ ]	$F_z$ [A]
1	913	47,8	28,3	0,84	1,69	1,68	5250	2392	378
2	1071	56,08	36,58	0,67	1,53	1,53	2000		
3	1229	64,35	44,85	0,56	1,43	1,43	1100		

*Tab. 1.5 Magnetizační charakteristika zubové vrstvy statoru*

V širokém zubu rotoru (pólu) nastává obdobná situace jako v zubech statoru. Opět budu počítat šířku zubu na třech průměrech. Šířku zubu  $z_{p1}$  na vnějším průměru rotoru

$$D_{r1} = D_r \quad (1.91)$$

šířku zubu  $z_{p2}$  na průměru

$$D_{r2} = D_{r1} - h_p \quad (1.92)$$

procházejícím středem výšky širokého zubu a šířku zubu  $z_{p3}$  na průměru patní kružnice širokého zubu

$$D_{r3} = D_{r1} - 2 \cdot h_p \quad (1.93)$$

kde  $h_p$  je výška širokého zubu rotoru, která je totožná s hloubkou první rotorové drážky vedle širokého zubu  $h_{r1}$ . Obecně lze napsat pro  $i = 1, 2, 3$  při úvaze, že široký zub bude pokrývat 1/3 obvodu rotoru

$$z_{pi} = \frac{\pi \cdot D_{ri}}{6} \quad (1.94)$$

pak magnetická indukce ve zvoleném místě bude

$$B_{pi} = \frac{(1 + \gamma_\sigma) \cdot \Phi}{z_{pi} \cdot L_r} \quad (1.95)$$

kde

$$L_r = L + 0,04 = 2,807 + 0,04 = 2,847 \text{ m} \quad (1.96)$$

je délka rotoru proti délce plechového svazku zvětšená s ohledem na zkušenosti z již provedených strojů.

Pro takto získané hodnoty magnetických indukcí  $B_{p1}$ ,  $B_{p2}$ ,  $B_{p3}$  určím pomocí magnetizační charakteristiky materiálu rotoru velikosti intenzit magnetického pole  $H_{p1}$ ,  $H_{p2}$ ,  $H_{p3}$ . Za předpokladu parabolického průběhu intenzity magnetického pole podél výšky

širokého zubu stanovím střední hodnotu intenzity magnetického pole podle Simpsonova pravidla.

$$H_{pstr} = \frac{H_{p1} + 4 \cdot H_{p2} + H_{p3}}{6} \quad (1.97)$$

Pak velikost magnetického napětí širokého zubu bude

$$F_p = H_{pstr} \cdot l_p \quad (1.98)$$

Vypočtené hodnoty magnetizační charakteristiky širokého zubu rotoru (pólu) získané pomocí výše uvedeného postupu a magnetizační charakteristiky konstrukční oceli (Příloha č. 7) jsou uvedeny v *Tab. 1.6*.

i	$D_{ri}$ [mm]	$z_{pi}$ [mm]	$B_{pi}$ [T]	$H_{pi}$ [ $A \cdot m^{-1}$ ]	$H_{pstr}$ [ $A \cdot m^{-1}$ ]	$F_p$ [A]
1	852	446	1,68	6500	121083	18162
2	702	368	2,03	50000		
3	552	289	2,59	520000		

*Tab. 1.6 Magnetizační charakteristika širokého zubu (pólu)*

Magnetická indukce v jhu rotoru

$$B_{jr} = \frac{(1 + \gamma_\sigma) \cdot \Phi}{S_{jr}} = \frac{(1 + \gamma_\sigma) \cdot \Phi}{h_{jr} \cdot L_r} = \frac{(1 + 0,08) \cdot 1,973}{0,552 \cdot 2,847} = 1,36T \quad (1.99)$$

Celkový výpočet charakteristiky naprázdno je proveden v *Tab. 1.7*. Jsou zde použity vypočtené hodnoty uvedené výše doplněné o hodnoty pro

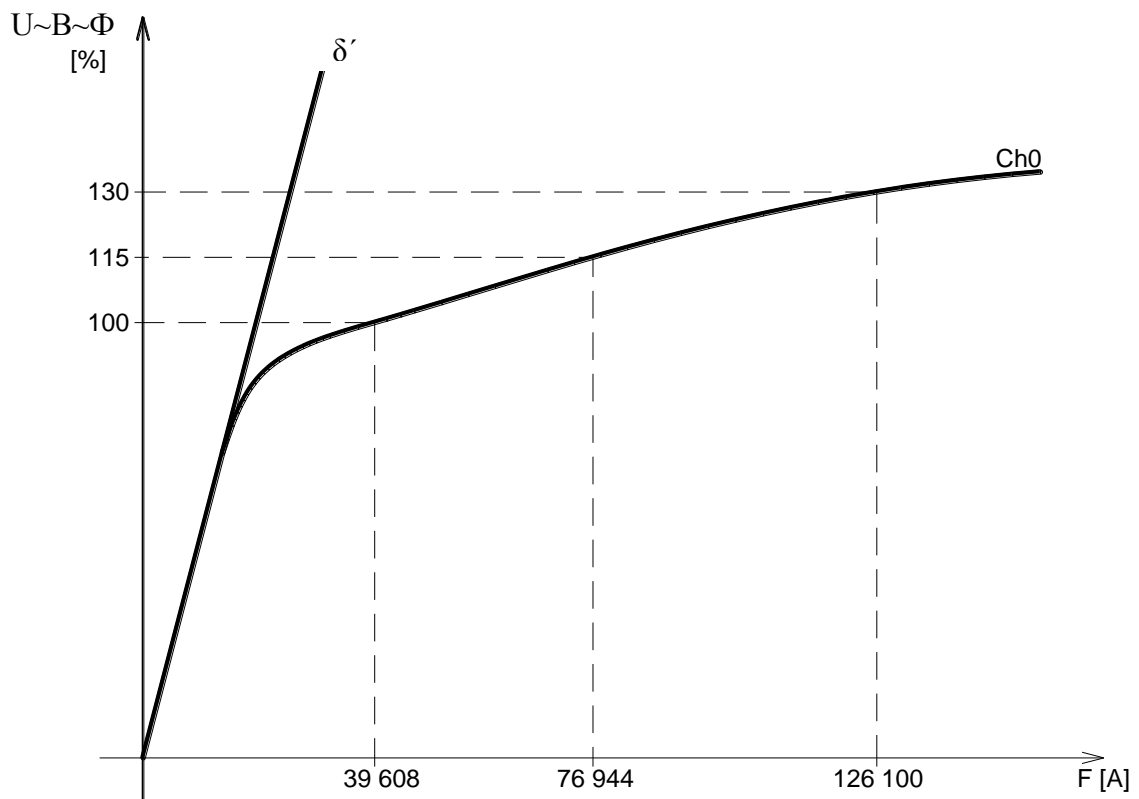
$$U = k_i \cdot U_n \quad (1.100)$$

kde  $k_1 = 1,15$  a  $k_2 = 1,3$ .

Charakteristika naprázdno je graficky znázorněna na *Obr. 1.3*.

B [T], H [A·m <sup>-1</sup> ], F [A]				Φ			k <sub>1</sub> ·Φ			k <sub>2</sub> ·Φ		
				B	H	F	B	H	F	B	H	F
Vzd. mezera		δ = 0,0305 m		0,92		19530			22460			25389
Zuby	Hlava	k <sub>z1</sub> = 0,84	B' <sub>z1</sub>	1,69	5250		1,94	18000		2,2	44000	
			B <sub>z1</sub>	1,68			1,91			2,1		
	Střed	k <sub>z2</sub> = 0,67	B' <sub>z2</sub>	1,53	2000		1,76	8750		1,99	21500	
			B <sub>z2</sub>	1,53			1,75			1,95		
	Pata	k <sub>z3</sub> = 0,56	B' <sub>z3</sub>	1,43	1100		1,64	4400		1,86	14000	
B <sub>z3</sub>			1,43	1,64			1,84					
Stř. hodnota		l <sub>z</sub> = 0,158 m			2392	378		9567	1512		24000	3792
Jádro induktu		l <sub>ji</sub> = 1,517 m		1,3	630	956	1,5	1600	2427	1,69	6000	9102
ΣF = F <sub>δ</sub> + F <sub>z</sub> + F <sub>ji</sub>				20864			26399			38283		
Jho rotoru		l <sub>jr</sub> = 0,276 m		1,36	2110	582	1,56	4424	1221	1,77	12200	3367
Široký zub (pól)	Hlava			1,68	6500		1,93	28960		2,18	210000	
	Střed			2,03	50000		2,33	280000		2,64	552000	
	Pata			2,59	520000		2,98	824000		3,37	960000	
	Stř. hodnota		l <sub>p</sub> = 0,15 m			121083	18162		328827	49324		563000
ΣF = F <sub>p</sub> + F <sub>jr</sub>				18744			50545			87817		
ΣF = F <sub>δ</sub> + F <sub>z</sub> + F <sub>ji</sub> + F <sub>p</sub> + F <sub>jr</sub>				39608			76944			126100		

Tab. 1.7 Magnetizační charakteristika celého magnetického obvodu

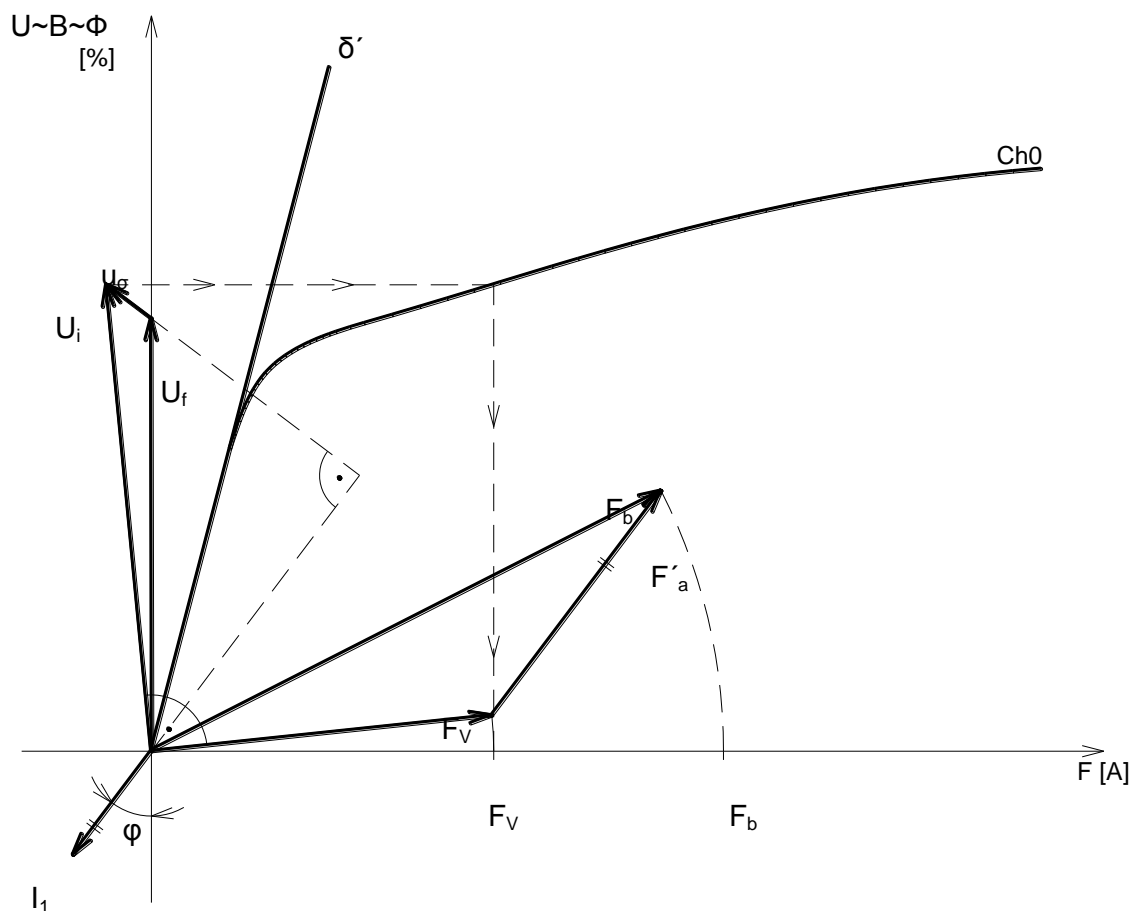


Obr. 1.3 Charakteristika naprázdno

## 1.5 Návrh budícího vinutí

Budící vinutí musí vytvořit tak velké magnetické napětí  $F_b$ , aby po demagnetizačním účinku magnetického napětí reakce kotvy  $F'_a$  byl výsledným magnetickým napětím  $F_v$  vybuzen magnetický tok  $\Phi$ , který indukuje vnitřní elektrické napětí  $U_i$  a po odečtení úbytků napětí na činném odporu  $u_R$  a na rozptylové reaktanci  $u_\sigma$  se získalo požadované svorkové napětí  $U_f$ .

Na Obr. 1.4 je uveden grafický postup určení budícího magnetického napětí  $F_b$ , kde je respektován pouze úbytek napětí na rozptylové reaktanci  $u_\sigma$ , jelikož úbytek napětí na činném odporu  $u_R$  je zanedbatelný. Úbytek na rozptylové reaktanci  $u_\sigma$  se přičte k jmenovitému fázovému napětí  $U_f$ , jak je patrné z uvedeného obr. Tím se získá vnitřní indukované napětí  $U_i$  ve vinutí induktu. Z důvodů pohodlnějšího kreslení je fázorový diagram magnetických napětí pootočen o  $90^\circ$  doprava. Ve směru proudu  $I_1$  se přičte k fázoru  $F_v$  fázor  $F'_a$ , tímto geometrickým součtem se získá výsledné budící magnetické napětí  $F_b$ .



Obr. 1.4 Grafické určení budícího magnetického napětí



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

$$F_b = 96\,000\text{ A} \quad (1.101)$$

Průřez budícího vinutí se určuje z úbytku napětí na činném odporu budících cívek

$$S'_{Cub} = \rho_{Cu} \cdot \frac{2p \cdot l_{bs} \cdot F_b}{U_b} = \frac{1}{56} \cdot \frac{2 \cdot 7,702 \cdot 96\,000}{150} = 176,05\text{ mm}^2 \quad (1.102)$$

kde  $U_b = 150\text{ V}$  je zvolené budící napětí,

$$l_{bs} = 2 \cdot (L_r + l_{cr}) = 2 \cdot (2,847 + 1,004) = 7,702\text{ m} \quad (1.103)$$

je odhadnutá délka budící cívky, kde

$$l_{cr} \cong 0,7 \cdot t_p = 0,7 \cdot 1,434 = 1,004\text{ m} \quad (1.104)$$

je odhadnutá délka čela budícího vinutí.

Průřez vodiče budící cívky volím nejbližší vyšší z obvykle používaných průřezů vodičů. Větší průřez vodiče volím proto, aby vznikla určitá rezerva potřebného budícího napětí. Zde má vodič rozměry  $6,4 \times 37\text{ mm}$  a jemu odpovídající průřez je  $S_{Cub} = 235,12\text{ mm}^2$ .

Volím proudovou hustotu budícího vinutí

$$\sigma_{Cub} = 5\text{ A} \cdot \text{mm}^{-2} \quad (1.105)$$

Budící proud

$$I_b = \sigma_{Cub} \cdot S_{Cub} = 5 \cdot 235,12 = 1175,6\text{ A} \quad (1.106)$$

Počet závitů budící cívky

$$N_b = \frac{F_b}{I_b} = \frac{96\,000}{1175,6} = 82 \quad (1.107)$$

Při zvoleném dělení rotorových drážek  $1/24$  obvodu rotoru, bude na jeden pól vycházet 12 drážek bez uvažování širokého zubu. Pokud široký zub má pokrývat  $1/3$  pólu, pak na něj vychází  $4/24$  ( $1/6$ ) obvodu rotoru ( $1/3$  obvodu rotoru na dva široké zuby) a na jeden pól pak bude 8 navinutých drážek ( $12 - 4 = 8$ ).

V návrhu rotoru jsem předpokládal první drážku vedle širokého zubu méně hlubokou než ostatní drážky. Tomu také odpovídá rozložení závitů budící cívky. Do první drážky vedle širokého zubu se vloží 16 závitů a do zbylých třech drážek 22 závitů. Počty závitů v jednotlivých drážkách jsem zvolil tak, aby odpovídaly vypočtenému celkovému počtu závitů budící cívky ( $16 + 3 \cdot 22 = 82$ ).

V *Tab. 1.8* jsou uvedeny výsledné rozměry rotorových drážek, uspořádání vodičů budícího vinutí v rotorových drážkách a jejich izolace.

Položka	Šířka		Hloubka			
			1. drážka		ostatní drážky	
Izolace proti železu	0,76·2	1,52		0,76		0,76
Izolace mezi závity	-	-	0,36·15	5,4	0,36·21	7,56
∑ izolace		1,52		6,16		8,32
Holý vodič		37	6,4·16	102,4	6,4·22	140,8
Vložka na dno	-	-		4		4
Vložka pod klín	-	-		9		9
Vůle	0,24·2	0,48		0,44		0,38
Hloubka drážky bez klínu	-	-		122		162,5
Klín + můstek	-	-		22,5		22,5
<b>Konečný rozměr drážky</b>	<b>b<sub>r</sub></b>	<b>39</b>	<b>h<sub>r1</sub></b>	<b>144,5</b>	<b>h<sub>r2</sub></b>	<b>185</b>

Tab. 1.8 Uspořádání vodičů a izolace v rotorových drážkách

Elektrický odpor budícího vinutí při 20 °C

$$R_{b/20} = \rho_{Cu} \cdot \frac{l_{bs} \cdot N_b \cdot 2p}{S_{Cub}} = \frac{1}{56} \cdot \frac{7,702 \cdot 82 \cdot 2}{235,12} = 0,0959 \Omega \quad (1.108)$$

Elektrický odpor budícího vinutí při 75 °C

$$R_{b/75} = 1,22 \cdot R_{b/20} = 1,22 \cdot 0,0959 = 0,117 \Omega \quad (1.109)$$

## 1.6 Kroužky a kartáče

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

$$\text{Přechodové napětí} \quad u_{př} = 2,1V$$

$$\text{Maximální proudové zatížení} \quad \sigma_k = 10 A \cdot cm^{-2}$$

$$\text{Měrný tlak} \quad p_k = 18 kPa$$

$$\text{Součinitel tření} \quad \mu = 0,15$$

Celkový průřez kartáčů jedné polaroty

$$S_k = \frac{I_b}{\sigma_k} = \frac{1175,6}{10} = 117,56 cm^2 \quad (1.110)$$

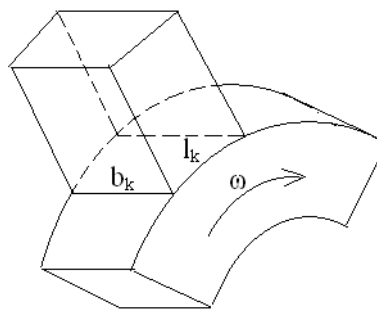
Podle doporučených rozměrů kartáčů (viz Tab. 1.9) volím rozměr  $b_k \times l_k = 50 \times 40 mm$  a tomu odpovídá průřez

$$S_{kl} = b_k \cdot l_k = 50 \cdot 40 = 2000 mm^2 = 20 cm^2 \quad (1.111)$$

kde  $b_k$  je rozměr v osové směru stroje a určuje šířku kroužku a  $l_k$  je rozměr v obvodovém směru (viz Obr. 1.5).

[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. 1.9 Doporučené rozměry kartáčů [1]



Obr. 1.5 Schematické znázornění rozměrů kartáče [1]

Počet kartáčů jedné polaritě na obvodu kroužku

$$i_k = \frac{S_k}{S_{k1}} = \frac{117,56}{20} = 5,88 \quad (1.112)$$

Volím počet kartáčů  $i_k = 6$  a počet kartáčů obou polarit je tedy  $2i_k = 12$ .

Je třeba zkontrolovat, zda se tento počet kartáčů (včetně pouzdra kartáčových držáků) na obvod kroužků vejde.

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

$$d_H = 0,135 \cdot \sqrt[3]{\frac{P_{kW}}{n}} = 0,135 \cdot \sqrt[3]{\frac{40000}{3000}} = 0,32 \text{ m} \quad (1.113)$$

Vnější průměr kroužků budu předpokládat

$$D_k = 1,3d_H = 1,3 \cdot 0,32 = 0,416 \text{ m} \quad (1.114)$$

Rozteč kartáčů

$$t_k = \frac{\pi \cdot D_k}{2i_k} = \frac{\pi \cdot 0,416}{12} = 0,109 \text{ m} \quad (1.115)$$

Rozteč kartáčů  $t_k$  je výrazně větší než je délka kartáče  $l_k$ , z toho lze usoudit, že po této stránce je návrh vyhovující.

Obvodová rychlost kroužků

$$v_k = \frac{\pi \cdot D_k \cdot n_{\max}}{60} = \frac{\pi \cdot 0,416 \cdot 3600}{60} = 78,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (1.116)$$

## 1.7 Ztráty a účinnost

### 1.7.1 Ztráty

#### Jouleovy

Ve vinutí statoru

$$\Delta P_{Cu1} = m \cdot R_{1/75} \cdot I_1^2 = 3 \cdot 5,49 \cdot 10^{-3} \cdot 2749^2 = 124\,464 \text{ W} \quad (1.117)$$

V budícím vinutí

$$\Delta P_{Cub} = R_{b/75} \cdot I_b^2 = 0,117 \cdot 1175,6^2 = 161\,698 \text{ W} \quad (1.118)$$

#### V železe

V jádře statoru:

Ztrátové číslo plechů  $\Delta p_{Fe} = 1,8 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$

Hmotnost jádra statoru

$$\begin{aligned} m_{Fej} &= \frac{\pi}{4} \cdot (D_e^2 - D_3^2) \cdot l_e \cdot k_{Fe} \cdot \rho_{Fe} = \\ &= \frac{\pi}{4} \cdot (1,931^2 - 1,229^2) \cdot 2,347 \cdot 0,92 \cdot 7800 = 29343 \text{ kg} \end{aligned} \quad (1.119)$$

Ztráty v jádře statoru

$$\begin{aligned} \Delta P_{Fej} &= 1,8 \cdot \Delta p_{Fe} \cdot B_{js}^2 \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} \cdot m_{Fej} = \\ &= 1,8 \cdot 1,8 \cdot 1,3^2 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1,3} \cdot 29343 = 160671 \text{ W} \end{aligned} \quad (1.120)$$

V zubech statoru:

Hmotnost zubů statoru

$$\begin{aligned} m_{Fez} &= Q \cdot z_2 \cdot h_d \cdot l_e \cdot k_{Fe} \cdot \rho_{Fe} = \\ &= 60 \cdot 0,03658 \cdot 0,158 \cdot 2,347 \cdot 0,92 \cdot 7800 = 5840 \text{ kg} \end{aligned} \quad (1.121)$$

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

Ztráty v zubech statoru

$$\begin{aligned} \Delta P_{Fez} &= 2 \cdot \Delta p_{Fe} \cdot B_{z2}^2 \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} \cdot m_{Fez} = \\ &= 2 \cdot 1,8 \cdot 1,53^2 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1,3} \cdot 5840 = 49215 \text{ W} \end{aligned} \quad (1.122)$$

kde  $B_{z2}$  je magnetická indukce ve středu zubu (viz výpočet zubové vrstvy charakteristiky naprázdno)

**Povrchové [3]**

$$\begin{aligned} \Delta P_p &= \frac{2}{3} \cdot \frac{\pi}{2} \cdot D_r \cdot L_r \cdot k_0 \cdot \left(\frac{Q \cdot n}{10000}\right)^{1,5} \cdot (t_{d1} \cdot \beta \cdot 1000 \cdot B_\delta \cdot k_c)^2 = \\ &= \frac{2}{3} \cdot \frac{\pi}{2} \cdot 0,852 \cdot 2,847 \cdot 23,3 \cdot \left(\frac{60 \cdot 3000}{10000}\right)^{1,5} \cdot \\ &\cdot (0,0478 \cdot 0,025 \cdot 1000 \cdot 0,92 \cdot 0,87)^2 = 4135 \text{ W} \end{aligned} \quad (1.123)$$

kde  $k_0 = 23,3$  a  $\beta = 0,025$  jsou činitelé povrchových ztrát pro masivní ocel (viz Příloha č. 8)

a  $k_c$  je Carterův činitel

**Mechanické [3]**

$$\Delta P_m = A_m \cdot v^{2,5} \cdot D_r \cdot \sqrt{l_r} = 0,7 \cdot 133,83^{2,5} \cdot 0,852 \cdot \sqrt{2,847} = 208504 \text{ W} \quad (1.124)$$

kde

$$v = \frac{\pi \cdot D_r \cdot n}{60} = \frac{\pi \cdot 0,852 \cdot 3000}{60} = 133,83 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (1.125)$$

je obvodová rychlost rotoru a  $A_m = 0,7$  je koeficient mechanických ztrát

**Přídavné**

Odhadují se jako 0,3 % ze zdánlivého výkonu.

$$\Delta P_{přř} = 0,003 \cdot S = 0,003 \cdot 50 \cdot 10^6 = 150000 \text{ W} \quad (1.126)$$

**Celkové**

$$\begin{aligned}\Delta P &= \Delta P_{Cu1} + \Delta P_{Cub} + \Delta P_{Fej} + \Delta P_{Fez} + \Delta P_p + \Delta P_m + \Delta P_{přř} = \\ &= 124464 + 161698 + 160671 + 49215 + 4135 + 208504 + 150000 = \\ &= 858687W\end{aligned}\tag{1.127}$$

**1.7.2 Účinnost**

Účinnost při ustáleném stavu pro jmenovitý výkon a účinník

$$\eta = \frac{P}{P + \Delta P} \cdot 100 = \frac{40 \cdot 10^6}{40 \cdot 10^6 + 858687} \cdot 100 = 97,9\%\tag{1.128}$$

## 2 Tepelný výpočet

Cílem tepelného výpočtu je určení střední, případně i maximální oteplení vybraných částí elektrického 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 např. větší rozměry, hmotnost a zpravidla i vyšší cenu.

Izolační materiály jsou podle tepelné odolnosti zařazeny do jednotlivých tříd, jak je uvedeno v následující tabulce.

Třída	Max. teplota [°C]	Max. oteplení [°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, asphalt,...)
F	155	105	Anorganické látky spojované většinou syntetickými laky a pryskyřicemi
H	180	130	Anorganické láky s pojivy na bázi silikonových laků a pryskyřic
C	Nad 180	Nad 130	Anorganické látky (slída, sklo, porcelán, ...)

Tab. 2.1 Tepelné třídy izolačních materiálů [2]

Oteplení je rozdíl teploty dané části stroje a teploty okolí. ČSN předepisuje teplotu okolí  $\vartheta_0 = 40^\circ\text{C}$ . Při výpočtech oteplení určité části stroje se udává teplota okolí  $\vartheta_0 = 0^\circ\text{C}$ . Získaná hodnota oteplení  $\Delta\vartheta$  se porovnává s doporučenou hodnotou použité izolace.

### 2.1 Určení náhradní tepelné sítě

Tepelný výpočet elektrického stroje vychází z údajů a konstant, které v mnohých případech nelze přesně stanovit, protože jsou závislé nejen na vlastnostech použitých materiálů, ale i na technologickém zpracování a konstrukčním uspořádání. Jedná se např. o součinitele tepelné vodivosti, součinitele přestupu tepla, velikost a lokalizace místa vzniku uvažovaných ztrát.

Šíření tepla probíhá trojrozměrně, jelikož v tomto rozložení nelze řešit tepelné toky analyticky, převádí se trojrozměrné šíření tepla na jednorozměrné, zavedením tzv. náhradní tepelné sítě.

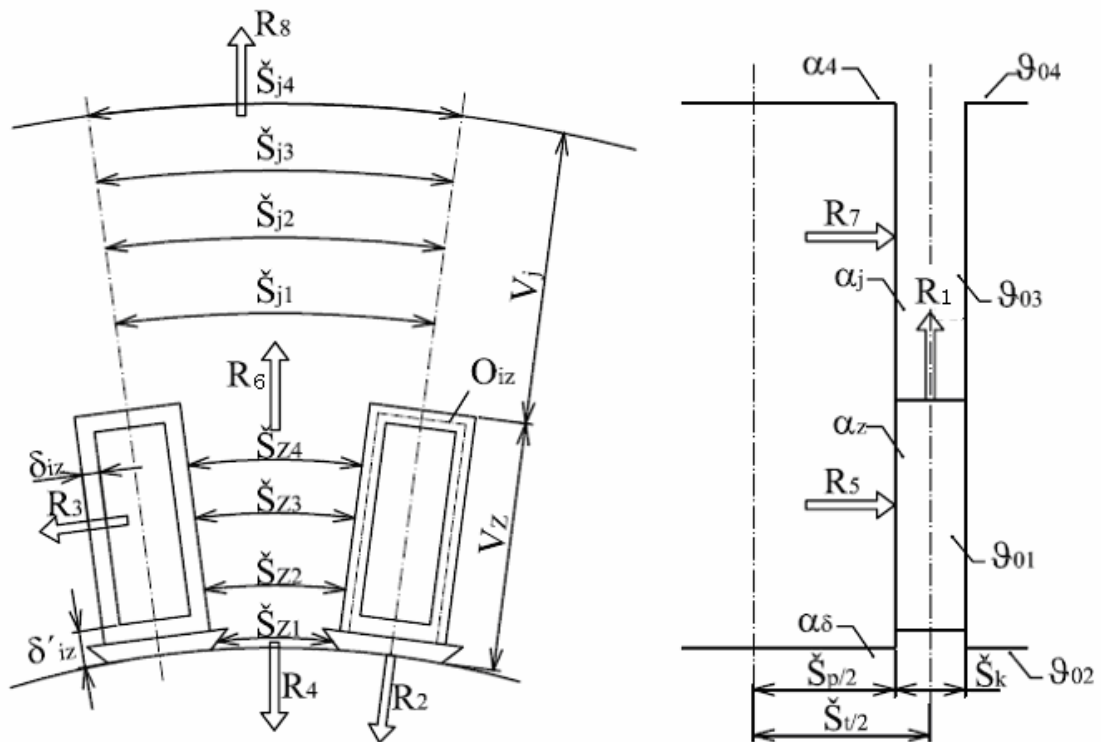
Při řešení náhradní tepelné sítě se využívá analogie s elektrickými obvody, tzn., že se předpokládá ekvivalentní chování tepelného a elektrického obvodu, a proto lze s výhodou na tepelné obvody aplikovat obdobné zákony jako na obvody elektrické (především Ohmův zákon a Kirchhoffovy zákony).

## 2.2 Výpočet oteplení induktu

Z celého induktu se vymezí co nejmenší úsek tak, aby u všech ostatních byly stejné tepelné a chladicí podmínky. Bude se jednat o úsek příslušný jedné drážkové rozteči a polovině rozteče radiálního chladicího kanálu, jak je znázorněno na *Obr. 2.1*. Při tomto výběru se musí určit ztráty, které ve vymezeném úseku vznikají. [2]

V tomto výpočtu se neuvažuje tepelné spojení mezi drážkovou částí vinutí a čely vinutí. Výpočet oteplení čel vinutí se provádí samostatně, a pokud je větší rozdíl teplot mezi drážkovou částí vinutí a čely, je třeba volit jiný postup, kdy se uvažuje mimo jiné i šíření tepla ve vodičích mezi drážkovou částí a čely. [2]

Postup výpočtu oteplení induktu je převzat z [2].



Obr. 2.1 Vymezený úsek induktu stroje [2]



### 2.2.1 Určení ztrát v uvažovaném úseku

Ztráty v drážkové části vinutí

$$\Delta P_{Cud} = \Delta P_{Cu1} \cdot \frac{l_d}{l_v} = 124\,464 \cdot \frac{2,807}{4,605} = 75\,868 \text{ W} \quad (2.1)$$

kde  $l_d = L = 2,807 \text{ m}$  je délka vodiče v drážkové části induktu

Ztráty v čelech vinutí

$$\Delta P_{Cu\check{c}} = \Delta P_{Cu1} \cdot \frac{l_{\check{c}}}{l_v} = 124\,464 \cdot \frac{1,798}{4,605} = 48\,596 \text{ W} \quad (2.2)$$

Ztráty ve vymezeném úseku:

Vinutí

$$\Delta P_{Cud1} = \frac{\Delta P_{Cud}}{2 \cdot Q_c \cdot i} = \frac{75\,868}{2 \cdot 60 \cdot 47} = 13,452 \text{ W} \quad (2.3)$$

Zub

$$\Delta P_{Fez1} = \frac{\Delta P_{Fez}}{2 \cdot Q_c \cdot i} = \frac{49\,215}{2 \cdot 60 \cdot 47} = 8,726 \text{ W} \quad (2.4)$$

Jádro induktu

$$\Delta P_{Fej1} = \frac{\Delta P_{Fej}}{2 \cdot Q_c \cdot i} = \frac{160\,671}{2 \cdot 60 \cdot 47} = 28,488 \text{ W} \quad (2.5)$$

kde  $Q_c$  je počet čel, který je stejný jako počet drážek induktu  $Q$  a  $i$  je počet paketů

### 2.2.2 Výpočet tepelných odporů

Velikosti jednotlivých tepelných odporů jsou vypočteny v souladu s *Obr. 2.1*.

Z vinutí do ventilačního kanálu

$$\begin{aligned} R_1 &= \frac{\delta_{iz}}{\lambda_{iz} \cdot O_{iz} \cdot \frac{\check{s}_k}{2}} + \frac{\delta_{vzd}}{\lambda_{vzd} \cdot O_{iz} \cdot \frac{\check{s}_k}{2}} + \frac{1}{\alpha_z \cdot O_{iz} \cdot \frac{\check{s}_k}{2}} = \\ &= \frac{4,08 \cdot 10^{-3}}{0,2 \cdot 307,34 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{10 \cdot 10^{-3}}{2}} + \frac{0,0001}{0,026 \cdot 307,34 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{10 \cdot 10^{-3}}{2}} + \\ &+ \frac{1}{160 \cdot 307,34 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{10 \cdot 10^{-3}}{2}} = 19,845 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1} \end{aligned} \quad (2.6)$$

Z vinutí do vzduchové mezery

$$\begin{aligned}
 R_2 &= \frac{\delta_{iz}}{\lambda_{iz} \cdot \check{s}_d \cdot \frac{\check{s}_t}{2}} + \frac{\delta_{vzd}}{\lambda_{vzd} \cdot \check{s}_d \cdot \frac{\check{s}_t}{2}} + \frac{1}{\alpha_\delta \cdot \check{s}_d \cdot \frac{\check{s}_t}{2}} = \\
 &= \frac{4,08 \cdot 10^{-3}}{0,2 \cdot 19,5 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{60 \cdot 10^{-3}}{2}} + \frac{0,0001}{0,026 \cdot 19,5 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{60 \cdot 10^{-3}}{2}} + \\
 &+ \frac{1}{160 \cdot 19,5 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{60 \cdot 10^{-3}}{2}} = 52,13 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}
 \end{aligned} \tag{2.7}$$

Z vinutí do zubu

$$\begin{aligned}
 R_3 &= \frac{\delta_{iz}}{\lambda_{iz} \cdot O_{iz} \cdot \frac{\check{s}_p}{2}} + \frac{\delta_{vzd}}{\lambda_{vzd} \cdot O_{iz} \cdot \frac{\check{s}_p}{2}} + \frac{\frac{\check{s}_{z3}}{2}}{3 \cdot \lambda_{Fel} \cdot O_{iz} \cdot \frac{\check{s}_p}{2}} = \\
 &= \frac{4,08 \cdot 10^{-3}}{0,2 \cdot 307,34 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{50 \cdot 10^{-3}}{2}} + \frac{0,0001}{0,026 \cdot 307,34 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{50 \cdot 10^{-3}}{2}} + \\
 &+ \frac{36,58 \cdot 10^{-3}}{2} = 3,175 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}
 \end{aligned} \tag{2.8}$$

Ze zubu do vzduchové mezery

$$\begin{aligned}
 R_4 &= \frac{\frac{v_z}{2}}{3 \cdot \lambda_{Fel} \cdot \check{s}_{z2} \cdot \frac{\check{s}_p}{2}} + \frac{1}{\alpha_\delta \cdot \check{s}_{z1} \cdot \frac{\check{s}_p}{2}} = \\
 &= \frac{158 \cdot 10^{-3}}{2} + \frac{1}{160 \cdot 28,3 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{50 \cdot 10^{-3}}{2}} = 9,646 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}
 \end{aligned} \tag{2.9}$$

Ze zuby do ventilačního kanálu

$$\begin{aligned}
 R_5 &= \frac{\frac{\check{s}_p}{2}}{3 \cdot \lambda_{Feq} \cdot \check{s}_{z3} \cdot v_z} + \frac{1}{\alpha_z \cdot \check{s}_{z3} \cdot v_z} = \\
 &= \frac{50 \cdot 10^{-3}}{2} + \frac{1}{160 \cdot 36,58 \cdot 10^{-3} \cdot 158 \cdot 10^{-3}} = 2,523 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1} \quad (2.10)
 \end{aligned}$$

Z plechů zuby do plechů jádra

$$\begin{aligned}
 R_6 &= \frac{\frac{v_z}{2}}{3 \cdot \lambda_{Fel} \cdot \check{s}_{z4} \cdot \frac{\check{s}_p}{2}} + \frac{\frac{v_j}{2}}{3 \cdot \lambda_{Fel} \cdot \check{s}_{j1} \cdot \frac{\check{s}_p}{2}} = \\
 &= \frac{158 \cdot 10^{-3}}{2} + \frac{351 \cdot 10^{-3}}{2} = 1,442 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1} \quad (2.11)
 \end{aligned}$$

Z plechů jádra do ventilačního kanálu

$$\begin{aligned}
 R_7 &= \frac{\frac{\check{s}_p}{2}}{3 \cdot \lambda_{Feq} \cdot \check{s}_{j2} \cdot v_j} + \frac{1}{\alpha_j \cdot \check{s}_{j2} \cdot v_j} = \\
 &= \frac{50 \cdot 10^{-3}}{2} + \frac{1}{100 \cdot 82,73 \cdot 10^{-3} \cdot 351 \cdot 10^{-3}} = 0,631 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1} \quad (2.12)
 \end{aligned}$$

Z plechů jádra na vnější obvod statoru

$$\begin{aligned}
 R_8 &= \frac{\frac{v_j}{2}}{3 \cdot \lambda_{Fel} \cdot \check{s}_{j3} \cdot \frac{\check{s}_p}{2}} + \frac{1}{\alpha_4 \cdot \check{s}_{j4} \cdot \frac{\check{s}_p}{2}} = \\
 &= \frac{351 \cdot 10^{-3}}{2} + \frac{1}{70 \cdot 101,11 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{50 \cdot 10^{-3}}{2}} = 6,288 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1} \quad (2.13)
 \end{aligned}$$

kde

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

je součet vzduchových vrstviček mezi vrstvami izolace závislá na celkové tloušťce izolace a technologickém postupu,

$$\lambda_{iz} = 0,2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

je měrná tepelná vodivost izolace,

$$\lambda_{vzd} = 0,026 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

je měrná tepelná vodivost vzduchu,

$$\lambda_{Fel} = 40 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

je měrná tepelná vodivost plechového svazku v radiálním směru stroje,

$$\lambda_{Feq} = 1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

je měrná tepelná vodivost plechového svazku v axiálním směru stroje,

$$\alpha_{\delta}, \alpha_z, \alpha_j, \alpha_4 [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$$

jsou součinitelé přestupu tepla v daném místě (viz *Obr. 2.1*), které závisí hlavně na rychlosti proudění vzduchu, zvoleny dle doporučení vedoucího práce,

$$\check{s}_p = 50 \text{ mm}$$

je šířka paketu,

$$\check{s}_t = 60 \text{ mm}$$

je rozteč radiálních ventilačních kanálů

### 2.2.3 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. Při průchodu vzduchu radiálním ventilačním kanálem bude jeho teplota v důsledku přibíraných ztrát z induktu narůstat (*Obr. 2.2*).

Množství vzduchu vstupujícího do statoru

$$Q = \frac{\sum \Delta P}{\rho \cdot c_p \cdot \Delta \vartheta} = \frac{\sum \Delta P}{1250 \cdot 20} = 0,04 \cdot 10^{-3} \sum \Delta P_{[W]} = 0,04 \sum \Delta P_{[kW]} [m^3 \cdot s^{-1}; kW] \quad (2.14)$$

To znamená, že na odvod 1 kW ztrát musí strojem projít  $0,04 \text{ m}^3$  vzduchu za 1 s.

$$Q = 0,04 \sum \Delta P_{[kW]} = 0,04 \cdot 789 = 31,56 m^3 \cdot s^{-1} \quad (2.15)$$

kde

$\Sigma \Delta P$  součet všech ztrát, které se budou chladícím médiem odvádět (celkové ztráty kromě ztrát v ložiskách, jejichž velikost je odhadnuta na jednu třetinu ztrát mechanických, dle doporučení vedoucího práce, ztráty v ložiskách se budou odvádět vlastním chladícím okruhem)

$\rho$  hustota chladícího média [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]

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

$\Delta \mathcal{G}$  oteplení chladícího média, které prošlo strojem, zvoleno  $\Delta \mathcal{G} = 20 \text{ K}$

$c_v$  objemové měrné teplo, pro vzduch  $c_v = \rho \cdot c_p = 1250 \text{ W} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$

Ztráty v rotoru

$$\Delta P_{rot} = \Delta P_{Cub} + \Delta P_p = 161\,698 + 4135 = 165\,833 \text{ W} \quad (2.16)$$

Oteplení chladiva ve vzduchové mezeře

$$\Delta \mathcal{G}_{02} = \mathcal{G}_0 + \frac{\Delta P_{rot}}{c_v \cdot Q} = 0 + \frac{165\,833}{1250 \cdot 31,56} = 4,2 \text{ K} \quad (2.17)$$

Oteplení chladiva v chladícím kanálu v okolí zubu

$$\Delta \mathcal{G}_{01} = \Delta \mathcal{G}_{02} + \frac{\Delta P_{Fez} + \Delta P_{Cud}}{2 \cdot c_v \cdot Q} = 4,2 + \frac{49\,215 + 75\,868}{2 \cdot 1250 \cdot 31,56} = 5,79 \text{ K} \quad (2.18)$$

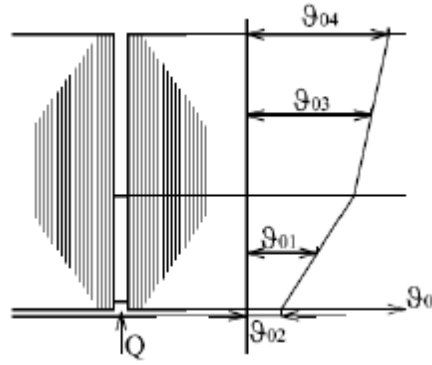
Oteplení chladiva v chladícím kanálu v okolí jádra induktu

$$\begin{aligned} \Delta \mathcal{G}_{03} &= \Delta \mathcal{G}_{02} + \frac{\Delta P_{Fez} + \Delta P_{Cud} + \frac{1}{2} \Delta P_{Fej}}{c_v \cdot Q} = \\ &= 4,2 + \frac{49\,215 + 75\,868 + \frac{1}{2} \cdot 160\,671}{1250 \cdot 31,56} = 9,41 \text{ K} \end{aligned} \quad (2.19)$$

Oteplení chladiva vystupujícího z chladícího kanálu

$$\begin{aligned} \Delta \mathcal{G}_{04} &= \Delta \mathcal{G}_{02} + \frac{\Delta P_{Fez} + \Delta P_{Cud} + \Delta P_{Fej}}{c_v \cdot Q} = \\ &= 4,2 + \frac{49\,215 + 75\,868 + 160\,671}{1250 \cdot 31,56} = 11,4 \text{ K} \end{aligned} \quad (2.20)$$

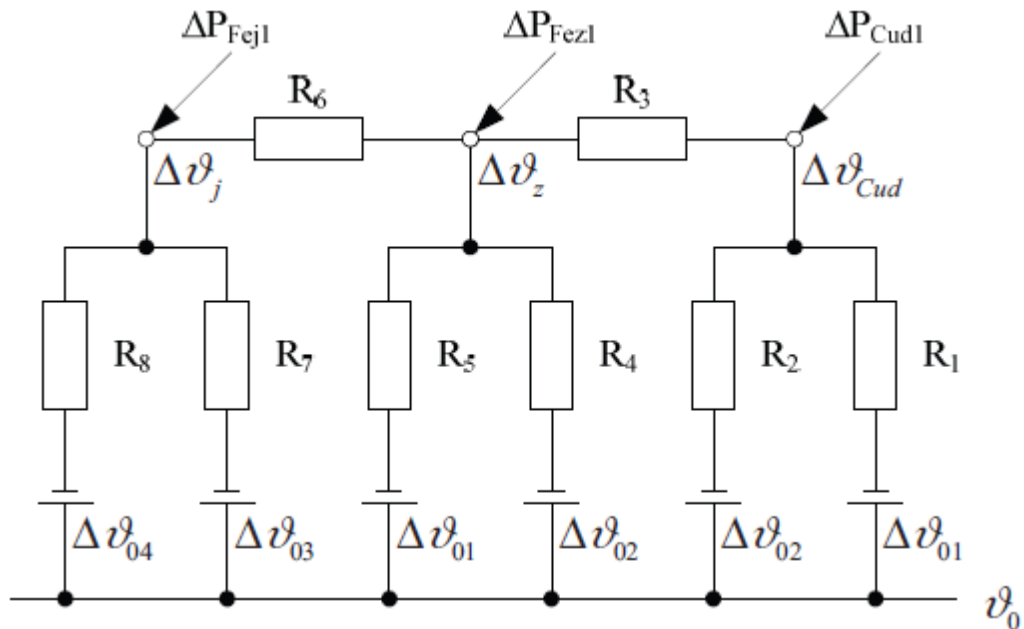
kde  $\mathcal{G}_0$  je teplota chladiva vstupujícího do stroje, počítám oteplení proto  $\mathcal{G}_0 = 0^\circ \text{C}$



Obr. 2.2 Průběh teploty chladiva v radiálním chladícím kanálu [2]

### 2.2.4 Sestavení a řešení náhradního tepelného obvodu vymezeného úseku

Na Obr. 2.3 je nakresleno schéma náhradního tepelného obvodu uvažovaného úseku, které odpovídá Obr. 2.1. Cílem je určit oteplení uzlů  $\Delta\vartheta_{Cud}$ ,  $\Delta\vartheta_z$  a  $\Delta\vartheta_j$ , která představují oteplení jednotlivých částí vymezeného úseku induktu stroje. Jedná se o oteplení vinutí v drážkové části  $\Delta\vartheta_{Cud}$ , oteplení zubu statoru  $\Delta\vartheta_z$  a oteplení jha induktu  $\Delta\vartheta_j$ . Tyto hodnoty ve výpočtu představují neznámé proměnné, když všechny ostatní potřebné hodnoty pro výpočet jsou již známy.



Obr. 2.3 Schéma náhradního tepelného obvodu vymezeného úseku [2]

Při řešení náhradního tepelného obvodu jsem použil metodu uzlových napětí, pomocí které jsem sestavil tři navzájem nezávislé rovnice:

$$\frac{\Delta \mathcal{G}_{Cud} - \Delta \mathcal{G}_{01}}{R_1} + \frac{\Delta \mathcal{G}_{Cud} - \Delta \mathcal{G}_{02}}{R_2} + \frac{\Delta \mathcal{G}_{Cud} - \Delta \mathcal{G}_z}{R_3} = \Delta P_{Cud1} \quad (2.21)$$

$$\frac{\Delta \mathcal{G}_z - \Delta \mathcal{G}_{Cud}}{R_3} + \frac{\Delta \mathcal{G}_z - \Delta \mathcal{G}_{02}}{R_4} + \frac{\Delta \mathcal{G}_z - \Delta \mathcal{G}_{01}}{R_5} + \frac{\Delta \mathcal{G}_z - \Delta \mathcal{G}_j}{R_6} = \Delta P_{Fez1} \quad (2.22)$$

$$\frac{\Delta \mathcal{G}_j - \Delta \mathcal{G}_z}{R_6} + \frac{\Delta \mathcal{G}_j - \Delta \mathcal{G}_{03}}{R_7} + \frac{\Delta \mathcal{G}_j - \Delta \mathcal{G}_{04}}{R_8} = \Delta P_{Fej1} \quad (2.23)$$

Vyřešením této soustavy rovnic jsem určil:

$$\Delta \mathcal{G}_{Cud} = 63,7 \text{ K}$$

$$\Delta \mathcal{G}_z = 33,8 \text{ K}$$

$$\Delta \mathcal{G}_j = 28,2 \text{ K}$$

## 2.2.5 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  $l_\epsilon$  a vnějším obvodu  $O_\epsilon$ .

Ztráty vzniklé v jednom čele

$$\Delta P_{Cu\epsilon 1} = \frac{\Delta P_{Cu\epsilon}}{Q_\epsilon} = \frac{48\,596}{60} = 810 \text{ W} \quad (2.24)$$

kde  $Q_\epsilon$  je počet čel, který bývá zpravidla stejný jako počet drážek induktu  $Q$

Tepelný odpor mezi vodičem čel a okolím

$$\begin{aligned} R_\epsilon &= \frac{\delta_{iz}}{\lambda_{iz} \cdot O_\epsilon \cdot l_\epsilon} + \frac{\delta_{vzd}}{\lambda_{vzd} \cdot O_\epsilon \cdot l_\epsilon} + \frac{1}{\alpha_\epsilon \cdot k \cdot O_\epsilon \cdot l_\epsilon} = \\ &= \frac{4,08 \cdot 10^{-3}}{0,2 \cdot 335 \cdot 10^{-3} \cdot 1,798} + \frac{0,0001}{0,026 \cdot 335 \cdot 10^{-3} \cdot 1,798} + \\ &+ \frac{1}{90 \cdot 0,5 \cdot 335 \cdot 10^{-3} \cdot 1,798} = 0,077 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1} \end{aligned} \quad (2.25)$$

kde

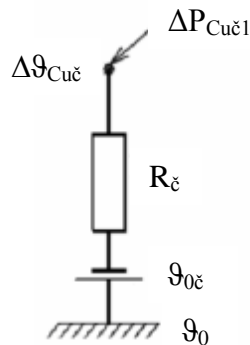
$$\alpha_\epsilon = 90 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

je součinitel přestupu tepla v okolí čel, zvolen dle doporučení vedoucího práce,

$$k = 0,5$$

je činitel zakrytí čel závislý na konstrukčním uspořádání čel, též zvolen dle doporučení vedoucího práce

Schéma náhradního tepelného obvodu čela vinutí je velmi jednoduché, skládá se pouze z jednoho uzlu a jednoho tepelného odporu (*Obr. 2.4*).



*Obr. 2.4 Schéma náhradního tepelného obvodu čela vinutí [2]*

Oteplení čela

$$\Delta \vartheta_{Cuč} = \Delta P_{Cuč1} \cdot R_{\check{c}} + \vartheta_{0\check{c}} = 810 \cdot 0,077 + 0 = 62,4 \text{ K} \quad (2.26)$$

kde  $\vartheta_{0\check{c}} = 0^\circ\text{C}$  je teplota okolí čel

Jelikož není rozdíl oteplení mezi drážkovou částí a čelem vinutí příliš velký, lze určit střední hodnotu oteplení vinutí jako vážený průměr obou oteplení:

$$\Delta \vartheta_{SCu} = \frac{\Delta \vartheta_{Cud} \cdot l_d + \Delta \vartheta_{Cuč} \cdot l_{\check{c}}}{l_d + l_{\check{c}}} = \frac{63,7 \cdot 2,807 + 62,4 \cdot 1,798}{2,807 + 1,798} = 63,2 \text{ K} \quad (2.27)$$

Střední teplota statorového vinutí

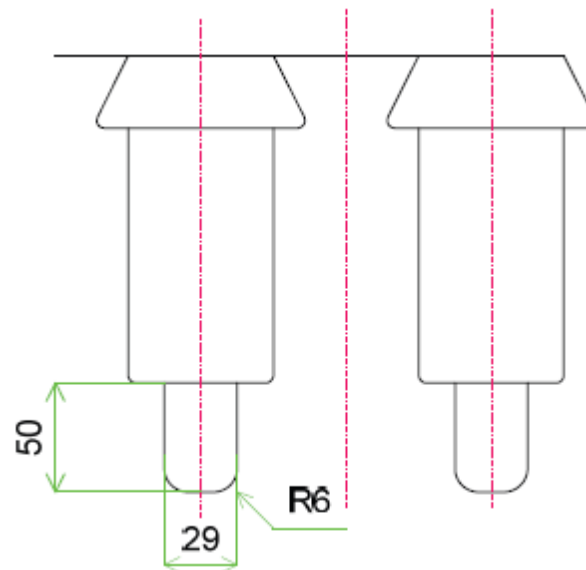
$$\vartheta_{SCu} = \Delta \vartheta_{SCu} + 40 [^\circ\text{C}] = 63,2 + 40 = 103,2^\circ\text{C} \quad (2.28)$$

### 2.3 Výpočet oteplení budícího vinutí

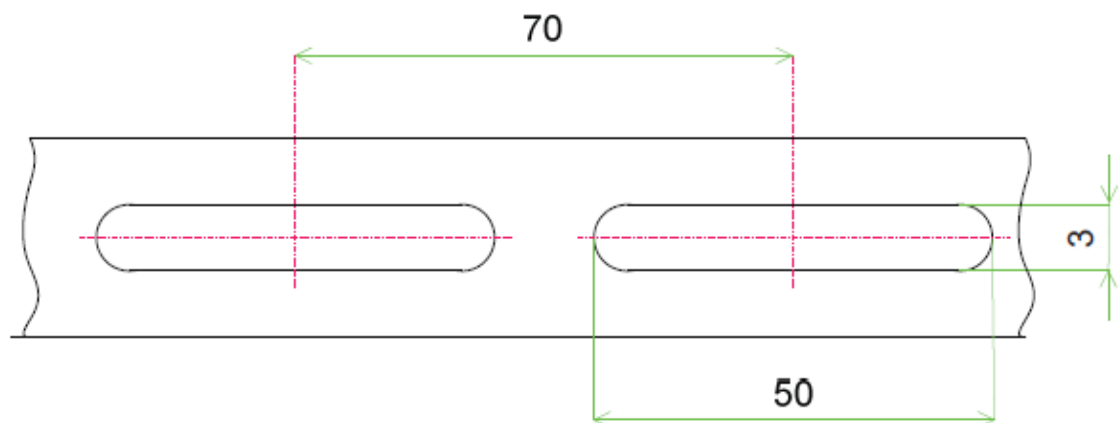
Budící vinutí je chlazeno z ventilačního poddrážkového kanálu, jehož rozměry jsou patrné z *Obr. 2.5*.

Ve vodičích budícího vinutí bude vyraženo 40 otvorů  $50 \times 3$  mm, které budou rozmístěné rovnoměrně po aktivní délce vodiče (viz *Obr. 2.6*). Plocha vyražených otvorů v jedné drážce je  $S_0 = 17,23 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ .





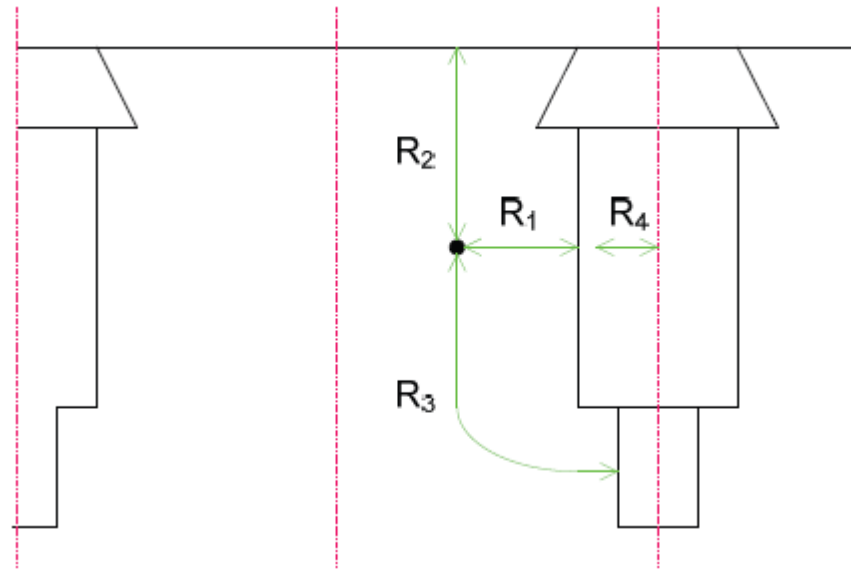
Obr. 2.5 Rozměry ventilačního poddrážkového kanálu budícího vinutí



Obr. 2.6 Rozměry vyražených otvorů ve vodičích budícího vinutí

### 2.3.1 Výpočet tepelných odporů

Tepelné odpory jsou počítány na 1 m délky rotoru, polovinu drážky a polovinu zubu, jelikož předpokládám, že se teplo bude šířit symetricky na obě strany drážky a po celé délce rotoru stejně. Velikosti jednotlivých tepelných odporů jsou vypočteny v souladu s *Obr. 2.7*.



Obr. 2.7 Vymezený úsek rotoru stroje

Z vinutí do zubu

$$\begin{aligned}
 R_1 &= \frac{\delta_{iz}}{\lambda_{iz} \cdot S_{iz}} + \frac{\delta_{vzd}}{\lambda_{vzd} \cdot S_{iz}} + \frac{l_1}{\lambda_{Fe} \cdot S_{iz}} = \\
 &= \frac{0,76 \cdot 10^{-3}}{0,2 \cdot 162,5 \cdot 10^{-3}} + \frac{0,0001}{0,026 \cdot 162,5 \cdot 10^{-3}} + \frac{22,7 \cdot 10^{-3}}{50 \cdot 162,5 \cdot 10^{-3}} = 0,0498 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1} \quad (2.29)
 \end{aligned}$$

kde

$$\lambda_{iz} = 0,2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

je měrná tepelná vodivost izolace,

$$\lambda_{Fe} = 50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

je měrná tepelná vodivost oceli, ze které je rotor vyroben,

$$l_1 = 22,7 \text{ mm}$$

je vzdálenost od plochy bočního styku vodičů s izolací k pomyslnému tepelnému uzlu, jehož poloha je umístěna v polovině výšky tyče rotorového vinutí,

$$S_{iz} = 162,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

je plocha bočního styku vodičů s izolací, přes kterou se sdílí teplo.

Ze zubu do vzduchové mezery

$$\begin{aligned}
 R_2 &= \frac{l_2}{\lambda_{Fe} \cdot S_2} + \frac{1}{\alpha_\delta \cdot S_{pr}} = \\
 &= \frac{103,75 \cdot 10^{-3}}{50 \cdot 29,47 \cdot 10^{-3}} + \frac{1}{160 \cdot 49,26 \cdot 10^{-3}} = 0,1973 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}
 \end{aligned} \tag{2.30}$$

kde

$$l_2 = 103,75 \text{ mm}$$

je vzdálenost od pomyslného tepelného uzlu k povrchu rotoru,

$$S_2 = 29,47 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

je střední velikost plochy, kterou prochází tepelný tok z pomyslného tepelného uzlu k povrchu rotoru,

$$S_{pr} = 49,26 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

je plocha, která je součtem poloviny povrchu zubu a třetiny povrchu klínu na vnějším povrchu rotoru, protože předpokládám, že tepelný tok bude procházet i částí klínu,

$$\alpha_\delta = 160 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

je součinitel přestupu tepla do vzduchové mezery, zvolen dle doporučení vedoucího práce.

Ze zubu do poddrážkového kanálu

$$\begin{aligned}
 R_3 &= \frac{l_3}{\lambda_{Fe} \cdot S_3} + \frac{1}{\alpha_k \cdot 0,5 \cdot O_k} = \\
 &= \frac{120,02 \cdot 10^{-3}}{50 \cdot 12,05 \cdot 10^{-3}} + \frac{1}{230 \cdot 0,5 \cdot 0,129} = 0,2666 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}
 \end{aligned} \tag{2.31}$$

kde

$$l_3 = 120,02 \text{ mm}$$

je vzdálenost od pomyslného tepelného uzlu ke stěně poddrážkového kanálu,

$$S_3 = 12,05 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

je plocha, přes kterou prochází uvažovaný tepelný tok,

$$\alpha_k = 230 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

je součinitel přestupu tepla povrchu poddrážkového kanálu do chladícího vzduchu, zvolen dle doporučení vedoucího práce.

Z vinutí do vyražených otvorů

$$R_4 = \frac{1}{\alpha_0 \cdot S_4} = \frac{1}{90 \cdot 121,1 \cdot 10^{-3}} = 0,0918 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1} \quad (2.32)$$

kde

$$S_4 = 121,1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

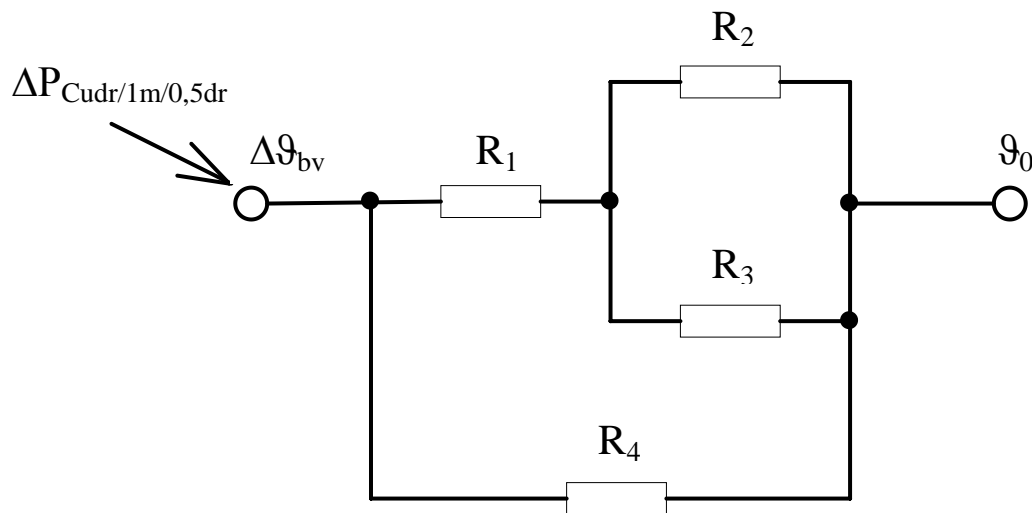
je plocha stěn vyražených otvorů ve vodičích budícího vinutí,

$$\alpha_0 = 90 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

je součinitel přestupu tepla povrchu vyražených otvorů do chladícího vzduchu, zvolen dle doporučení vedoucího práce.

### 2.3.2 Sestavení a řešení náhradního tepelného obvodu vymezeného úseku

Na *Obr. 2.8* je nakresleno schéma náhradního tepelného obvodu uvažovaného úseku, které odpovídá *Obr. 2.7*. Cílem je určit oteplení uzlu  $\Delta\vartheta_{bv}$ , které představuje oteplení budícího vinutí.



*Obr. 2.8* Schéma náhradního tepelného obvodu vymezeného úseku

Postupným zjednodušováním náhradního tepelného obvodu určím výsledný tepelný odpor vymezeného úseku:

Paralelní kombinace tepelných odporů  $R_2$  a  $R_3$

$$R_{23} = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3} = \frac{0,1973 \cdot 0,2666}{0,1973 + 0,2666} = 0,1134 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1} \quad (2.33)$$

Součet tepelných odporů  $R_1$  a  $R_{23}$

$$R_{123} = R_1 + R_{23} = 0,0498 + 0,1134 = 0,1632 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1} \quad (2.34)$$

Paralelní kombinací tepelných odporů  $R_{123}$  a  $R_4$  se již získá výsledný tepelný odpor vymezeného úseku:

$$R_V = \frac{R_{123} \cdot R_4}{R_{123} + R_4} = \frac{0,1632 \cdot 0,0918}{0,1632 + 0,0918} = 0,0588 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1} \quad (2.35)$$

Ztráty v drážkách

$$\Delta P_{Cudr} = \frac{L_r}{0,5 \cdot l_{bs}} \cdot \Delta P_{Cub} = \frac{2,847}{0,5 \cdot 7,702} \cdot 161\,698 = 119\,541 \text{ W} \quad (2.36)$$

Ztráty na jednu polovinu drážky a na 1 m délky rotoru

$$\Delta P_{Cudr/1m/0,5dr} = \frac{\Delta P_{Cudr}}{2 \cdot n_{dr} \cdot L_r} = \frac{119\,541}{2 \cdot 16 \cdot 2,847} = 1312 \text{ W} \quad (2.37)$$

Střední oteplení rotorového vinutí

$$\Delta \mathcal{G}_{bv} = \Delta P_{Cudr/1m/0,5dr} \cdot R_V = 1312 \cdot 0,0588 = 77,1 \text{ K} \quad (2.38)$$

Střední teplota rotorového vinutí

$$\mathcal{G}_{bv} = \Delta \mathcal{G}_{bv} + 40 [^\circ\text{C}] = 77,1 + 40 = 117,1^\circ\text{C} \quad (2.39)$$

## Závěr

Cílem této diplomové práce bylo navrhnout vzduchem chlazený turboalternátor dle zadaných parametrů. Úkolem elektromagnetického návrhu bylo určení hlavních rozměrů a parametrů stroje, návrh vinutí induktu včetně izolačního systému a uspořádání vinutí v drážce, dimenzování magnetického obvodu a sestrojení charakteristiky naprázdno, návrh budícího vinutí a určení odporů a reaktancí. V závěru elektromagnetického návrhu jsem vypočítal ztráty, z kterých jsem následně stanovil účinnost generátoru při jmenovitém zatížení a účinníku. Účinnost navrženého stroje je 97,9 %, což splňuje předpoklad vysoké účinnosti turboalternátoru.

V současné době se při elektromagnetickém návrhu elektrického stroje využívá výpočetní technika, která je vybavena k tomuto účelu vytvořenými programy, které využívají, i mimo jiné, data získaná metodou konečných prvků. V této práci je uveden poněkud zjednodušený postup elektromagnetického návrhu, který má základ ve výpočtech používaných v dobách, kdy se výpočetní technika pro tyto účely ještě nevyužívala. Vzhledem k zjednodušenému postupu elektromagnetického návrhu nelze hodnoty z něho vystupující uvažovat jako podklad pro výrobu takového stroje, ale jako nástroj pro pochopení souvislostí mezi fyzikálními principy a konstrukcí stroje.

Dalším úkolem této práce bylo provést orientační výpočet oteplení induktu a budícího vinutí metodou náhradních tepelných obvodů. Pro určení velikosti tepelných odporů bylo zapotřebí znát součinitele přestupu tepla v jednotlivých místech stroje. Součinitele přestupu tepla byly v této práci na doporučení vedoucího práce odhadnuty, jelikož k jejich přesnějšímu určení by bylo zapotřebí řešit ventilační systém stroje, což překračuje rámec této práce. Stanovení součinitelů přestupu tepla představuje náročný úkol, jehož postup je v praxi z velké části založen na zkušenostech z mnoha již vyrobených strojů.

Metodou náhradních tepelných obvodů jsem vypočítal oteplení vinutí induktu  $\Delta \vartheta_{scu} = 63,2 K$ , oteplení zubu induktu  $\Delta \vartheta_z = 33,8 K$ , oteplení jádra induktu  $\Delta \vartheta_j = 28,2 K$  a oteplení budícího vinutí  $\Delta \vartheta_{bv} = 77,1 K$ . Z vypočtených hodnot oteplení induktu lze usoudit, že oteplení induktu je relativně nízké. Jestliže se při návrhu stroje uvažuje použití izolace třídy B a je požadavek na maximální využití stroje, měla by se provést další iterace návrhu stroje, aby se více využil potenciál tepelné odolnosti izolace.

V současné době se i při tepelném výpočtu stroje využívá výpočetní technika, která je vybavena programy, využívající data získaná metodou konečných prvků. Jelikož hodnoty

oteplení vystupující z mnou provedeného tepelného výpočtu jsou pouze orientační, což je dáno jednak použitou metodou a také skutečností, že součinitelé přestupu tepla byly z výše popsaného důvodu odhadnuty, není vhodné tyto hodnoty oteplení považovat za důvod k provedení další iterace návrhu stroje. Lze tedy konstatovat, že hlavním účelem mnou provedeného tepelného výpočtu bylo poukázat, jaké veličiny mají zásadní vliv na výsledné oteplení navrhovaného turboalternátoru.

Posledním úkolem mé práce bylo schematicky nakreslit konstrukční uspořádání stroje v příčném a podélném řezu. Informace potřebné pro splnění posledního bodu zadání jsem čerpal z výkresů konstrukčních uspořádání turboalternátorů podobných výkonů uvedených v [3] a [5].

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] ČERVENÝ, Josef. *Postup při elektromagnetickém návrhu synchronního stroje*. Přednáškové texty pro ZČU v Plzni. Plzeň, 2010, Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta elektrotechnická. 19 s.
- [2] ČERVENÝ, Josef. *Stavba elektrických strojů*. Přednáškové texty pro ZČU v Plzni. Plzeň, 2012, Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta elektrotechnická. 148 s.
- [3] CIGÁNEK, Ladislav. *Stavba elektrických strojů*. Praha: SNTL, 1958, 716 s.
- [4] KOPYLOV, Igor Petrovič, a kol. *Stavba elektrických strojů*. Praha: SNTL, 1988, 688 s.
- [5] WIEDEMANN, E. - KELLENBERGER, W. *Konstrukce elektrických strojů*. Praha: SNTL, 1973, 650 s.



## Seznam příloh

Příloha č. 1: Graf pro určení obvodové proudové hustoty a magnetické indukce ve vzduchové mezeře

Příloha č. 2: Normalizované rozměry měděných pásů dle ČSN 42 8308

Příloha č. 3: Nákres statorové drážky

Příloha č. 4: Carterův činitel respektující vliv drážkování induktu

Příloha č. 5: Magnetizační charakteristika statorových plechů

Příloha č. 6: Nomogram k určení skutečné magnetické indukce v zubech statoru

Příloha č. 7: Magnetizační charakteristika konstrukční oceli

Příloha č. 8: Činitelé povrchových ztrát

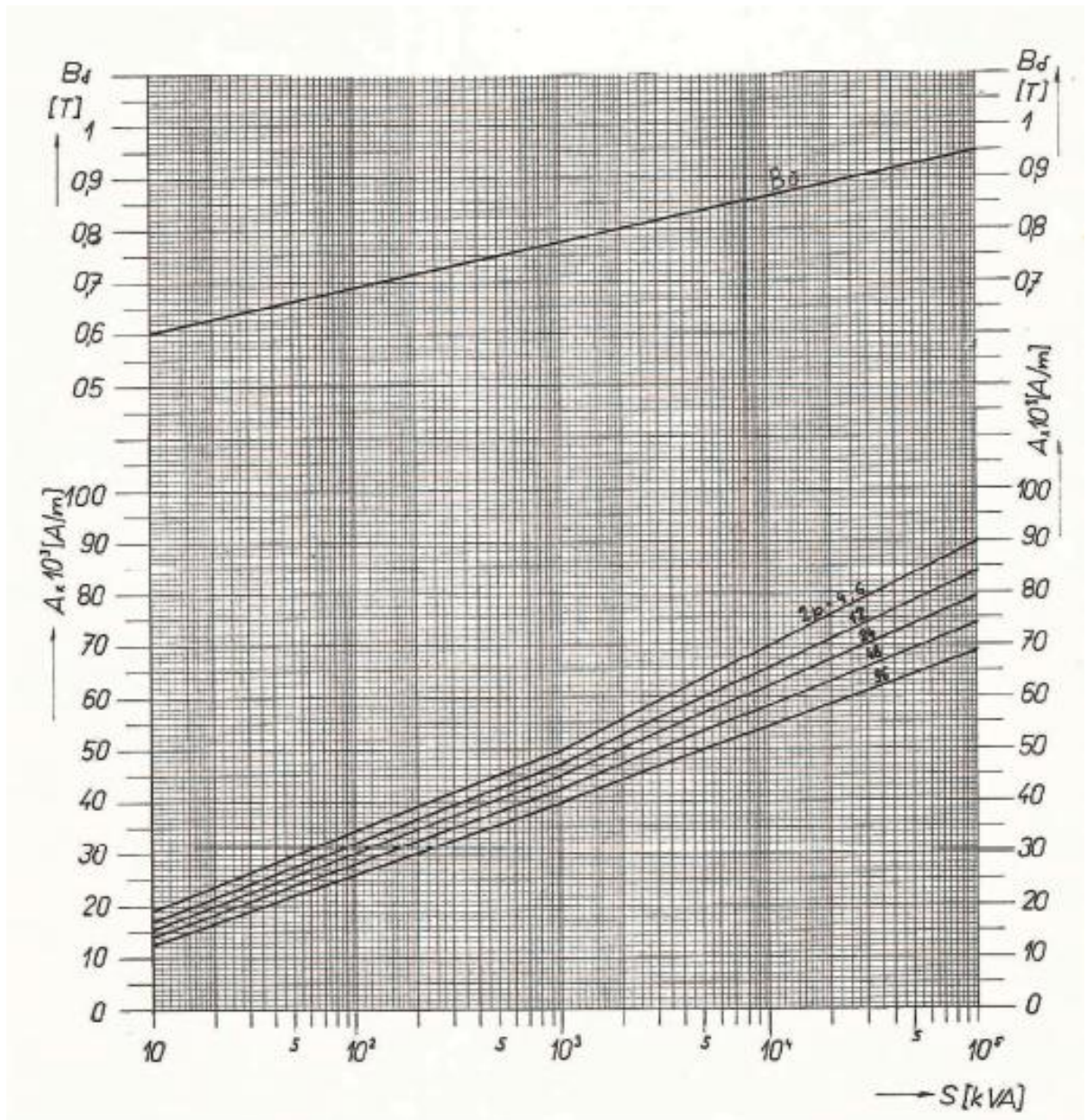
Příloha č. 9: Příčný řez strojem (na samostatném listu)

Příloha č. 10: Podélný řez strojem (na samostatném listu)

## Příloha č. 1

Graf pro určení obvodové proudové hustoty a magnetické indukce ve vzduchové mezeře

Zdroj: [1]



## Příloha č. 2

Normalizované rozměry měděných pásů dle ČSN 42 8308

Zdroj: [1]

### M Ě D Ě N Ě S P Á S Y

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
0,30	1,8	1,3	1,46										
	2,0	1,46	1,46	2,18	2,39	2,58	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	3,14	3,42	3,70	3,89	4,17	4,73	5,05			
0,35	3,0	2,26	2,86	3,16	3,38	3,68	3,98	4,19	4,49	5,09	5,45	6,05	6,9
	3,5	2,66	3,36	3,71	3,98	4,33	4,68	4,94	5,29	5,99	6,45	7,15	8,2
	4,0	3,05	3,86	4,26	4,58	4,98	5,38	5,69	6,09	6,89	7,45	8,25	9,45
	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
	5,0	3,89	4,89	5,36	5,78	6,28	6,78	7,19	7,69	8,69	9,45	10,4	12,0
	5,5	4,26	5,36	5,81	6,33	6,83	7,48	7,94	8,49	9,59	10,4	11,5	13,2
	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
0,40	(6,0)	5,06	6,36	7,01	7,58	8,23	8,88	9,44	10,1	11,4	12,4	13,7	15,6
	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
	8	6,26	7,86	8,66	9,38	10,2	11,0	11,7	12,5	14,1	15,4	17,0	19,6
	9	7,06	8,86		10,6	11,5	12,4	13,2	14,1	15,9	17,4	19,2	22,0
	10	7,86	9,86		11,8	12,8	13,8	14,7	15,7	17,7	19,4	21,4	24,6
	11	8,66	10,9		13,0	14,1	15,2	16,2	17,3	19,6	21,4	23,6	27,0
	12	9,46	11,9		14,2	15,4	16,6	17,7	18,9	21,3	23,4	25,8	29,0
0,50	(13)												
	14												
	(15)												
	16												
	18												
	20												
0,65	25												
	30												

Normy v závorkách neplatí pro nové konstrukce.

Výběr z ČSN 42 8308-1949 Rozměry měděných pásů

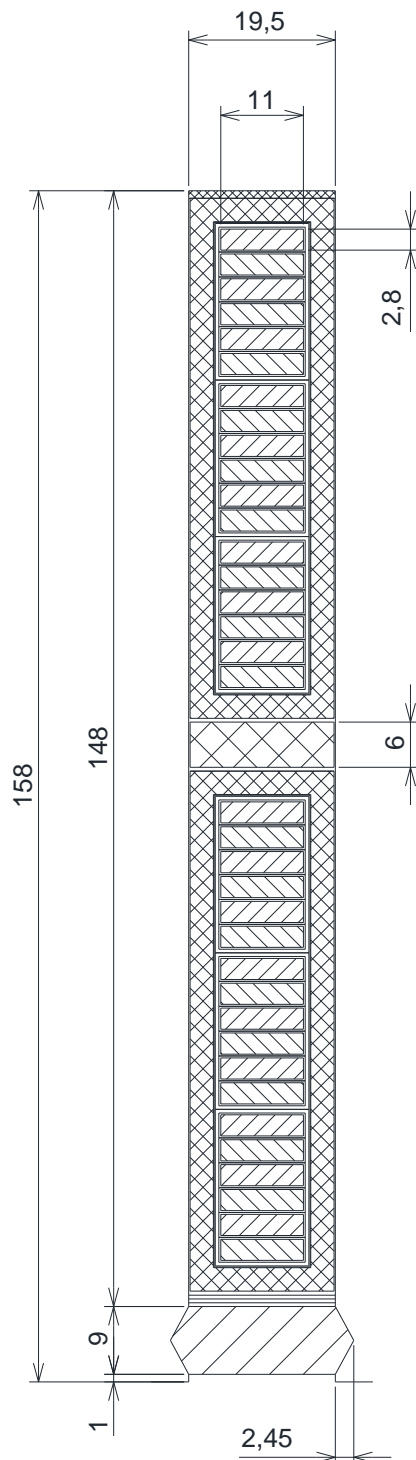
Jmenovitá tloušťka [mm]	3,0	(3,5)	3,5	4	4,5	5	5,5	6	(6,5)	7	8	9	10
11,4													
12,9													
14,4													
15,9													
17,4													
18,9													
20,4													
23,4													
26,4													
29,4													
32,4													
35,4													
38,4													
41,4													
44,4													
47,4													
53,4													
59,4													
74,4													
89,4													

Příklad: pás 3,6 x 6 má přibliž 20,1 mm<sup>2</sup> rozměry izolovaného pásu jsou 3,9 x 6,4 mm.

### Příloha č. 3

Nákres satorové drážky

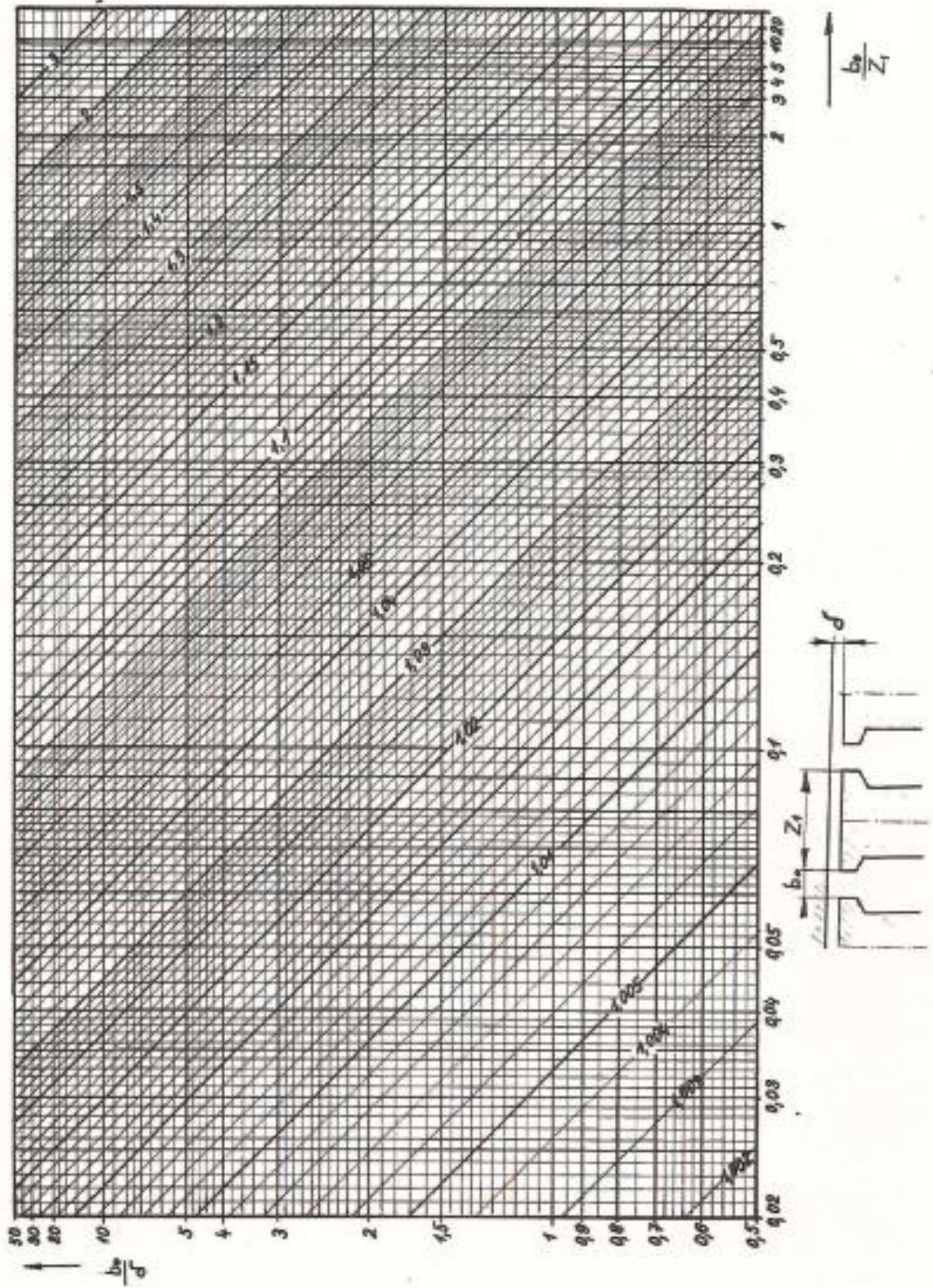
Měřítko 1:1



## Příloha č. 4

Carterův činitel respektující vliv drážkování induktu

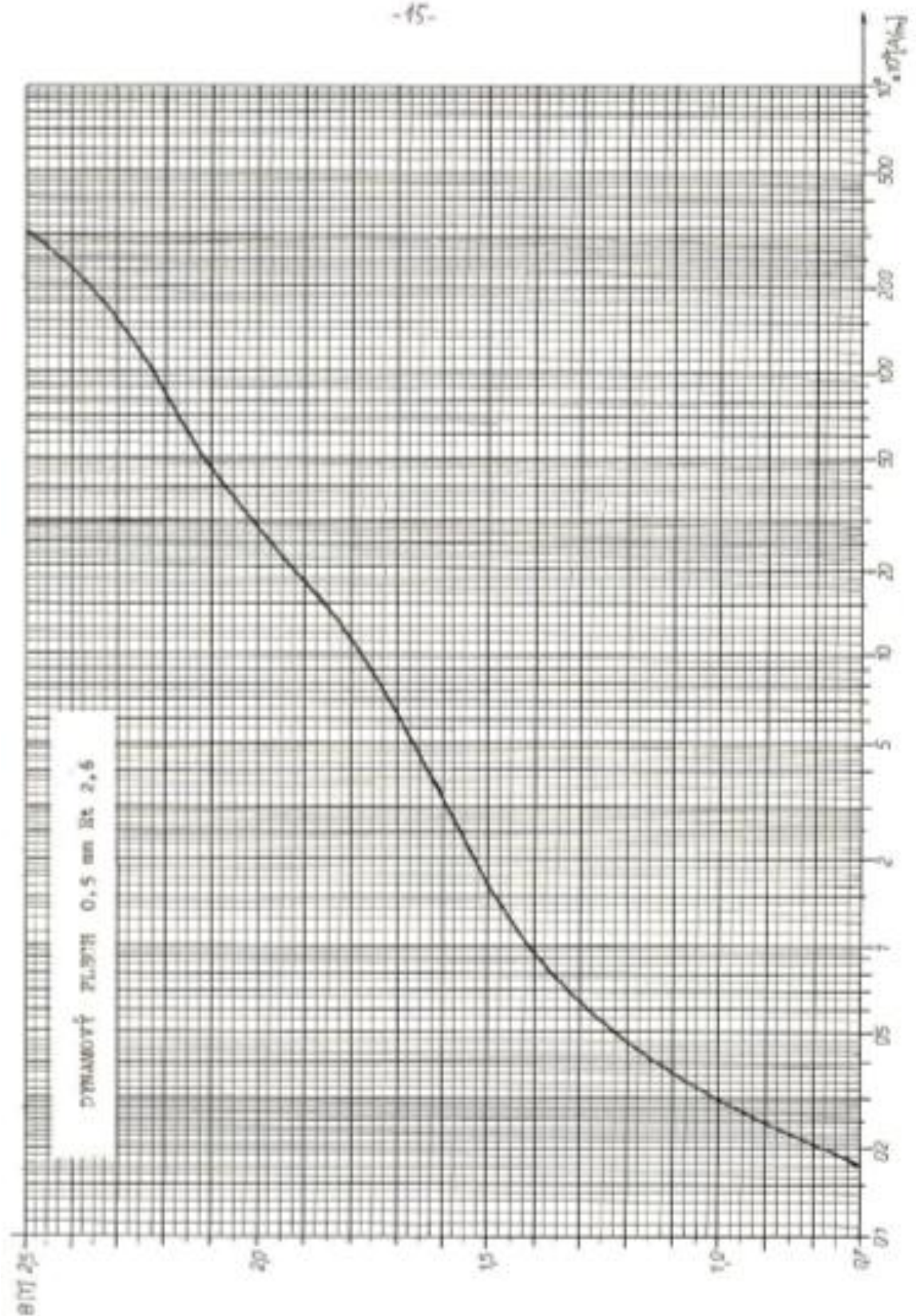
Zdroj: [1]



## Příloha č. 5

Magnetizační charakteristika statorových plechů

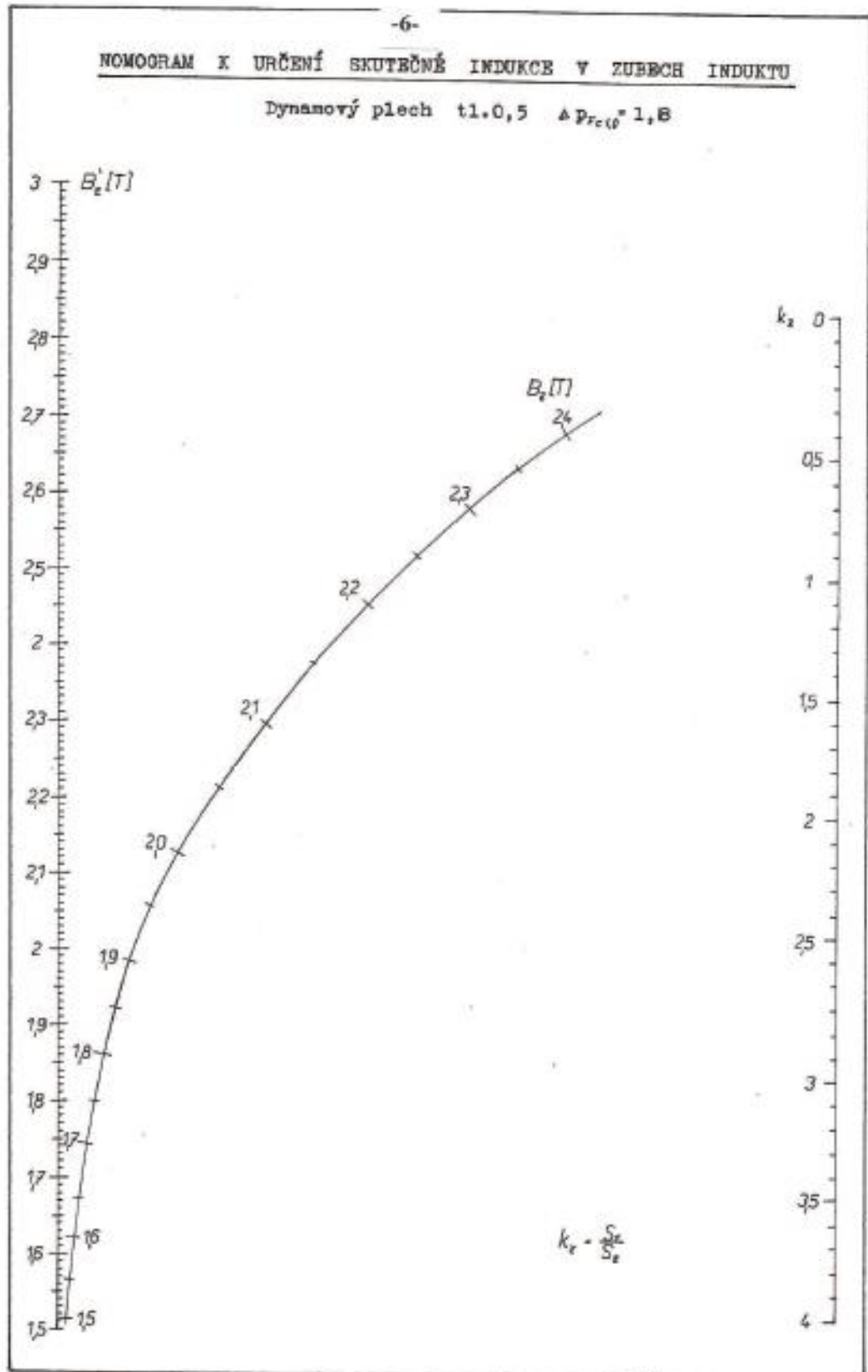
Zdroj: [1]



## Příloha č. 6

Nomogram k určení skutečné magnetické indukce v zubech statoru

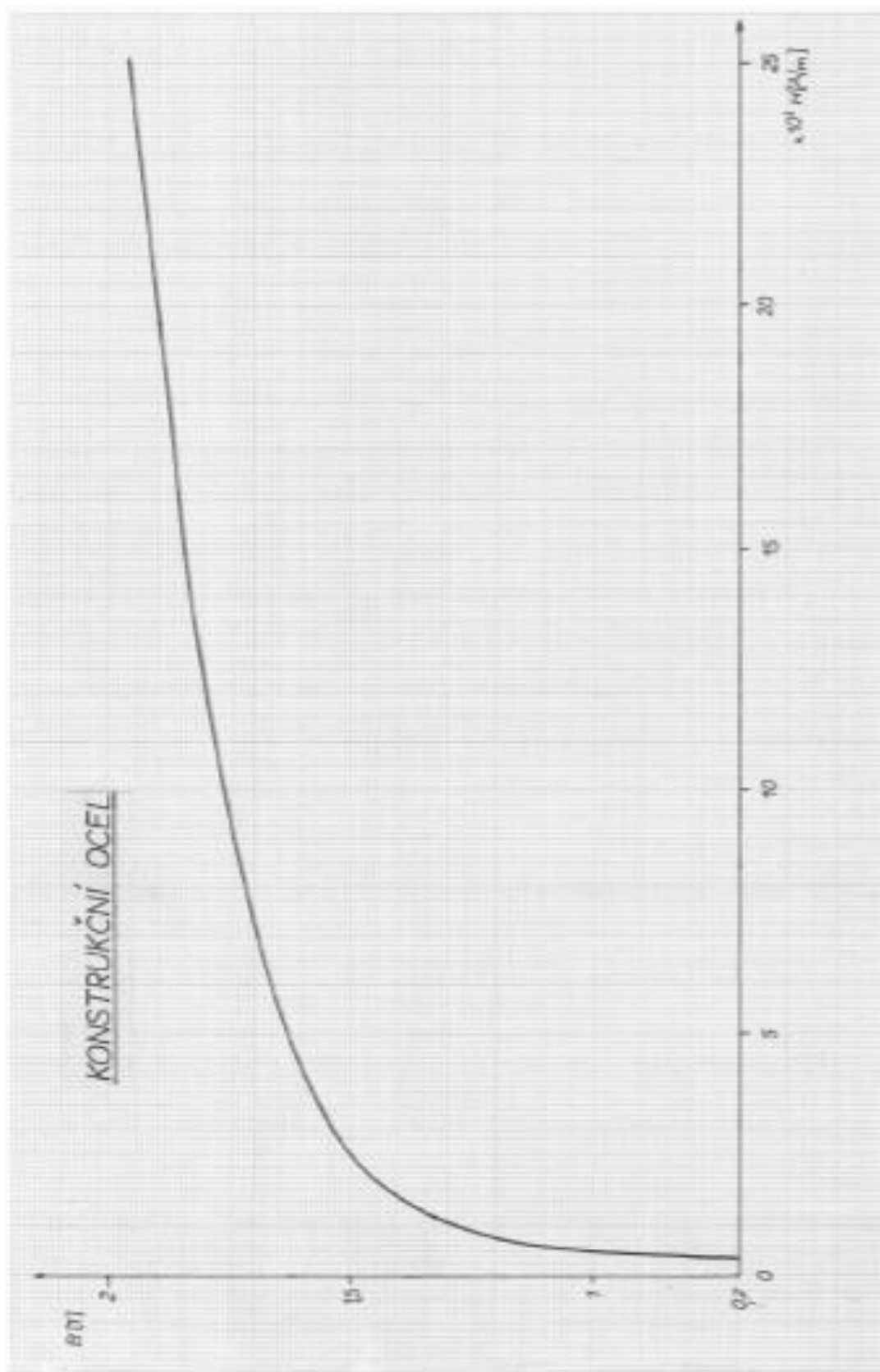
Zdroj: [1]



## Příloha č. 7

Magnetizační charakteristika konstrukční oceli

Zdroj: [1]





## Příloha č. 8

Činitelé povrchových ztrát

Zdroj: [1]

