

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Podrobný výpočet oteplení cívky kotvy synchronního
stroje**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2017/2018

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

Jméno a příjmení: **Bc. Jiří IPSER**
Osobní číslo: **E16N0055P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Průmyslová elektronika a elektromechanika**
Název tématu: **Podrobný výpočet oteplení cívky kotvy synchronního stroje**
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Proveďte elektromagnetický návrh vzduchem chlazeného synchronního generátoru s parametry: $S=9000$ kVA; $U=6300$ V; $n=750$ ot;/min; $m=3$; $f= 50$ Hz; $\cos \varphi=0,8$; $X_d=137\%$.
2. Proveďte metodou náhradních tepelných obvodů podrobný výpočet oteplení kotvy s podélným šířením tepla mezi drážkovou částí a čely daného vinutí.
3. Nakreslete průběh teploty podél cívky daného vinutí.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Červený J.: Stavba elektrických strojů, portál ZCU, Courseware 2016.
2. Červený J.: Postup při elektromagnetickém návrhu synchronního stroje, portál ZCU, Courseware 2016.

Vedoucí diplomové práce:

Doc. Ing. Josef Červený, CSc.


Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání diplomové práce:


10. října 2017

Termín odevzdání diplomové práce:

24. května 2018


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




Prof. Ing. Václav Kús, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 10. října 2017

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na výpočet oteplení cívky kotvy třífázového synchronního stroje s vyniklými póly. Tato práce je rozdělena do čtyř kapitol, přičemž v první kapitole je stručně charakterizovaný princip činnosti synchronního stroje a popsána jeho konstrukce. Druhá kapitola se zabývá elektromagnetickým návrhem synchronního stroje, který je proveden dle zadaných parametrů. Ve třetí kapitole jsou uvedeny výpočty potřebné k vytvoření konstrukčního výkresu v podélném a příčném řezu. Poslední kapitola se podrobně věnuje tepelným výpočtům pro ustálený stav. V řešení bylo použito metody náhradních tepelných obvodů. Při výpočtu bylo uvažováno i podélné šíření tepla ve statorovém vinutí. Tepelné výpočty jsou provedeny pro oboustranný i jednostranný ventilační systém. Cílem této diplomové práce je výpočet oteplení cívky kotvy synchronního stroje pomocí metody náhradních tepelných obvodů a stanovit vliv uspořádání ventilačního systému na průběh oteplení podél cívky daného vinutí.

Klíčová slova

Synchronní generátor, elektromagnetický návrh, tepelné obvody, metoda náhradních tepelných obvodů, podélné šíření tepla

Abstract

This diploma thesis is focused on the thermal calculation of stator coil in a three-phase synchronous machine with salient poles. This thesis is divided into four chapters. In the first chapter is briefly described the principle of synchronous machine and its structure. The second chapter deals with the electromagnetic design of the synchronous machine based on the specified parameters. In the third chapter are presented the calculations needed to create the structural drawing in longitudinal and cross section. The last chapter deals with thermal calculations for the steady state. The method of equivalent thermal circuit was used. The longitudinal transmission of the heat in the stator winding was also considered in heat calculations. Heat calculations are made for the two-sided and one-sided ventilation system. The aim of this diploma thesis is to calculate the heat of the synchronous machine armature coil using the method of equivalent thermal circuit to determine the effect of the ventilation system arrangement on the thermal process along the coil of the specific winding.

Key words

Synchronous generator, electromagnetic design, thermal circuits, equivalent thermal circuits, longitudinal heat transmission

Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 21.5.2018

Jiří Ipser

Poděkování

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

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
ÚVOD.....	17
1 SYNCHRONNÍ STROJE	18
1.1 PRINCIP SYNCHRONNÍHO STROJE	18
1.2 KONSTRUKCE SYNCHRONNÍHO STROJE	19
2 ELEKTROMAGNETICKÝ NÁVRH.....	20
2.1 ZADÁNÍ	20
2.2 ZÁKLADNÍ HODNOTY:.....	20
2.2.1 Průměr statoru (induktu)	21
2.3 NÁVRH VINUTÍ STATORU	22
2.3.1 Počet drážek.....	22
2.3.2 Parametry vinutí	24
2.3.3 Výpočet činitelů vinutí	26
2.3.4 Výpočet efektivní délky stroje	26
2.3.5 Návrh drážky.....	27
2.3.6 Rozměry čel vinutí.....	31
2.3.7 Odpor statorového vinutí	33
2.3.8 Rozptylová reaktance statorového vinutí.....	34
2.4 MAGNETICKÝ OBVOD	36
2.4.1 Určení magnetického toku	36
2.4.2 Vzduchová mezera	36
2.4.3 Magnetické napětí reakce kotvy.....	37
2.4.4 Magnetické napětí ve vzduchové mezeře	38
2.4.5 Dimenzování magnetického obvodu	38
2.4.6 Charakteristika naprázdno	40
2.5 NÁVRH BUDÍČÍHO VINUTÍ	44
2.5.1 Konstrukční výpočty.....	44
2.5.2 Orientační výpočet oteplení budící cívký.....	46
2.6 TLUMÍČÍ VINUTÍ.....	47
2.7 KROUŽKY A KARTÁČE	49
2.8 ZTRÁTY A ÚČINNOST	50
2.8.1 Jouleovy ztráty	50
2.8.2 Ztráty v železe	51
2.8.3 Povrchové ztráty	52
2.8.4 Mechanické ztráty	52
2.8.5 Přídavné ztráty.....	52
2.8.6 Celkové ztráty	52
2.8.7 Účinnost.....	52

3	MECHANICKÉ VÝPOČTY	53
3.1	STANOVENÍ PRŮMĚRŮ HŘÍDELE	53
3.2	VÝPOČET Odstředivé síly pólů	53
3.3	NÁVRH ROZMĚRŮ KLADIVA	55
3.4	STANOVENÍ POČTU MEZIPÓLOVÝCH ROZPĚREK	56
4	TEPELNÉ OBVODY	57
4.1	OBEČNÉ POZNATKY	57
4.2	VÝPOČET OTEPLENÍ CÍVKY KOTVY BEZ UVAŽOVÁNÍ PODÉLNÉHO ŠÍŘENÍ TEPLA – DRÁŽKOVÁ ČÁST STATOROVÉHO VINUTÍ.....	59
4.2.1	Určení rozměrů ve vymezeném úseku stroje	59
4.2.2	Ztráty ve vybraných úsecích	59
4.2.3	Výpočet potřebného množství chladiva.....	60
4.2.4	Stanovení součinitelů přestupu tepla	61
4.2.5	Okolní teploty ve vymezeném úseku stroje.....	62
4.2.6	Výpočet tepelných odporů.....	63
4.2.7	Sestavení a řešení náhradního tepelného obvodu.....	65
4.3	VÝPOČET OTEPLENÍ CÍVKY KOTVY BEZ UVAŽOVÁNÍ PODÉLNÉHO ŠÍŘENÍ TEPLA – ČELA STATOROVÉHO VINUTÍ	67
4.3.1	Oboustranný ventilační systém	68
4.3.2	Jednostranná ventilační systém	69
4.4	PODÉLNÉHO ŠÍŘENÍ TEPLA VE STATOROVÉM VINUTÍ.....	70
4.5	VÝPOČET OTEPLENÍ CÍVKY KOTVY PŘI UVAŽOVÁNÍ PODÉLNÉHO ŠÍŘENÍ TEPLA – OBOUSTRANNÝ VENTILAČNÍ SYSTÉM	72
4.5.1	Stanovení tepelných odporů.....	72
4.5.2	Délky úseků tyče.....	75
4.5.3	Ztráty v jednotlivých oblastech vinutí.....	75
4.5.4	Teploty okolí	76
4.5.5	Konstanty argumentů.....	76
4.5.6	Stanovení integračních konstant.....	76
4.5.7	Výsledné rovnice pro stanovení šíření tepla ve zvolených úsecích.....	80
4.6	VÝPOČET OTEPLENÍ CÍVKY KOTVY PŘI UVAŽOVÁNÍ PODÉLNÉHO ŠÍŘENÍ TEPLA – JEDNOSTRANNÝ VENTILAČNÍ SYSTÉM	81
4.6.1	Tepelné odpory	82
4.6.2	Teploty okolí úseků	82
4.6.3	Konstanta argumentu.....	82
4.6.4	Určení integračních konstant.....	82
4.6.5	Výsledné rovnice pro stanovení šíření tepla ve zvolených úsecích.....	85
	ZÁVĚR	87
	SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	88
	PŘÍLOHY	1

Seznam symbolů a zkratek

a	Přesahující část pólového nástavce	[m]
a_i	Konstanta argumentu v i -tém úseku	[-]
A	Obvodová proudová hustota	[A/m]
a_{ss}	Počet paralelních větví stejnosměrného vinutí	[-]
a_{st}	Počet paralelních větví střídavého vinutí	[-]
b_c	Tloušťka budící cívky	[m]
b_ζ	Šířka čela	[m]
b_d	Šířka drážky	[m]
b_k	Šířka kroužku v osové směru	[m]
b_n	Šířka pólového nástavce	[m]
b_p	Šířka pólu	[m]
B_{ji}	Magnetická indukce v jádře induktu	[T]
B_{jr}	Magnetická indukce ve jhu rotoru	[T]
B_p	Magnetická indukce v pólu	[T]
b_v	Šířka holého vodiče	[m]
B'_{zi}	Magnetická indukce zubu	[T]
B_{zi}	Skutečná magnetická indukce zubu	[T]
B_δ	Magnetická indukce ve vzduchové mezeře	[T]
c	Hmotnostní měrné teplo	[W/kg · °C]
C	Essonův činitel	[kVA/m ³ · ot./min]
c_1	Činitel základní har. mag. indukce ve vzd. mezeře	[-]
C_{d1}	Deformační činitel mag. napětí v podélné ose	[-]
C_{q1}	Deformační činitel mag. napětí v příčné ose	[-]
D_1	Průměr kotvy (induktu)	[m]
d_H	Průměr hřídele v místě přívodu mechanické energie	[m]
D_H	Průměr hřídele v nejširším místě	[m]
D_{je}	Vnější průměr statoru	[m]
D_{jr}	Průměr jha rotoru	[m]
d_t	Průměr tyče tlumiče	[m]
f	Frekvence	[Hz]

F'_a	Amplituda základní harmonické reakce kotvy	[A]
F_b	Budící magnetické napětí	[A]
F_{d1}	Magnetické napětí v podélné ose	[A]
F_p	Odstředivá síla pólu s cívkou	[N]
F_{p1}	Odstředivá síla pólu s cívkou na jednotku délky	[N/m]
F_{q1}	Magnetické napětí v příčné ose	[A]
F_r	Magnetické napětí ve jhu rotoru	[A]
F_s	Magnetické napětí v jádře statoru	[A]
F_z	Magnetické napětí v zubové části	[A]
F_δ	Magnetické napětí ve vzduchové mezeře	[A]
h_c	Výška budící cívky	[m]
h_ξ	Výška čela vinutí	[m]
h_{jr}	Výška jha rotoru	[m]
h_{js}	Výška jádra statoru	[m]
h_n	Výška pólového nástavce	[m]
h_p	Výška pólu	[m]
h_v	Výška holého vodiče	[m]
H_{zi}	Intenzita magnetického pole v zubové části	[A/m]
$H_{zstři}$	Střední hodnota intenzity mag. pole v zubové části	[A/m]
I_1	Fázový proud	[A]
I_b	Budící proud	[A]
i_k	Počet kartáčů	[-]
i_{vk}	Počet ventilačních kanálů	[-]
i_p	Počet paketů	[-]
k	Překladové číslo	[-]
k_c	Carterův činitel	[-]
k_{ck}	Cartérův činitel respektující vliv ventilačních kanálů	[-]
k_{cd}	Cartérův činitel respektující vliv drážkování induktu	[-]
k_{Cu}	Fieldův činitel zvýšení elektrického odporu	[-]
k_{Fe}	Činitel plnění železa	[-]
k_{vv}	Činitel vinutí v -té harmonické	[-]
k_{zi}	Činitel odlehčení v zubové části	[-]

L	Celková délka kotvy	[m]
l_{be}	Vnější obvod budící cívký	[m]
l_{bs}	Střední délka závitů budící cívký	[m]
$l_{\check{c}}$	Délka čel	[m]
l_e	Efektivní délka stroje	[m]
l_i	Délka statorového vinutí v i-tém úseku	[m]
l_k	Délka kroužku v obvodovém směru	[m]
L_n	Délka pólového nástavce	[m]
l_{oka}	Délka oka	[m]
l_p	Délka střední siločáry pólu	[m]
L_p	Délka pólu	[m]
l_r	Délka střední siločáry jha rotoru	[m]
L_r	Délka rotoru	[m]
l_s	Délka střední siločáry jádra statoru	[m]
l_v	Délka vodiče	[m]
m	Počet fází	[-]
m'	Matematický počet fází	[-]
m_{Fej}	Hmotnost jádra statoru	[kg]
m_{Fez}	Hmotnost zubů statoru	[kg]
m_n	Hmotnost pólového nástavce	[m]
m_p	Hmotnost pólu	[m]
m_v	Mezivrstva v drážce	[m]
n	Jmenovité otáčky	[ot./min]
n_d	Počet vodičů v drážce	[-]
n_s	Počet segmentů	[-]
N_b	Počet závitů budící cívký	[-]
n_p	Počet poloh budící cívký	[-]
N_s	Počet závitů jedné fáze v sérii	[-]
O_{2pc}	Ochlazovací povrch všech cívek	[m ²]
$O_{\check{c}}$	Vnější obvod čela	[m]
O_{iz}	Obvod izolačního vodiče	[m]
p	Počet pólpárů	[-]

P	Činný výkon	[W]
q	Počet drážek na pól a fázi	[-]
q'	Teplo vzniklé v jednotce objemu tělesa	[W/m ³]
Q	Počet drážek induktu	[-]
Q	Množství tepelného toku	[m ³ /s]
Q_f	Počet drážek na fázi	[-]
Q_p	Počet drážek na pól	[-]
$Q_{př}$	Počet drážek na překlad	[-]
Q_{r1}	Průtočné množství vzduchu na jeden kanál	[m ³ /s]
Q_{rv}	Průtočné množství vzduchu všemi kanály	[m ³ /s]
Q_{tn}	Počet tyčí na pólovém nástavci	[-]
r	Vnitřní poloměr oka	[m]
$R'_{1/20}$	Odpor jedné fáze pro stejnosměrný proud	[Ω]
$R_{1/75}$	Celkový odpor vinutí při teplotě 75 °C	[Ω]
$R_{1č/20}$	Odpor čel vinutí při teplotě 20 °C	[Ω]
$R_{1č/75}$	Odpor čel vinutí při teplotě 75 °C	[Ω]
$R_{1d/20}$	Odpor drážkové části vinutí při teplotě 20 °C	[Ω]
$R_{1d/75}$	Odpor drážkové části vinutí při teplotě 75 °C	[Ω]
R_{1-8}	Tepelné odpory ve vymezeném úseku	[°C/W]
$R_{b/75}$	Odpor všech budících cívek	[Ω]
$r_č$	Tepelný odpor na jednotku délky čela	[°C/W · m]
$R_č$	Tepelný odpor čela	[°C/W]
R_d	Tepelný odpor v drážkové části	[°C/W]
r_i	Tepelný odpor na jednotku délky v i-tém úseku	[°C/W · m]
R_k	Tepelný odpor na konci čel vinutí	[°C/W]
r_n	Poloměr pólového nástavce	[m]
R_{oka}	Střední poloměr oka	[m]
r_p	Poloměr pólu	[m]
S	Zdánlivý výkon	[VA]
S_{Cu1}	Průřez vodiče	[m ²]
S_{Cub}	Průřez vodiče budící cívky	[m ²]
S_i	Průřez vinutí v i-tém úseku	[m ²]

S_k	Průřez kartáčů jedné polaroty	[m ²]
S_{kn}	Průřez kruhu nakrátko	[m ²]
S_t	Průřez tyče tlumiče	[m ²]
\check{s}_{ji}	Šířka jádra induktu v i-té oblasti	[m]
\check{s}_k	Šířka ventilačního kanálu	[m]
\check{s}_p	Šířka paketu	[m]
t_{d1}	Mezidrážková rozteč	[m]
t_i	Izolace proti železu	[m]
t_k	Tloušťka izolační kostřičky	[m]
t_k	Rozteč kartáčů jedné polaroty	[m]
t_p	Mezipólová rozteč	[m]
t'_t	Rozteč tyčí po obvodu pólového nástavce	[m]
u	Počet cívkových stran v jedné drážce	[-]
U_b	Budící napětí	[V]
U_f	Fázové napětí	[V]
u_R	Úbytek napětí na ohmickém odporu	[%]
U_s	Sdružené napětí	[V]
u_σ	Úbytek napětí na rozptylové reaktanci	[%]
v	Výběh cívký z drážky	[m]
v_4	Rychlosti proudění vzduchu na výst. z rad. kanálu	[m/s]
v_{kz}	Rychlosti proudění vzduchu v oblasti zubu	[m/s]
v_{kj}	Rychlosti proudění vzduchu v oblasti jha	[m/s]
v_r	Obvodová rychlost rotoru	[m/s]
v_δ	Rychlost proudění vzduchu kolem cívký	[m/s]
x	Délka šroubovice tvořící část čela vinutí	[m]
x_{dn}	Nesycená synchronní reaktance	[%]
X_σ	Rozptylová reaktance statorového vinutí	[Ω]
y_1	Přední cívkový krok	[-]
y_{1d}	Cívkový krok v počtu drážek	[-]
y_2	Zadní cívkový krok	[-]
y_k	Krok na komutátoru	[-]
z_i	Šířka zubu v i-té oblasti	[m]

α	Činitel pólového krytí	[-]
α_4	Součinitel přestupu tepla na výst. z rad. kanálu	[W/°C · m ²]
α_ξ	Součinitel přestupu tepla v oblasti čela	[W/°C · m ²]
α_j	Součinitel přestupu tepla v rad. kanálu v oblasti zubu	[W/°C · m ²]
α_z	Součinitel přestupu tepla v rad. kanálu v oblasti jha	[W/°C · m ²]
α_δ	Součinitel přestupu tepla ve vzduchové mezeře	[W/°C · m ²]
β	Poměr zkrácení kroku	[-]
δ	Vzduchová mezera	[m]
ΔP	Celkové ztráty	[W]
ΔP_{Cu1}	Celkové Jouleovy ztráty	[W]
$\Delta P_{Cu1\check{c}}$	Jouleovy ztráty v čelech vinutí	[W]
ΔP_{Cu1d}	Jouleovy ztráty v drážkové části	[W]
ΔP_{Cub}	Ztráty v budícím vinutí	[W]
Δp_{Fe}	Ztrátové číslo plechů	[W/kg]
ΔP_{Fej}	Ztráty v jádře statoru	[W]
ΔP_{Fez}	Ztráty v zubech statoru	[W]
ΔP_i	Ztráty v i-tém úseku cívky na jednotku délky	[W/m]
ΔP_{ki}	Ztráty na konci čel vinutí v i-tém úseku	[W/m]
ΔP_m	Mechanické ztráty	[W]
ΔP_p	Povrchové ztráty	[W]
$\Delta P_{př}$	Přídavné ztráty	[W]
ΔP_{rv}	odváděné rotorovou větví	[W]
$\Delta \vartheta$	Oteplení	[°C]
$\Delta \vartheta_{Cub}$	Oteplení budící cívky	[°C]
η	Účinnost stroje	[%]
Φ	Magnetický tok	[Wb]
ξ	Náhradní výška vodiče	[m]
λ	Měrná tepelná vodivost	[W/°C · m]
λ_i	Měrná tepelná vodivost v i-tém úseku	[W/°C · m]
ω_m	Úhlová rychlost	[1/s]
σ_{cmax}	Maximální mechanické napětí	[Pa]
σ_{Cu1}	Proudová hustota	[A/m ²]

σ_{Cub}	Proudová hustota v budící cívce	[A/m ²]
σ_{dov}	Dovolené mechanické napětí	[Pa]
ρ	Hustota	[kg/m ³]
ρ_{Cu}	Měrný odpor vodiče	[$\Omega \cdot m$]
ν	Řád harmonické	[-]
ϑ	Teplota	[°C]
ϑ_{Cud}	Teplota drážkové části statorového vinutí	[°C]
$\vartheta_{\check{c}}$	Teplota čela statorového vinutí	[°C]
ϑ_F	Fiktivní teplota	[°C]
ϑ_j	Teplota v jádře statoru	[°C]
ϑ'_j	Fiktivní teplota v jádře statoru	[°C]
ϑ_{ki}	Teplota na konci čel vinutí v i-tém úseku	[°C]
ϑ_z	Teplota v zubu statoru	[°C]
ϑ'_z	Fiktivní teplota v zubu statoru	[°C]
ϑ_0	Teplota okolí	[°C]
ϑ_{0i}	Teploty okolí ve vymezeném úseku	[°C]

Úvod

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na výpočet oteplení cívky kotvy synchronního stroje pomocí metody náhradních tepelných obvodů a na stanovení vlivu uspořádání ventilačního systému na průběh oteplení podél cívky kotvy daného vinutí.

Synchronní stroj je nejdůležitějším typem elektrického stroje pro výrobu elektrické energie. V tomto případě pracuje jako generátor a přeměňuje mechanickou energii na elektrickou. První synchronní generátor pochází z devadesátých let 19. století a jeho vynálezcem je německý inženýr Friedrich August Haselwander. Od té doby prošel řadou vývojových fází a stal se nedílnou součástí našeho každodenního života. V dnešní době jsou synchronní generátory k nalezení ve většině elektráren (vodních, tepelných, jaderných, ...).

Synchronní stroj se skládá z velkého množství komponentů jako je například hřídel, magnetický obvod, kostra, vinutí, izolace, ložiska atd. S ohledem na teplotní odolnost a stárnutí je z celého stroje nejvíce náchylná právě izolace vinutí, která je tvořena polymerem. Z toho důvodu je vhodné znát teplotu v jednotlivých částech cívky a na základě výsledků zvolit příslušnou třídu izolace, aby nedošlo k poškození či zničení celého stroje.

1 Synchronní stroje

Synchronní stroj je elektrický točivý stroj, jehož rotor se otáčí synchronně s točivým magnetickým polem vzniklým ve statoru. Synchronní stroj může pracovat buď jako motor nebo jako generátor. [1]

Synchronní generátory jsou nejdůležitějšími elektrickými stroji pro výrobu elektrické energie. Tyto generátory se řadí mezi největší vyráběné elektrické točivé stroje, jejichž výkony mohou dosahovat vysokých hodnot (až 1500 MVA). Generátory, které jsou poháněny parními, popřípadě plynovými turbínami při rychlosti otáčení 3000 ot./min, se nazývají turboalternátory. Jsou-li generátory poháněny vodními turbínami, jejich otáčky jsou podstatně menší a nazývají se hydroalternátory. [2]

Synchronní motory se často využívají k pohonu různých průmyslových zařízení především větších výkonů (ventilátor, čerpadlo). Lze je také využít jako tzv. synchronní kompenzátory pro zlepšení účinníku. Výhodou synchronních motorů je možnost výroby jalové energie. Naopak nevýhodou těchto motorů je obtížný rozběh a potřeba zdroje pro napájení budicího obvodu. [2]

1.1 Princip synchronního stroje

Statorové vinutí vytváří tři fázové cívky s plným krokem, které jsou vzájemně prostorově pootočené o 120°. Budicí vinutí je umístěno na rotoru a napájí se stejnosměrným proudem buď ze stejnosměrné sítě nebo z vlastního budiče, který je nasazen na společné hřídeli přes sběrací kroužky. V cívkách statoru se indukují střídavé napětí, jestliže se nabuzený rotor otáčí konstantní rychlostí. To znamená, že statorové vinutí je kotvou. Kmitočet indukovaných napětí je úměrný otáčkám rotoru a počtu pólů

$$f = \frac{p \cdot n}{60}. \quad (1.1)$$

Při prostorovém sinusovém průběhu magnetického pole budou indukovaná napětí sinusová a v jednotlivých fázových cívkách vzájemně časově posunutá o 120°. Při souměrném zatížení generátoru vytvoří trojfázové proudy statoru točivé magnetické pole, které má shodnou rychlost otáčení jako rotor a jeho magnetické pole. Z toho důvodu se stroj nazývá synchronní. [1]

Synchronní stroj pracuje jako motor, pokud napájíme trojfázové vinutí statoru trojfázovým proudem, který vytvoří točivé magnetické pole. Roztočíme-li rotor na synchronní otáčky, nesouhlasné polarity pólů elektromagnetů rotoru a točivého pole statoru se přitahují a mají vůči sobě stejnou prostorovou polohu. Rotor se dále bude otáčet shodnou rychlostí jako točivé pole statoru. Z rotoru můžeme odebírat mechanický výkon. [1]

1.2 Konstrukce synchronního stroje

Stator je sestaven z izolovaných plechů o různé tloušťce. Po celém vnitřním obvodu plechů jsou rovnoměrně vyražené drážky. V těchto drážkách je uloženo střídavé vinutí, které může být buď mnohofázové, nejčastěji však trojfázové anebo v některých výjimečných případech jednofázové. Mnohofázové vinutí bývá obvykle dvouvrstvé se zkráceným krokem nebo jednovrstvé a zakládá se do otevřených drážek. [3]

Rotor není složen z plechů, protože v ustáleném stavu se otáčí synchronně s točivým polem statoru a nevznikají na něm ztráty v železe. Z toho důvodu je rotor vykován z kvalitní oceli. Na rotoru se nachází budící vinutí, které je napájené stejnosměrným proudem. Synchronní stroje neodebírají ze sítě jalový výkon, a proto velikost vzduchové mezery není tolik omezena. Vzduchová mezera většinou bývá od 5 do 100 mm. [2] Z hlediska konstrukce rotoru rozlišujeme dva druhy synchronních strojů:

1) stroje s hladkým rotorem (turboalternátory)

Turboalternátory jsou rychloběžné stroje s poměrně malým průměrem rotoru, ale naopak s jeho velkou délkou. [4] V dnešní době se zpravidla vyrábí jako dvupólové. Na rotoru se vyfrézují drážky, které tvoří asi 2/3 obvodu. Zbývající část obvodu je většinou bez drážek a prochází jí hlavní magnetický tok. Do vyfrézovaných drážek se vkládá budící vinutí, které je proti odstředivým silám zajištěno kovovými klíny. [2]

2) stroje s vyniklými póly (hydroalternátory)

Pro hydrogenerátory je charakteristický velký počet pólů, z toho plyne, že se jedná o pomaloběžné stroje. Rotor těchto strojů je poměrně krátký, ale velkého průměru. [4] Budící vinutí je umístěno na vyniklých pólech, kde je proti odstředivým silám zajištěno pólovými nástavci a rozpěrkami mezi póly. [3] Hydroalternátory často mívají ještě tlumící vinutí, které je umístěno v drážkách pólových nástavců a na obou čelech je spojeno vodivými kruhy. [1]

2 Elektromagnetický návrh

Při elektromagnetickém návrhu se využívá následující postup. V první řadě se určí základní parametry a hlavní rozměry stroje. Následuje návrh vinutí kotvy a výpočet odporů či reaktancí statorového vinutí. Další krok se již zabývá výpočtem magnetického obvodu včetně sestrojení charakteristiky naprázdno. Důležitý je též návrh budícího vinutí, tlumícího vinutí a kartáčů. Na závěr se vypočtou ztráty a účinnost stroje. [6]

V elektromagnetickém návrhu jsem převážně postupoval dle materiálu uvedeného v [5].

2.1 Zadání

Proveďte elektromagnetický návrh vzduchem chlazeného synchronního generátoru s následujícími parametry:

Zdánlivý výkon:	$S = 9000 \text{ kVA}$
Sdružené napětí:	$U_s = 6300 \text{ V}$
Jmenovité otáčky:	$n = 750 \text{ ot./min.}$
Počet fází:	$m = 3$
Frekvence:	$f = 50 \text{ Hz}$
Účinník:	$\cos \varphi = 0,8$
Nesycená synchronní reaktance:	$x_{dn} = 137 \%$

2.2 Základní hodnoty:

Činný výkon:

$$P = S \cdot \cos \varphi = 9000 \cdot 0,8 = 7200 \text{ kW} \quad (2.1)$$

Fázové napětí:

$$U_f = \frac{U_s}{\sqrt{3}} = \frac{6300}{\sqrt{3}} = 3637 \text{ V} \quad (2.2)$$

Počet pólparů:

$$p = \frac{60 \cdot f}{n} = \frac{60 \cdot 50}{750} = 4 \quad (2.3)$$

Z počtu pólparů získáme počet pólů: $2 \cdot p = 8$.

Fázový proud:

$$I_1 = \frac{S}{U_S \cdot \sqrt{3}} = \frac{9000 \cdot 10^3}{6300 \cdot \sqrt{3}} = 824,7 \text{ A} \quad (2.4)$$

Díky zdánlivému výkonu a počtu pólů lze určit obvodovou proudovou hustotu a magnetickou indukci ve vzduchové mezeře. Tyto hodnoty můžeme odečíst z grafu v příloze A:

- předběžná hodnota obvodové proudové hustoty: $A = 68000 \text{ A/m}$,
- indukce ve vzduchové mezeře: $B_\delta = 0,86 \text{ T}$.

Činitel pólového krytí (zvolen): $\alpha = 0,65$.

2.2.1 Průměr statoru (induktu)

Průměr statoru ve vzduchové mezeře nelze jednoznačně zvolit, jelikož se musí brát v úvahu řada požadavků. Jedna z možností, jak určit průměr statoru je využití empirického vztahu:

$$D_1 = 0,08 \cdot (2 \cdot p)^{0,625} \cdot S^{0,185} = 0,08 \cdot (2 \cdot 4)^{0,625} \cdot 9000^{0,185} = 1,58 \text{ m} \quad (2.5)$$

Průměr statoru lze také určit z grafu v příloze B, který je sestrojen na základě zkušeností z již velkého počtu provedených strojů: $D_1 = 1,8 \text{ m}$.

Pro další výpočet vybírám hodnotu: $D_1 = 1,58 \text{ m}$.

Mezipólová rozteč:

$$t_p = \frac{\pi \cdot D_1}{2 \cdot p} = \frac{\pi \cdot 1,58}{2 \cdot 4} = 0,621 \text{ m} \quad (2.6)$$

2.3 Návrh vinutí statoru

Návrh vinutí statoru zahrnuje určení počtu drážek, počtu závitů v sérii, tvaru cívek, rozstřihání vinutí na skupiny, počtu paralelních větví, průřezu vodičů, rozměrů drážky, odporů a reaktancí. [6]

2.3.1 Počet drážek

V závislosti na průměru stroje a velikosti napětí se volí mezidrážková rozteč v rozmezí 15 až 50 mm. Čím větší bude napětí stroje, tím větší bude i tloušťka izolace v drážce. Z toho důvodu se zvětší rozměr drážky a musíme volit vyšší hodnotu mezidrážkové rozteče. [6] V mém případě volím: $t_{d1} = 50 \text{ mm}$.

Předběžný počet drážek statoru vychází z mezidrážkové rozteče a platí tedy vztah:

$$Q = \frac{\pi \cdot D_1}{t_{d1}} = \frac{\pi \cdot 1581}{50} = 99,37 \quad (2.7)$$

Počet drážek na pól a fázi:

$$q = \frac{Q}{2 \cdot p \cdot m} = \frac{99,37}{2 \cdot 4 \cdot 3} = 4,14 \quad (2.8)$$

Pro hladký průběh křivky napětí je podstatný, aby počet drážek na pól a fázi byl poměrně vysoký ($q > 7$). V našem případě tato podmínka není splněna a musíme tedy zvolit zlomkové vinutí, ve tvaru $q = \frac{n}{c}$. Zlomkové vinutí se z hlediska průběhu křivky napětí chová jako vinutí s celým počtem drážek na pól a fázi, tedy $q = n$. Důležité je určit hodnotu jmenovatele c , protože čím bude vyšší, tím bude hladší průběh křivky napětí. Jelikož jmenovatel c ovlivňuje počet drážek na fázi (vztah 2.9), musí se volit dle určitých požadavků. Jmenovatel c musí být beze zbytku obsažen v počtu pólů $2 \cdot p$ a dále nesmí být násobkem počtu fází: $c \neq k \cdot m$. Zpravidla se volí nejvýše 5 až 7. V mém případě přichází v úvahu čísla 2, 4 a popřípadě 8. [6]

Počet drážek na fázi:

$$Q_f = \frac{Q}{m} = \frac{2 \cdot p \cdot m \cdot q}{m} = 2 \cdot p \cdot q = 2 \cdot p \cdot \frac{n}{c} = \text{celé číslo} \quad (2.9)$$

Poněvadž nám vyšel vnější průměr statoru větší než jeden metr, budeme muset skládat stator z jednotlivých segmentů. Pro usnadnění výroby je vhodné, aby všechny segmenty byly totožné. Toho docílíme vhodně zvolým počtem drážek na pól a fázi. S ohledem na volbu překladového čísla, počtu segmentů a počtu drážek na překlad jsem vybral variantu $q = 4 \cdot \frac{1}{2} = \frac{9}{2}$. Dále je uveden rozklad počtu drážek na prvočinitele (vztah 2.10). [6]

$$Q = 2 \cdot p \cdot m \cdot q = 2 \cdot 4 \cdot 3 \cdot \frac{9}{2} = 108 = 2 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 3 \quad (2.10)$$

Počet drážek lze vyjádřit i vztahem 2.11, kde k je překladové číslo, n_s je počet segmentů a $Q_{př}$ je počet drážek na překladové číslo.

$$Q = k \cdot n_s \cdot Q_{př} \quad (2.11)$$

Při skládání plechů lze zvolit poloviční nebo třetinový překlad. Já volím třetinový překlad $k = 3$ a dostávám: počet segmentů $n_s = 9$ a počet drážek na překladové číslo $Q_{př} = 4$.

Počet závitů jedné fáze v sérii:

$$N_s = \frac{\pi \cdot D_1 \cdot A}{2 \cdot m \cdot I_1} = \frac{\pi \cdot 1,58 \cdot 68000}{2 \cdot 3 \cdot 825} = 68,2 \quad (2.12)$$

Počet vodičů v drážce:

$$n_d = \frac{a_{st} \cdot N_s}{p \cdot q} = \frac{1 \cdot 68,2}{4 \cdot \frac{9}{2}} = 3,79 \quad (2.13)$$

kde a_{st} je počet paralelních větví každé fáze střídavého vinutí a v prvním kroku se volí: $a_{st} = 1$. Počet vodičů v drážce pro dvouvrstvé vinutí musí být sudé číslo. Z toho důvodu jsem výsledek zaokrouhlil na: $n_d = 4$. Pokud by zaokrouhlené číslo lišilo od původního o více než 20 %, tak bychom museli zvolit větší počet paralelních větví. V tom případě se musí pomocí pilového nebo úsečkového schéma zjistit, zda je daný počet paralelních větví možný. [6]

Skutečný počet závitů jedné fáze v sérii:

$$N_s = \frac{n_d \cdot p \cdot q}{a_{st}} = \frac{4 \cdot 4 \cdot \frac{9}{2}}{1} = 72 \quad (2.14)$$

Skutečná hodnota obvodové proudové hustoty:

$$A = \frac{2 \cdot m \cdot I_1}{\pi \cdot D_1} \cdot N_s = \frac{2 \cdot 3 \cdot 825}{\pi \cdot 1,58} \cdot 72 = 71716 \text{ A/m} \quad (2.15)$$

2.3.2 Parametry vinutí

Počet drážek na pól:

$$Q_p = \frac{Q}{2 \cdot p} = \frac{108}{2 \cdot 4} = 13,5 \quad (2.16)$$

Cívkový krok se volí tak, aby poměr zkrácení kroku β byl v rozmezí 0,8 až 0,9. Pokud je poměr zkrácení kroku v tomto rozmezí, dochází k potlačení vyšších harmonických, zejména 5. a 7. harmonické. Přičemž neoptimálnější hodnota je 0,83. [6]

Cívkový krok v počtu drážek: $y_{1d} = 11$.

Poměr zkrácení kroku:

$$\beta = \frac{y_{1d}}{Q_p} = \frac{11}{13,5} = 0,81 \quad (2.17)$$

Krok na komutátoru se musí rovnat celému číslu.

$$y_k = \frac{\varepsilon \cdot K \pm a_{ss}}{p} = \frac{0 \cdot 108 \pm 4}{4} = 1 \quad (2.18)$$

Stejnoseměrné vinutí je smyčkové ($\varepsilon = 0$), paralelní ($a_{ss} = 4$) a nekřížené (ve vztahu 2.18 je v čitateli kladné znaménko).

Kroky v počtu cívkových stran

Přední cívkový krok lze vypočítat pomocí vztahu 2.19, kde $2u$ značí počet cívkových stran v jedné drážce.

$$y_1 = 2u \cdot y_{1d} + 1 = 2 \cdot 11 + 1 = 23 \quad (2.19)$$

Zadní cívkový krok:

$$y_2 = 2 \cdot y_k - y_1 = 2 \cdot 1 - 23 = -21 \quad (2.20)$$

Střídavé vinutí

Počet skupin vinutí:

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

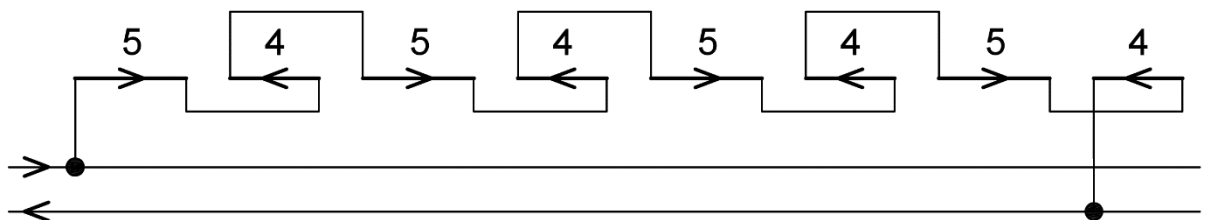
kde matematický počet fází $m' = 6$.

Počet skupin v jedné fázi:

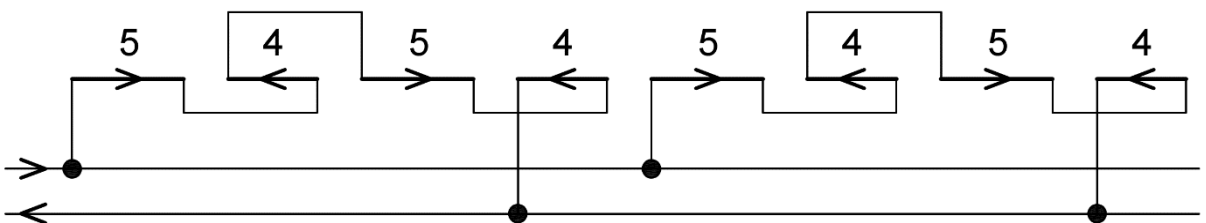
$$\frac{a_{ss} \cdot m'}{m} = \frac{4 \cdot 6}{3} = 8 \quad (2.22)$$

Počet cívek ve skupině:

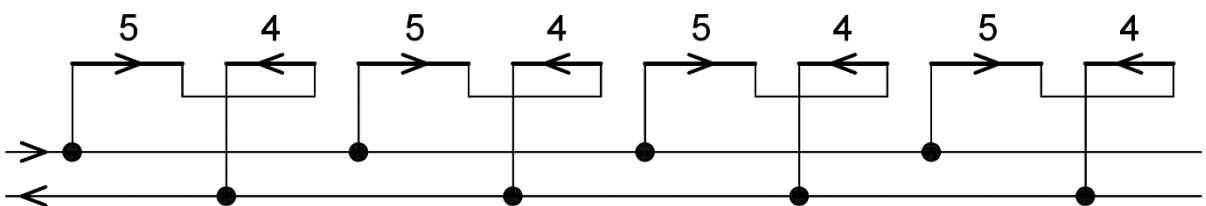
$$\frac{Q}{a_{ss} \cdot m'} = \frac{108}{4 \cdot 6} = 4,5 \quad (2.23)$$



Obr. č. 2.1: Úsečkové schéma vinutí pro jednu fázi ($a_{st} = 1$).



Obr. č. 2.2: Úsečkové schéma vinutí pro jednu fázi ($a_{st} = 2$).



Obr. č. 2.3: Úsečkové schéma vinutí pro jednu fázi ($a_{st} = 4$).

Na obrázcích číslo 2.1-3 jsou znázorněny všechny proveditelné varianty počtu paralelních větví střídavého vinutí. V mé práci jsme zvolil variantu $a_{st} = 1$, tedy sériové spojení.

2.3.3 Výpočet činitelů vinutí

Činitel vinutí v -té harmonické lze vyjádřit vztahem 2.24, kde v je řád harmonické, β je poměrné zkrácení kroku, m' je matematický počet fází a n je číselný vztah $q = \frac{n}{c}$.

$$k_{vv} = \sin\left(v \cdot \beta \cdot \frac{\pi}{2}\right) \cdot \frac{\sin v \cdot \frac{\pi}{m'}}{n \cdot \sin v \cdot \frac{\pi}{m' \cdot n}} \quad (2.24)$$

Činitel vinutí základní harmonické ($v = 1$):

$$k_{v1} = \sin\left(1 \cdot 0,81 \cdot \frac{\pi}{2}\right) \cdot \frac{\sin 1 \cdot \frac{\pi}{6}}{9 \cdot \sin 1 \cdot \frac{\pi}{6 \cdot 9}} = 0,91 \quad (2.25)$$

Po dosazení do vztahu 2.24 za $v = 5, 7, 11, 13$ vypočteme činitele vinutí příslušných harmonických: $k_{v5} = 0,015$, $k_{v7} = -0,068$, $k_{v11} = -0,087$, $k_{v13} = -0,055$.

2.3.4 Výpočet efektivní délky stroje

Essonův činitel elektromagnetického využití stroje:

$$C = \frac{\pi^2}{60 \cdot \sqrt{2}} \cdot A \cdot B_{\delta} \cdot k_{v1} = \frac{\pi^2}{60 \cdot \sqrt{2}} \cdot 71,71 \cdot 0,86 \cdot 0,91 = 6,53 \frac{kVA}{m^3 \cdot ot/min} \quad (2.26)$$

Efektivní délka stroje je vypočtená z výkonové rovnice:

$$l_e = \frac{S}{C \cdot D_1^2 \cdot n} = \frac{9000}{6,53 \cdot 1,58^2 \cdot 750} = 0,7 \text{ m} \quad (2.27)$$

Kvůli lepšímu odvodu tepla ze stroje použijeme radiální chladicí kanály. Radiální kanály získáme tak, že rozdělíme plechový svazek statoru na pakety o délce 35 až 55 mm. Mezi těmito pakety jsou plechové rozpěrky, které tvoří mezeru (kanál) o šířce 5 až 10 mm. V mém případě volím šířku paketu $\bar{s}_p = 50 \text{ mm}$ a šířku radiálního ventilačního kanálu $\bar{s}_k = 10 \text{ mm}$.

Počet paketů:

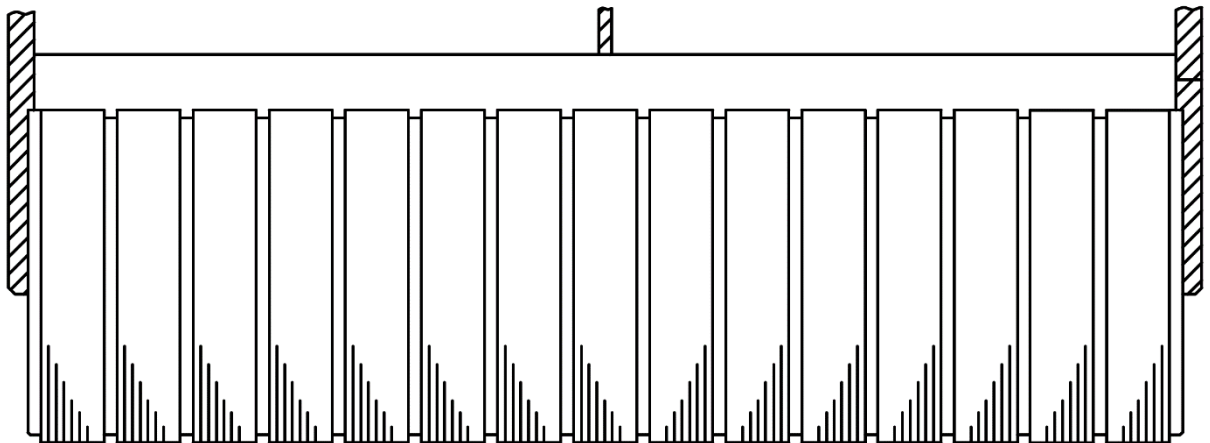
$$i_p = \frac{l_e}{\check{s}_p} = \frac{0,7}{0,05} = 15 \quad (2.28)$$

Počet ventilačních kanálů:

$$i_{vk} = i_p - 1 = 15 - 1 = 14 \quad (2.29)$$

Celková délka kotvy:

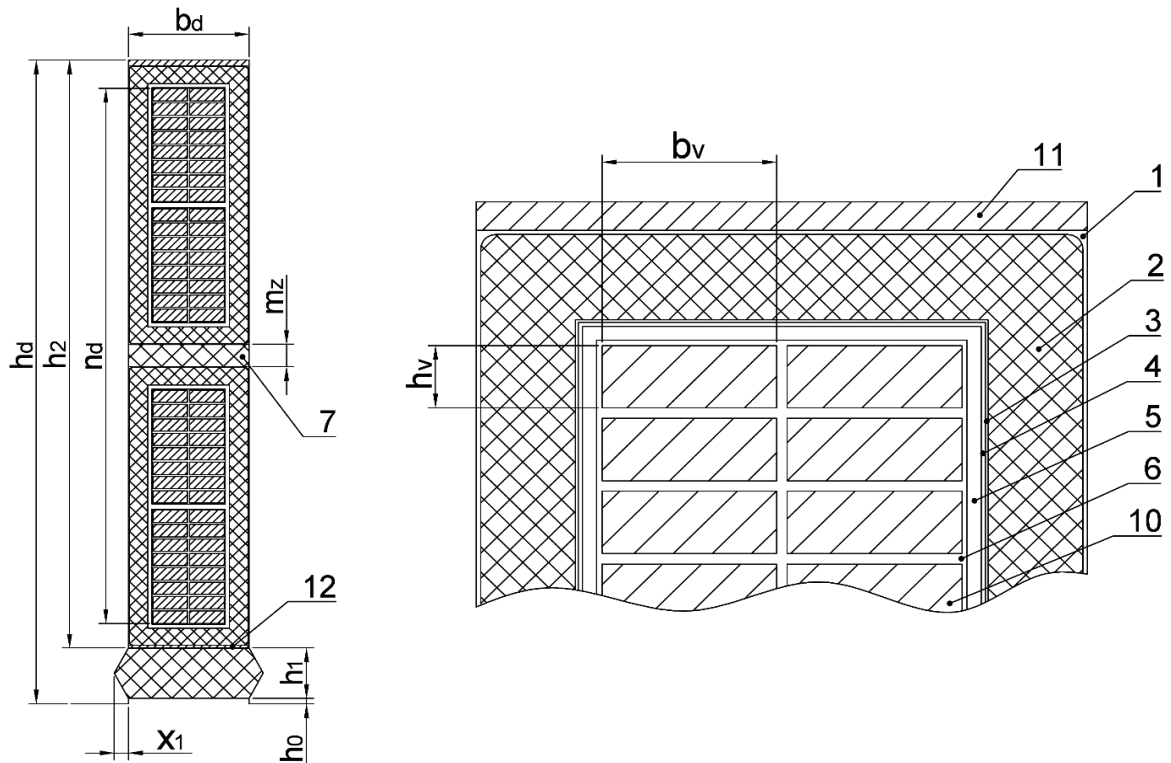
$$L = l_e + \check{s}_k \cdot i_{vk} = 0,7 + 0,01 \cdot 14 = 0,87 \text{ m} \quad (2.30)$$



Obr. č. 2.4: Statorový svazek.

2.3.5 Návrh drážky

Rozměry a tvary drážek jsou normalizované, aby se co nejvíce omezil počet razidel. Tvary drážek se označují velkými písmeny. Drážky lze rozdělit na otevřené, polouzavřené a uzavřené. V tomto případě volím otevřenou obdélníkovou drážku tvaru M (Obr. č. 2.5). Z toho vyplývá, že zuby budou lichoběžníkové. Otevřená drážka má výhodu v tom, že vinutí se tvaruje a izoluje mimo stroj. Díky tomu lze do stroje vkládat již hotové cívky. Naopak nevýhoda této drážky je velké otevření ve vzduchové mezeře. To vede na značnou amplitudu drážkové harmonické, a tedy ke zvýšení povrchových ztrát a ke zvětšení magnetického odporu vzduchové mezery. [6]



Obr. č. 2.5: Statorová drážka.

Drážková rozteč na průměru D_1 :

$$t_{d1} = \frac{\pi \cdot D_1}{Q} = \frac{\pi \cdot 1,58}{108} = 46 \text{ mm} \quad (2.31)$$

Pro výpočet šířky zubu dle vztahu 2.32 se nejdříve musí zvolit magnetická indukce v hlavě zubu B'_{z1} (volím 1,7 T) a určit činitel plnění železa k_{Fe} . V normě ČSN EN 10106 se udává hodnota 0,92.

$$z_1 = \frac{B_\delta \cdot t_{d1}}{B'_{z1} \cdot k_{Fe}} = \frac{0,86 \cdot 46}{1,7 \cdot 0,92} = 25,3 \text{ mm} \quad (2.32)$$

Šířka drážky:

$$b_d = t_{d1} - z_1 = 46 - 25,3 = 20,7 \text{ mm} \quad (2.33)$$

Vypočtenou šířku drážky musíme zaokrouhlit na nejbližší normalizovanou šířku pro drážku M dle tabulky v příloze C, tedy: $b_d = 21 \text{ mm}$. Dané šířce drážky odpovídají další normalizované rozměry: $h_0 = 1 \text{ mm}$, $h_1 = 9 \text{ mm}$, $x_1 = 2,45 \text{ mm}$.

Po zaokrouhlení šířky drážky musíme přepočítat šířku zubu.

$$z_1 = t_{d1} - b_d = 46 - 21 = 25 \text{ mm} \quad (2.34)$$

Hloubka drážky bez klínu h_2 se volí podle doporučení normy ČSN, tak aby její velikost byla zakončena číslicí 0, 2, 5 nebo 8.

Nyní je potřeba určit prostor pro holý vodič. V první řadě vezmeme šířku drážky a od ní odečteme celkovou izolaci (Tab. č. 2.2), tím získáme přibližnou šířku holého vodiče, kterou musíme upravit na nejbližší rozměr dle normalizovaných rozměrů pro měděné pasy, viz tabulka v příloze D. Já jsem v tomto případě zvolil šířku holého vodiče: $b_v = 12 \text{ mm}$.

Přibližná proudová hustota ve vodiči se vypočítá z empirického vztahu:

$$\sigma_{Cu1} = \sqrt{\frac{K}{b_v}} = \sqrt{\frac{190}{12}} = 3,98 \text{ A/mm}^2 \quad (2.35)$$

kde K je konstanta závislá na napětí a určí se z následující tabulky. Konstantu K volím pro napětí 6,3 kV.

Tab. č. 2.1: Určení konstanty K .

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

Přibližný průřez vodiče:

$$S'_{Cu1} = \frac{I_1}{a_{st} \cdot \sigma_{Cu1}} = \frac{825}{1 \cdot 3,98} = 207,3 \text{ mm}^2 \quad (2.36)$$

Přibližná výška vodiče vychází z bilance drážky na šířku:

$$h_v = \frac{S'_{Cu1}}{b_v} = \frac{207,3}{12} = 17,27 \text{ mm} \quad (2.37)$$

Pro takto vysoký vodič by byly příliš vysoké přídavné ztráty (skinefekt). Z toho důvodu je nutné rozdělit daný vodič na více paralelních vodičů o menším rozměru. Vodič se volí podle normalizovaných rozměrů (tabulka v příloze D). Těmto rozměrům odpovídá skutečný průřez,

který zohledňuje zaoblení hran a nerovnost povrchu. Původně navržený vodič tedy rozdělíme na výšku na osm vodičů ($i = 8$) a na šířku na dva vodiče ($j = 2$). Výsledný rozměr jednoho holého vodiče je $6 \times 2,2 \text{ mm}$ a jeho skutečný průřez S_1 činí $12,6 \text{ mm}^2$.

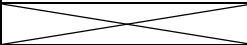
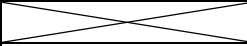
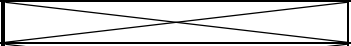

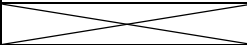
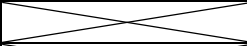
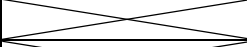
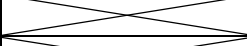
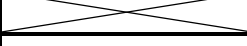
Výsledný průřez vodičů tvořící jeden závit:

$$S_{Cu1} = j \cdot i \cdot S_1 = 2 \cdot 8 \cdot 12,6 = 201,6 \text{ mm}^2 \quad (2.38)$$

Skutečná proudová hustota:

$$\sigma_{Cu1} = \frac{I_1}{a_{st} \cdot S_{Cu1}} = \frac{825}{1 \cdot 201,6} = 4,1 \text{ A/mm}^2 \quad (2.39)$$

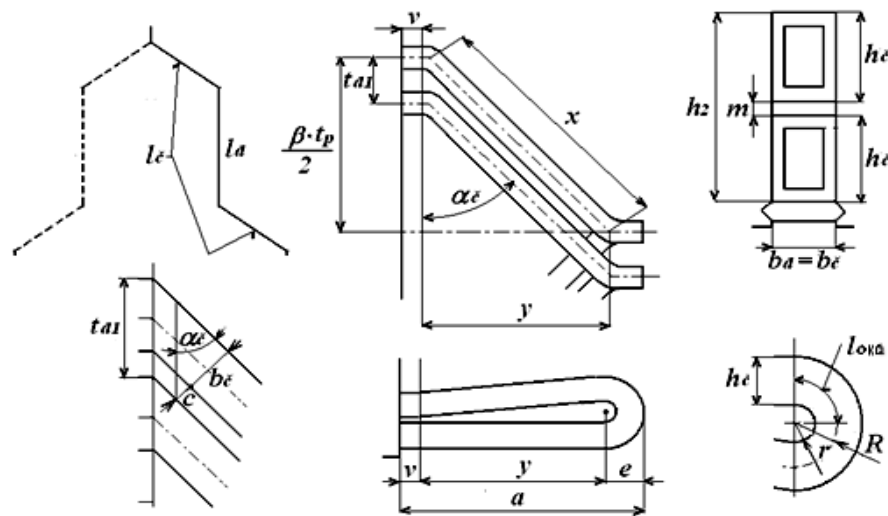
Tab. č. 2.2: Návrh drážky.

Poz.	Název	Šířka drážky		Výška drážky	
1	Vyložení drážky	$2 \cdot 0,15$	0,3	$4 \cdot 0,15$	0,45
2	Izolace proti železu	$2 \cdot t_i = 2 \cdot 3$	6,0	$4 \cdot t_i = 4 \cdot 3$	12,0
3	Tmelení	$2 \cdot 0,1$	0,2	$4 \cdot 0,1$	0,4
4	Stažení vodičů	$2 \cdot 0,15$	0,3	$4 \cdot 0,15$	0,6
5	Izolace závitů	$2 \cdot 0,48$	0,96	$2 \cdot n_d \cdot 0,48 = 2 \cdot 8 \cdot 0,48$	3,84
6	Izolace vodičů	$j \cdot 0,37 = 2 \cdot 0,37$	0,74	$n_d \cdot i \cdot 0,37 = 4 \cdot 8 \cdot 0,37$	11,34
7	Mezivrstva			$m_v = 4$	4,0
8	Celková izolace				
9	Vůle na šířku	$0,2 \div 0,7$	0,5		
10	Holý vodič	$j \cdot b_v = 2 \cdot 6$	12,0	$n_d \cdot i \cdot h_v = 4 \cdot 8 \cdot 2,2$	70,4
11	Vložka na dno			1	1,0
12	Vložka pod klín			0,5	0,5
13	Vůle na hloubku			$0,4 \div 2,0$	0,47
14	Rozměr drážky bez klínu			h_2	105
15	Klín a můstek			$h_0 + h_1 = 1 + 9$	10
16	Konečný rozměr drážky	b_d	21	h_d	115

Pozn.: Tloušťku izolace proti železu t_i a výšku mezivrstvy m_v , jsem volil s ohledem na napětí U_s .

2.3.6 Rozměry čel vinutí

Pro lepší orientaci, při výpočtu rozměrů čela statorového vinutí, využijeme obrázek č. 2.6.



Obr. č. 2.6: Čelo statorového vinutí. [5]

Výška čela:

$$h_{\zeta} = \frac{1}{2} \cdot (h_2 - m_v) = \frac{1}{2} \cdot (105 - 4) = 50,5 \text{ mm} \quad (2.40)$$

Vnitřní poloměr oka r je závislý na rozměrech vodiče, velikosti cívky, napětí a chlazení. V závislosti na těchto parametrech se volí v rozmezí 5 až 20 mm. Já jsem zvolil: $r = 10 \text{ mm}$.

Střední poloměr oka:

$$R_{oka} = r + \frac{h_{\zeta}}{2} = 10 + \frac{50,5}{2} = 35,25 \text{ mm} \quad (2.41)$$

Vzdálenost mezi čely závisí na napětí:

$$c = 4 + \frac{U_s}{2} = 4 + \frac{6,3}{2} = 7,15 \text{ mm} \quad (2.42)$$

Úhel sklonu čel válcového vinutí:

$$\alpha_{\zeta} = \arcsin \frac{b_{\zeta} + c}{t_{a1}} = \arcsin \frac{21 + 7,15}{46} = 37,7^{\circ} \quad (2.43)$$

kde šířku čela předpokládáme stejnou jako šířku drážky, tedy: $b_{\zeta} = b_d = 21 \text{ mm}$.

Výběh cívky z drážky v je závislý na velikosti napětí stroje a určuje se dle tabulky číslo 2.3. Tento navrhovaný stroj má sdružené napětí 6,3 kV, a proto se doporučuje výběh z drážky v rozmezí 50 až 65 mm. Zvolil jsem hodnotu: $v = 55 \text{ mm}$.

Tab. č. 2.3: Výběh z drážky.

U_s [kV]	Méně než 0,6	3,0	6,3	10,5 ÷ 15,0
v [mm]	10 ÷ 25	35 ÷ 45	50 ÷ 65	80 ÷ 130

Délka šroubovice tvořící část čela:

$$x = \frac{\beta \cdot t_p}{2 \cdot \cos \alpha_\zeta} = \frac{0,81 \cdot 621}{2 \cdot \cos 37,7} = 319,9 \text{ mm} \quad (2.44)$$

Délka oka:

$$l_{oka} = \frac{\pi \cdot R_{oka}}{2} = \frac{\pi \cdot 35,25}{2} = 55,4 \text{ mm} \quad (2.45)$$

Délka čel:

$$l_\zeta = 2 \cdot (v + x + l_{oka}) = 2 \cdot (0,055 + 0,319 + 0,055) = 0,861 \text{ m} \quad (2.46)$$

Délka vodiče:

$$l_v = L + l_\zeta = 0,875 + 0,861 = 1,736 \text{ m} \quad (2.47)$$

Vyložení čel v podélném směru:

Délka oka:

$$e = h_\zeta + r = 50,5 + 10 = 60,5 \text{ mm} \quad (2.48)$$

Průmět x do osového směru:

$$y = \frac{\beta \cdot t_p}{2} \cdot \tan \alpha_\zeta = \frac{0,81 \cdot 621}{2} \cdot \tan 47,7 = 195,8 \text{ mm} \quad (2.49)$$

Celková délka vyložení:

$$a = v + y + e = 0,055 + 0,196 + 0,061 = 0,311 \text{ m} \quad (2.50)$$

2.3.7 Odpor statorového vinutí

Elektrický odpor jedné fáze pro stejnosměrný proud, tedy bez uvažování skin efektu:

$$R'_{1/20} = \rho_{Cu} \cdot \frac{2 \cdot l_v \cdot N_s}{a_{st} \cdot S_{Cu1}} = \frac{1}{56} \cdot \frac{2 \cdot 1,736 \cdot 72}{1 \cdot 201,6} = 0,022 \Omega \quad (2.51)$$

kde ρ_{Cu} je měrný odpor měděného vodiče při teplotě 20 °C.

V následujících výpočtech již zahrneme vliv skin efektu. Skin efekt uvažujeme pouze v drážkové části.

Náhradní výška vodiče:

$$\xi = 2 \cdot \pi \cdot h_v \cdot \sqrt{\frac{j \cdot b_v \cdot f}{b_d \cdot \rho_{Cu}}} = 2 \cdot \pi \cdot 2,2 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 6 \cdot 50}{21 \cdot \frac{1}{56}}} = 0,17 \quad (2.52)$$

Celkový počet vodičů v jedné drážce nad sebou:

$$g = i \cdot n_d = 8 \cdot 4 = 32 \quad (2.53)$$

Fieldův činitel zvýšení elektrického odporu vlivem skin efektu:

$$k_{Cu} = \frac{g^2 \cdot -0,2}{9} \cdot \xi^4 = \frac{32^2 \cdot -0,2}{9} \cdot 0,17^4 = 0,106 \quad (2.54)$$

Odpor drážkové části vinutí s uvažováním skin efektu při teplotě 20 °C (vztah 2.55) a 75 °C (vztah 2.56):

$$R_{1d/20} = (1 + k_{Cu}) \cdot \frac{R'_{1/20}}{l_v} \cdot l_d = (1 + 0,106) \cdot \frac{0,022}{1,74} \cdot 0,87 = 0,012 \Omega \quad (2.55)$$

$$R_{1d/75} = 1,22 \cdot R_{1d/20} = 1,22 \cdot 0,012 = 0,015 \quad (2.56)$$

Odpor čel vinutí rovněž při teplotě 20 °C (vztah 2.57) a 75 °C (vztah 2.58):

$$R_{1\check{c}/20} = \frac{R'_{1/20}}{l_v} \cdot l_{\check{c}} = \frac{0,022}{1,74} \cdot 0,86 = 0,011 \Omega \quad (2.57)$$

$$R_{1\check{c}/75} = 1,22 \cdot R_{1\check{c}/20} = 1,22 \cdot 0,011 = 0,0134 \Omega \quad (2.58)$$

Celkový odpor vinutí při teplotě 75 °C:

$$R_{1/75} = R_{1d/75} + R_{1\check{c}/75} = 0,015 + 0,0134 = 0,0284 \Omega \quad (2.59)$$

Procentní hodnota úbytku napětí na ohmickém odporu:

$$u_R = \frac{R_{1/75} \cdot I_1}{U_f} \cdot 100 = \frac{0,0284 \cdot 825}{3637,3} \cdot 100 = 0,65 \% \quad (2.60)$$

2.3.8 Rozptylová reaktance statorového vinutí

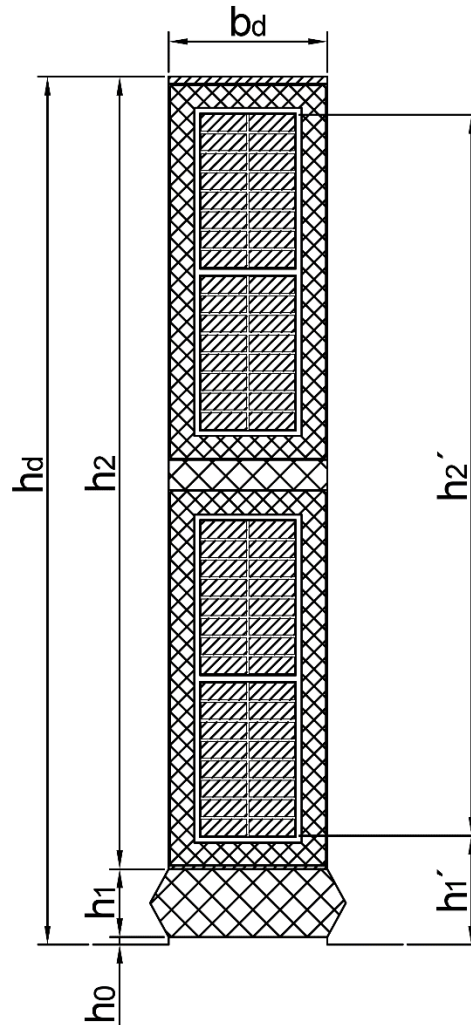
Velikost rozptylová reaktance statorového vinutí závisí na rozměrech drážky, délce čel vinutí, velikosti zubu ve vzduchové mezeře, šířce vzduchové mezery a na uspořádání vodičů v drážce. K výpočtu je nutné znát vzdálenosti h'_1 a h'_2 , které jsou podrobněji popsány níže. Rozptylová reaktance se pak určí podle vztahu 2.63.

Vzdálenost horního vodiče od kraje drážky h'_1 je dána součtem těchto velikostí: můstek, klín, vložka pod klín, vůle na hloubku, izolace proti železu, tmelení, stažení vodiče a izolace závitu.

$$h'_1 = 1 + 9 + 0,5 + 0,47 + 3 + 0,1 + 0,15 + 0,48 = 14,7 \text{ mm} \quad (2.61)$$

Vzdálenost krajních vodičů horní a spodní vrstvy vinutí h'_2 je dána součtem těchto velikostí: holý vodič, 2x izolace proti železu, mezivrstva, 2x tmelení, 2x stažení vodiče, izolace vodičů a 6x izolace závitu.

$$h'_2 = 70,4 + 2 \cdot 3 + 4 + 2 \cdot 0,1 + 2 \cdot 0,15 + 11,34 + 6 \cdot 0,48 = 95,12 \text{ mm} \quad (2.62)$$

Obr. č. 2.7: Drážka se znázorněnými výškami h'_1 a h'_2 .

Rozptylová reaktance statorového vinutí:

$$X_{\sigma} = \frac{(4\pi)^2 \cdot f \cdot N_s^2}{p \cdot q} \cdot l_e \cdot \left[\left(\frac{h'_2}{3 \cdot b_d} + \frac{h'_1}{b_d} \right) + \frac{l_{\xi}}{l_e} \cdot q \cdot \left(0,187 + 0,166 \cdot \frac{t_p}{l_{\xi}} \cdot \beta \right) + \ln \left(1 + \frac{\pi \cdot z_1}{2 \cdot b_d} \right) \right] \cdot 10^{-7} = \frac{(4\pi)^2 \cdot 50 \cdot 72^2}{4 \cdot 4,5} \cdot 0,7 \cdot \left[\left(\frac{95,12}{3 \cdot 21} + \frac{14,7}{21} \right) + \frac{0,861}{0,7} \cdot 4,5 \cdot \left(0,187 + 0,166 \cdot \frac{0,621}{0,861} \cdot 0,81 \right) + \ln \left(1 + \frac{\pi \cdot 25}{2 \cdot 21} \right) \right] \cdot 10^{-7} = 0,778 \Omega \quad (2.63)$$

Procentní hodnota úbytku napětí na rozptylové reaktanci:

$$u_{\sigma} = x_{\sigma} = \frac{X_{\sigma} \cdot I_1}{U_f} \cdot 100 = \frac{0,778 \cdot 825}{3637,3} \cdot 100 = 17,6 \% \quad (2.64)$$

2.4 Magnetický obvod

Část elektrického stroje, přes kterou se uzavírá hlavní magnetický tok, se nazývá magnetický obvod. Magnetický obvod je tvořen železem i vzduchovou mezerou. Jestliže magnetickým obvodem prochází stejnosměrný magnetický tok, nevznikají v něm ztráty v železe a železo může být masivní. V případě střídavého magnetického toku naopak ztráty v železe vznikají a z toho důvodu musí být železo lištěné, tzn. složené z tenkých plechů. U synchronních strojů mohou být z masivního železa póly a rotor, zatímco kotva (stator) musí být vždy lištěná. [6]

2.4.1 Určení magnetického toku

Z rovnice pro indukované napětí určíme velikost magnetického toku:

$$\Phi = \frac{U_f}{4,44 \cdot f \cdot N_s \cdot k_{v1}} = \frac{3637}{4,44 \cdot 50 \cdot 72 \cdot 0,91} = 0,250 \text{ Wb} \quad (2.65)$$

Kontrola magnetického toku na základě rozměrů stroje a velikosti magnetické indukce ve vzduchové mezeře.

$$\Phi = \frac{2}{\pi} \cdot t_p \cdot l_e \cdot B_\delta = \frac{2}{\pi} \cdot 0,621 \cdot 0,7 \cdot 0,86 = 0,250 \text{ Wb} \quad (2.66)$$

Obě hodnoty jsou totožné a můžeme tedy dále počítat s hodnotou: $\Phi = 0,25 \text{ Wb}$.

2.4.2 Vzduchová mezeza

Velikost vzduchové mezery:

$$\delta = k \cdot \frac{A \cdot t_p}{B_\delta} \cdot \frac{10^{-6}}{x_d - x_\sigma} = 47 \cdot \frac{71716,5 \cdot 0,621}{0,86} \cdot \frac{10^{-6}}{137 - 17,6} = 0,0184 \text{ m} \quad (2.67)$$

kde činitel k závisí na velikosti Cartérova činitele, na tvaru pólového nástavce a na dalších parametrech. Zpravidla se volí v rozmezí $(43 \div 50)$. Volím tedy hodnotu $k = 47$.

2.4.3 Magnetické napětí reakce kotvy

Pro dosažení co nejvíce sinusového průběhu magnetické indukce ve vzduchové mezeře se po obvodu stroje volí proměnná velikost vzduchové mezery. Z toho důvodu volím na okrajích pólových nástavců 1,5krát větší velikost než v ose pólu: $\frac{\delta_{max}}{\delta} = 1,5$. Dále je potřeba zvolit poměr $\frac{\delta}{t_p} = \frac{15,5}{622} = 0,0296$.

Pomocí výše zvolených hodnot si z grafů v příloze E odečteme hodnoty a a b , které využijeme k výpočtu činitele základní harmonické magnetické indukce ve vzduchové mezeře c_1 .

$$c_1 = a \cdot b = 1,14 \cdot 0,91 = 1,037 \quad (2.68)$$

Amplituda základní harmonické reakce kotvy:

$$F'_a = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{1}{c_1} \cdot A \cdot t_p \cdot k_{v1} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{1}{1,037} \cdot 71716,5 \cdot 0,621 \cdot 0,91 = 17587 \text{ A} \quad (2.69)$$

Pro určení deformačních činitelů magnetického napětí je potřeba, z grafů v příloze F, odečíst hodnoty e, f, g, h .

Deformační činitel magnetického napětí v podélné ose (vztah 2.70) a v příčné ose (vztah 2.71):

$$C_{d1} = e \cdot f = 0,81 \cdot 1,08 = 0,84 \quad (2.70)$$

$$C_{q1} = g \cdot h = 1,44 \cdot 0,3 = 0,34 \quad (2.71)$$

Magnetické napětí v podélném směru (vztah 2.72) a v příčném směru (vztah 2.73):

$$F_{d1} = C_{d1} \cdot F'_a = 0,87 \cdot 17587 = 15385 \text{ A} \quad (2.72)$$

$$F_{q1} = C_{q1} \cdot F'_a = 0,43 \cdot 17587 = 7598 \text{ A} \quad (2.73)$$

2.4.4 Magnetické napětí ve vzduchové mezeře

Cartérův činitel respektující vliv drážkování induktu k_{cd} se určuje z nomogramu v příloze G. Pro odečet Cartérova činitele z nomogramu musíme znát výrazy 2.74 a 2.75.

$$\frac{b_0}{z_1} = \frac{21}{25} = 0,84 \quad (2.74)$$

$$\frac{b_0}{\delta} = \frac{21}{18,4} = 1,14 \quad (2.75)$$

Hodnota odečtená z nomogramu: $k_{cd} = 1,09$.

Cartérův činitel respektující vliv radiálních ventilačních kanálů k_{ck} .

$$k_{ck} = \frac{1}{1 + \frac{\delta}{2 + \beta} \cdot \frac{\check{s}_k \cdot i_p}{l_e}} = \frac{1}{1 + \frac{18,4}{2 + 18,4} \cdot \frac{10 \cdot 15}{700}} = 0,84 \quad (2.76)$$

Výsledná hodnota Cartérova činitele:

$$k_c = k_{cd} \cdot k_{ck} = 1,09 \cdot 0,84 = 0,91 \quad (2.77)$$

Magnetické napětí ve vzduchové mezeře:

$$F_\delta = 0,8 \cdot k_c \cdot \delta \cdot B_\delta \cdot 10^6 = 0,8 \cdot 0,91 \cdot 0,184 \cdot 0,86 \cdot 10^6 = 11594 \text{ A} \quad (2.78)$$

2.4.5 Dimenzování magnetického obvodu

Dimenzování magnetického obvodu znamená určit jeho rozměry feromagnetických částí. Pro stanovení některých rozměrů si musíme dle doporučených hodnot zvolit magnetickou indukci v jednotlivých částech magnetického obvodu:

- magnetická indukce v jádře induktu $B_{ji} = 1,3 \text{ T}$,
- magnetická indukce v pólu $B_p = 1,45 \text{ T}$,
- magnetická indukce ve jhu rotoru $B_{jr} = 1,1 \text{ T}$. [6]

Výška pólu:

$$h_p = 0,3 \cdot t_p = 0,3 \cdot 0,621 = 0,186 \text{ m} \quad (2.79)$$

Výška pólového nástavce:

$$h_n = 0,1 \cdot t_p = 0,1 \cdot 0,621 = 0,062 \text{ m} \quad (2.80)$$

Při určování šířky pólu a výšky jha rotoru musíme počítat s celkovým magnetickým tokem (hlavní + rozptylový). Rozptylový magnetický tok se stanoví pomocí činitele rozptylového toku ν , který se volí v rozmezí 0,1 až 0,2. [6] V mém případě volím $\nu = 0,15$.

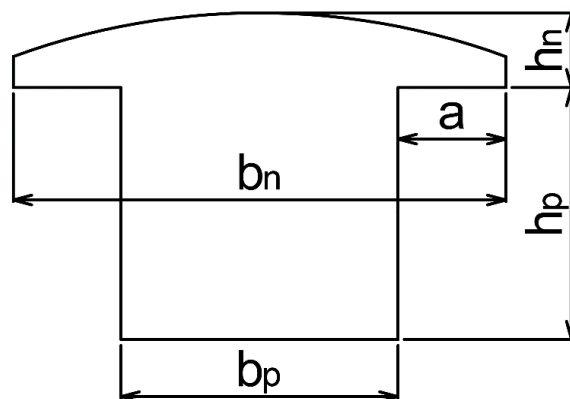
Šířka pólu:

$$b_p = \frac{(1 + \nu) \cdot \Phi}{B_p \cdot L_p} = \frac{(1 + 0,15) \cdot 0,25}{1,45 \cdot 0,875} = 0,23 \text{ m} \quad (2.81)$$

kde délka pólu L_p je shodná s celkovou délkou kotvy L .

Šířka pólového nástavce:

$$b_p = \alpha \cdot t_p = 0,65 \cdot 0,621 = 0,4 \text{ m} \quad (2.82)$$



Obr. č. 2.8: Rotorový pól.

Výška jha rotoru:

$$h_{jr} = \frac{(1 + \nu) \cdot \Phi}{2 \cdot B_{jr} \cdot L_r} = \frac{(1 + 0,15) \cdot 0,25}{2 \cdot 1,1 \cdot 0,93} = 0,139 \text{ m} \quad (2.82)$$

kde L_r je délka rotoru, která je oproti délce pólu zvětšená o prostor pro dosednutí budící cívky.

Výška jádra induktu:

$$h_{js} = \frac{\Phi}{2 \cdot B_{js} \cdot k_{Fe} \cdot l_e} = \frac{0,25}{2 \cdot 1,3 \cdot 0,92 \cdot 0,7} = 0,14 \text{ m} \quad (2.83)$$

Délky středních siločar částí magnetického obvodu:

Pól a nástavec:

$$l_p = h_p + h_n = 0,186 + 0,062 = 0,248 \text{ m} \quad (2.84)$$

Jho rotoru:

$$l_r = \frac{\pi \cdot [D_1 - 2 \cdot (\delta + h_p + h_n)]}{4 \cdot p} \quad (2.85)$$

$$l_r = \frac{\pi \cdot [1,58 - 2 \cdot (0,0184 + 0,186 + 0,062)]}{4 \cdot 4} = 0,206 \text{ m}$$

Jádro kotvy:

$$l_s = \frac{\pi \cdot [D_1 - 2 \cdot (h_d + h_{js})]}{4 \cdot p} = \frac{\pi \cdot [1,58 - 2 \cdot (0,115 + 0,14)]}{4 \cdot 4} = 0,412 \text{ m} \quad (2.86)$$

2.4.6 Charakteristika naprázdno

Charakteristika naprázdno se používá ke stanovení budícího magnetického napětí. K sestavení charakteristiky naprázdno potřebujeme alespoň tři body magnetického napětí pro tři hodnoty indukovaného napětí (100 %, 115 % a 130 %) a charakteristiku vzduchové mezery. Charakteristika vzduchové mezery je přímka, která prochází počátkem a zároveň je tečnou k charakteristice naprázdno. V první fázi spočítáme magnetické napětí v drážkové části statoru (zubové vrstvy) a následně v celém magnetickém obvodu. Magnetická indukce v zubech B'_z je upřesněna pomocí nomogramu, viz příloha J. Pro skutečnou hodnotu indukce se z magnetizační charakteristiky pro elektrotechnické plechy odečte intenzita magnetického pole (graf v příloze H). [6]

Tab. č. 2.4: Charakteristika zubové vrstvy (1).

D_i [mm]		t_{di} [mm]	z_i [mm]	k_{zi} [-]
D_1	1581	46,00	25,00	1,00
$D_2 = D_1 + h_d$	1696	49,35	28,35	0,89
$D_3 = D_1 + 2 \cdot h_d$	1811	52,69	31,69	0,81

Vztahy pro výpočet tabulky číslo 2.4 ($i = 1, 2, 3$):

Drážková rozteč:

$$t_{di} = \frac{\pi \cdot D_i}{Q} \quad (2.87)$$

Šířka zubu:

$$z_i = t_{di} - b_d \quad (2.88)$$

Činitel odlehčení:

$$k_{zi} = \frac{t_{di}}{z_i \cdot k_{Fe}} - 1 \quad (2.89)$$

Tab. č. 2.5: Charakteristika zubové vrstvy (2).

	B'_{zi} [T]	B_{zi} [T]	H_{zi} [A/m]	$H_{zstř}$ [A/m]	F_z [A]
$1,00 \cdot \Phi$	1,72	1,70	6000	4600	529
	1,63	1,62	4700		
	1,55	1,55	2800		
$1,15 \cdot \Phi$	1,98	1,94	23000	15166	1744
	1,87	1,85	14500		
	1,79	1,78	10000		
$1,30 \cdot \Phi$	2,24	2,11	46000	30916	3555
	2,12	2,04	29000		
	2,02	1,96	23500		

Vztahy pro výpočet tabulky číslo 2.5 ($i = 1, 2, 3$):

Zdánlivá hodnota magnetické indukce:

$$B'_{zi} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{di}}{z_i \cdot k_{Fe}} \quad (2.90)$$

Střední hodnota intenzity magnetického pole:

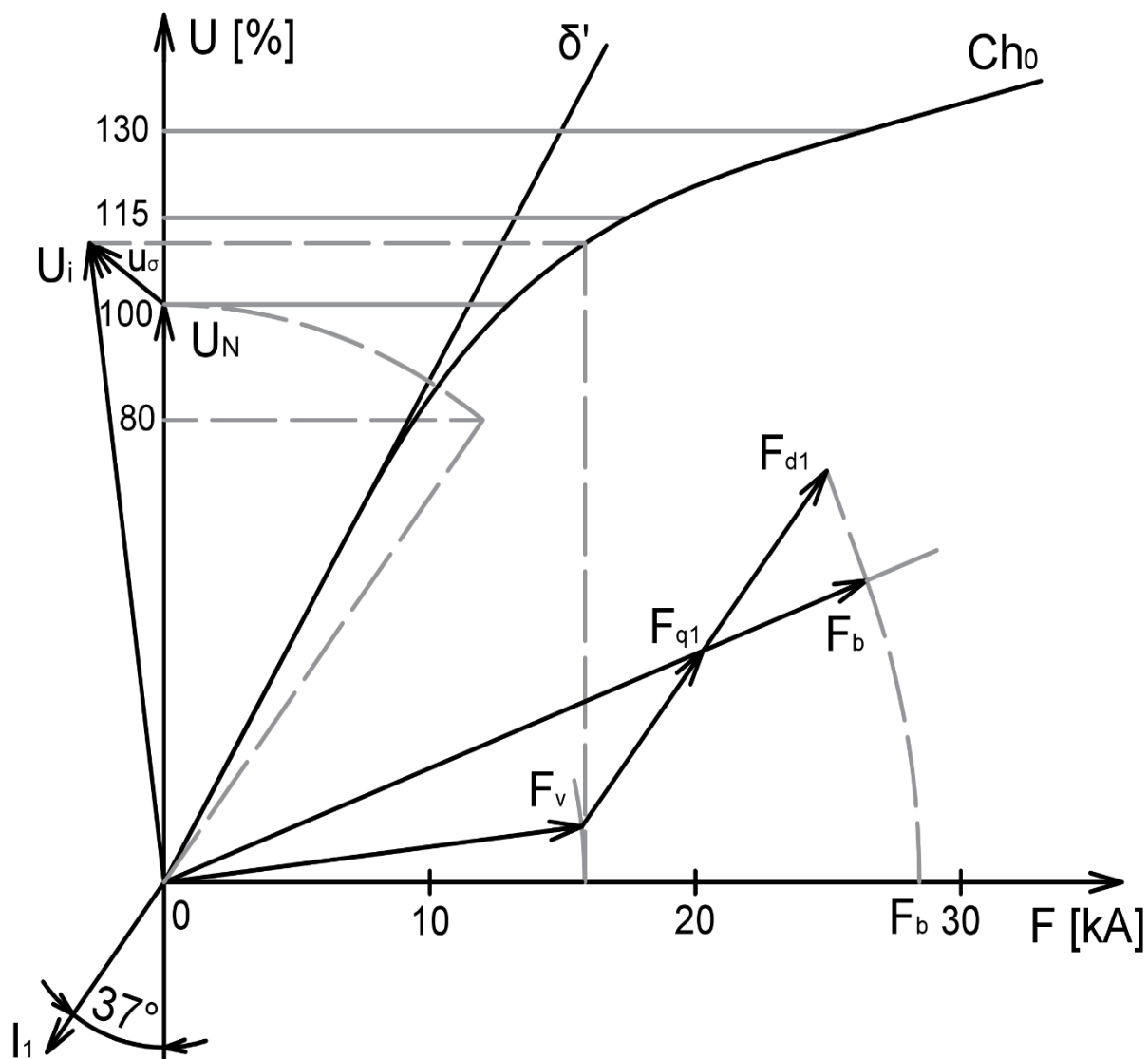
$$H_{zstř} = \frac{H_{z1} + 4 \cdot H_{z2} + H_{z3}}{6} \quad (2.91)$$

Magnetické napětí v zubové části:

$$F_z = H_{zstř} \cdot h_d \quad (2.92)$$

Tab. č. 2.6: Charakteristika výsledná.

		1,00 · Φ			1,15 · Φ			1,30 · Φ		
		B [T]	H [A/m]	F [A]	B [T]	H [A/m]	F [A]	B [T]	H [A/m]	F [A]
Vzd. mezera	δ = 0,01839	0,86		11595	0,99		13334	1,12		15073
Zub	Hlava	k _{z1} = 1,00	B _{z1'} [T]	1,72	6000		23000		2,24	46000
			B _{z1} [T]	1,7					1,98	
	Střed	k _{z2} = 0,89	B _{z2'} [T]	1,63	4700		14500		2,12	29000
			B _{z2} [T]	1,62					1,87	
	Pata	k _{z3} = 0,81	B _{z3'} [T]	1,55	2800		10000		2,02	23500
			B _{z3} [T]	1,55					1,79	
Stř. hodnota	h _z = 0,115 mm		4600	529		15167	1744		30917	3555
Jádro statoru	l _s = 0,412 mm	1,30	630	259	1,50	1600	658	1,69	6000	2469
ΣF = F _δ + F _z + F _s		12383			15736			21098		
Pól	l _p = 0,248 mm	1,45	2200	547	1,67	6600	1640	1,89	20300	5043
Jho rotoru	l _r = 0,206 mm	1,10	600	123	1,27	950	195	1,43	1800	370
ΣF = F _p + F _r		670			1835			5413		
ΣF = F _δ + F _z + F _s + F _p + F _r		13053			17571			26511		

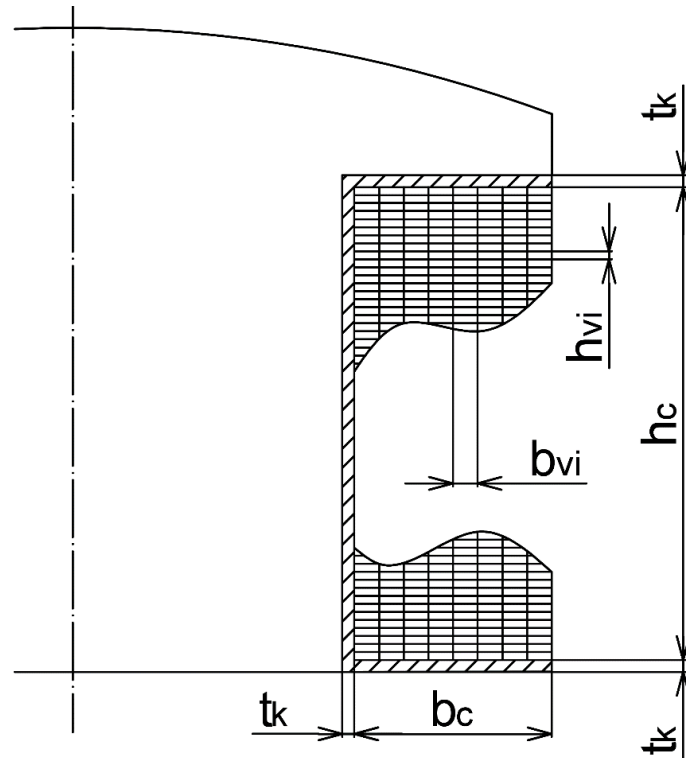


Obr. č. 2.9: Charakteristika naprázdno.

Pomocí grafického postupu (Obr. č. 2.9) jsme zjistili velikost budícího magnetického napětí pro jmenovité zatížení a zadaný účinník: $F_b = 28420$ A.

2.5 Návrh budícího vinutí

Cílem návrhu budícího vinutí je stanovit průřez vodiče a počet závitů cívky. Dále se určí rozměry budící cívky, a to s ohledem na tvar a velikost pólu. [6]



Obr. č. 2.10: Budící vinutí.

2.5.1 Konstrukční výpočty

Přesahující část pólového nástavce:

$$a = \frac{b_n - b_p}{2} = \frac{0,403 - 0,226}{2} = 0,088 \text{ m} \quad (2.93)$$

Tloušťku izolační kostřičky budící cívky t_k volím 5 mm. Pokud nechceme, aby budící cívka přechývala přes okraj pólového nástavce, musí být její šířka menší než 83 mm.

Střední délka závitu budící cívky (předběžná hodnota):

$$l_{bs} = 2 \cdot (L_p + b_p + 2 \cdot a) = 2 \cdot (0,875 + 0,226 + 2 \cdot 0,088) = 2,56 \text{ m} \quad (2.94)$$

Volím budící napětí: $U_b = 400 \text{ V}$, které dosadím do vztahu 2.95. Tento vztah stanoví přibližný průřez vodiče budící cívky.

$$S'_{Cub} = \frac{\rho_{Cu} \cdot l_{bs} \cdot 2 \cdot p \cdot F_b}{0,9 \cdot U_b} = \frac{1}{46} \cdot 2,56 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 28420}{0,9 \cdot 400} = 28,84 \text{ mm}^2 \quad (2.95)$$

Obdobně jako v kapitole 2.3.5 volíme vodič dle normalizovaných rozměrů. Z tabulky v příloze D jsem vybral holý vodič o rozměrech 10 x 3 mm, který má průřez $S_{Cub} = 30 \text{ mm}^2$. Izolovaný vodič má rozměry 10,37 x 3,37 mm.

Pro výpočet budicího proudu I_b je nejprve potřeba zvolit proudovou hustotu: $\sigma_{Cub} = 2 \text{ A/mm}^2$.

$$I_b = \sigma_{Cub} \cdot S_{Cub} = 2 \cdot 30 = 60 \text{ A} \quad (2.96)$$

Počet závitů budicí cívky:

$$N_b = \frac{F_b}{I_b} = \frac{28420}{60} = 474 \quad (2.97)$$

Počet poloh cívky:

$$n_p = \frac{a - t_k}{h_{vi}} = \frac{88,5 - 5}{10,37} = 8,05 \quad (2.98)$$

kde h_{vi} je výška izolovaného vodiče budicí cívky. Jelikož počet poloh cívky musí být celé číslo, zaokrouhlíme výsledek na $n_p = 8$.

Tloušťka cívky:

$$b_c = h_{vi} \cdot n_p = 10,37 \cdot 8 = 82,96 \text{ mm} \quad (2.99)$$

Počet závitů v jedné poloze:

$$N_{p1} = \frac{N_b}{n_p} = \frac{474}{8} = 59,2 \quad (2.100)$$

Počet závitů v jedné poloze musí být opět celé číslo, a proto volím: $N_{p1} = 59$.

Výška budící cívky:

$$h_c = N_{p1} \cdot b_{vi} = 59 \cdot 3,37 = 198,8 \text{ mm} \quad (2.101)$$

kde b_{vi} je šířka izolovaného vodiče budící cívky.

Výška pólu:

$$h_p = h_c + 2 \cdot t_k = 193,8 + 2 \cdot 5 = 208,83 \text{ mm} \quad (2.102)$$

Skutečná výška pólu vyšla o něco vyšší, než jsme odhadovali (vztah 2.79). Poněvadž se jedná o první návrh, tak tento rozdíl lze zanedbat.

2.5.2 Orientační výpočet oteplení budící cívky

Vnější obvod budící cívky:

$$l_{be} = 2 \cdot [L_p + b_p + 4 \cdot (b_c + t_k)] \quad (2.103)$$

$$l_{be} = 2 \cdot [0,875 + 0,226 + 4 \cdot (0,0829 + 0,005)] = 2,9 \text{ m}$$

Střední obvod budící cívky:

$$l_{bs} = 2 \cdot \left[L_p + b_p + 4 \cdot \left(t_k + \frac{b_c}{2} \right) \right] \quad (2.104)$$

$$l_{bs} = 2 \cdot \left[0,875 + 0,226 + 4 \cdot \left(0,005 + \frac{0,0829}{2} \right) \right] = 2,57 \text{ m}$$

Ochlazovací povrch všech cívek:

$$O_{2pc} = h_c \cdot l_{be} \cdot 2 \cdot p = 0,198 \cdot 2,9 \cdot 2 \cdot 4 = 4,62 \text{ m}^2 \quad (2.105)$$

Odpor všech budících cívek:

$$R_{b/75} = 1,22 \cdot \rho \cdot \frac{l_{bs} \cdot N_b \cdot 2 \cdot p}{S_{Cub}} = 1,22 \cdot \frac{1}{56} \cdot \frac{2,57 \cdot 474 \cdot 2 \cdot 4}{30} = 7,09 \Omega \quad (2.106)$$

Ztráty v budícím vinutí:

$$\Delta P_{Cub} = R_{b/75} \cdot I_b^2 = 7,09 \cdot 60^2 = 25510 \text{ W} \quad (2.107)$$

Obvodová rychlost rotoru:

$$v_r = \frac{\pi \cdot D_r \cdot n}{60} = \frac{\pi \cdot 1,562 \cdot 750}{60} = 61,38 \text{ m/s} \quad (2.108)$$

Rychlost proudění vzduchu kolem cívký je přibližně třetina z obvodové rychlosti, tedy:

$$v_\delta = \frac{1}{3} \cdot v_r = \frac{1}{3} \cdot 61,38 = 20,46 \text{ m/s} \quad (2.109)$$

Pro výpočet oteplení budící cívký (vztah 2.110) potřebujeme znát součinitel přestupu tepla α , který získáme pomocí grafu v příloze L: $\alpha = 83 \text{ W/}^\circ\text{C} \cdot \text{m}^2$.

Oteplení budící cívký:

$$\Delta \vartheta_{Cub} = \frac{1,18 \cdot \Delta P_{Cub}}{\alpha \cdot O_{2pc}} = \frac{1,18 \cdot 25510}{83 \cdot 4,62} = 78,4 \text{ }^\circ\text{C} \quad (2.110)$$

Oteplení budící cívký vyšlo 78,4 °C, a proto můžeme použít izolaci třídy B, která má maximální přípustné oteplení 80 °C, viz tabulka číslo 4.1.

2.6 Tlumící vinutí

Tlumící vinutí neboli tlumič je uložen v drážkách u povrchu pólového nástavce. U synchronních generátorů slouží k tlumení kývání rotoru, k navýšení dynamické stability, ke snížení zpětné točivé složky pole při nesouměrném zatížení a k zabránění dynamických přetížení při nesouměrném zkratu. [7]

Všechny tyče na čele pólového nástavce jsou spojeny pomocí segmentů nakrátko. Tyto segmenty se velmi často spojují se sousedními segmenty, čímž vznikne uzavřený obvod. Tlumič je vlastně obdoba klece nakrátko asynchronních strojů, s tím rozdílem, že tyče nejsou rozloženy po celém obvodu, ale pouze v pólových nástavcích. [6]

Počet tyčí na jednom pólovém nástavci se většinou volí v rozmezí 5 až 10. [7] Rozteč tyčí po obvodu lze vypočítat pomocí vztahu 2.111a nebo 2.111b. Zvolíme ten vztah, který nám splní podmínku na požadovaný počet tyčí.

$$t'_t = (0,8 \div 0,9) \cdot t_{d1} \quad (2.111a)$$

$$t'_t = (1,1 \div 1,2) \cdot t_{d1} \quad (2.111b)$$

Rozteč tyčí po obvodu pólového nástavce:

$$t'_t = 0,9 \cdot t_{d1} = 0,9 \cdot 46 = 41,4 \text{ mm} \quad (2.112)$$

Počet tyčí na pólovém nástavci:

$$Q_{tn} = \frac{b_n}{t'_t} = \frac{403,7}{41,4} = 9,75 \quad (2.113)$$

Výsledek zaokrouhlíme na nejbližší celé číslo, tedy: $Q_{tn} = 10$.

Průřez všech tyčí:

$$\sum S_t = 0,2 \cdot n_d \cdot Q \cdot S_{Cu1} = 0,2 \cdot 4 \cdot 108 \cdot 201,6 = 17418 \text{ mm}^2 \quad (2.114)$$

Průřez jedné tyče:

$$S_t = \frac{\sum S_t}{2 \cdot p \cdot Q_{tn}} = \frac{17418}{2 \cdot 4 \cdot 10} = 217 \text{ mm}^2 \quad (2.115)$$

Průměr jedné tyče:

$$d_t = \sqrt{\frac{4 \cdot S_t}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 217}{\pi}} = 16,6 \text{ mm} \quad (2.116)$$

Průřez kruhu nakrátko:

$$S_{kn} = 0,45 \cdot S_t \cdot Q_{tn} = 0,45 \cdot 217 \cdot 10 = 979,8 \text{ mm}^2 \quad (2.117)$$

2.7 Kroužky a kartáče

Základní údaje elektrografitových kartáčů, které slouží k přenosu proudu do budícího vinutí:

- přechodové napětí: $u_{př} = 2,1V$,
- maximální proudové zatížení: $\sigma_k = 10A/cm^2$,
- maximální obvodová rychlost: $v_0 = 40 m/s$,
- měrný tlak: $P_k = 18 kPa$,
- součinitel tření: $\mu = 0,15$.

Celkový průřez kartáčů jedné polarity:

$$S_k = \frac{I_b}{\sigma_k} = \frac{60}{10} = 6 \text{ cm}^2 \quad (2.118)$$

Rozměry kartáčů se volí podle doporučených hodnot: $b_k \times l_k = 32 \times 10$, kde b_k je šířka kroužku v osové směru a l_k je délka kroužku v obvodovém směru. Těmto rozměrům odpovídá průřez: $S_{k1} = 3,2 \text{ cm}^2$.

Počet kartáčů jedné polarity na obvodu kroužku:

$$i_k = \frac{S_k}{S_{k1}} = \frac{6}{3,2} = 1,88 \quad (2.119)$$

Zvolíme nejbližší celé číslo, tedy: $i_k = 2$.

Nyní je potřeba provést kontrolu, zda navržené kartáče vyhovují maximální obvodové rychlosti a zda se kartáče vtěsňají na obvod kroužků.

Vnější průměr kroužků:

$$D_k = 1,3 \cdot d_H = 1,3 \cdot 0,29 = 0,37 \text{ m} \quad (2.120)$$

kde d_H je průměr hřídele v místě přívodu mechanické energie a je vypočten v kapitole 3.1.

Obvodová rychlost kroužků:

$$v_k = \frac{\pi \cdot D_k \cdot n_{max}}{60} = \frac{\pi \cdot 0,37 \cdot 900}{60} = 17,6 \text{ m/s} \quad (2.121)$$

Obvodová rychlost kroužků vychází více než dvakrát menší, než je maximální dovolená hodnota. To znamená, že z hlediska rychlosti navržené kartáče vyhovují.

Rozteč kartáčů jedné polarity:

$$t_k = \frac{\pi \cdot D_k}{i_k} = \frac{\pi \cdot 0,37}{2} = 0,586 \text{ m} \quad (2.122)$$

Rozteč kartáčů je několikanásobně vyšší než délka kartáče l_k , což opět potvrzuje správnost návrhu.

2.8 Ztráty a účinnost

V synchronním stroji existuje několik zdrojů ztrát, které se následně přemění v teplo. Vlivem toho dojde k oteplení stroje, což má za následek snížení účinnosti. [6]

2.8.1 Jouleovy ztráty

Jouleovy ztráty ve vinutí statoru:

V drážkové části:

$$\Delta P_{Cu1d} = m \cdot R_{1d/75} \cdot I_1^2 = 3 \cdot 0,0151 \cdot 824,7^2 = 30742 \text{ W} \quad (2.123)$$

V čelech:

$$\Delta P_{Cu1\check{c}} = m \cdot R_{1\check{c}/75} \cdot I_1^2 = 3 \cdot 0,0134 \cdot 824,7^2 = 27329 \text{ W} \quad (2.124)$$

Celkové:

$$\Delta P_{Cu1} = \Delta P_{Cu1d} + \Delta P_{Cu1\check{c}} = 30742 + 27329 = 58071 \text{ W} \quad (2.125)$$

Jouleovy ztráty v budícím vinutí:

$$\Delta P_{Cub} = R_{Cub} \cdot I_b^2 = 7,09 \cdot 60^2 = 25510 \text{ W} \quad (2.126)$$

2.8.2 Ztráty v železe

Ztráty v železe se vyskytují v jádře statoru i v zubech statoru. Skládají se ze ztrát hysterezních a ztrát vířivými proudy. Dané ztráty závisí na kvalitě oceli, tloušťce plechů, magnetické indukci a frekvenci. Pro výpočet se využívá empirický vztah. [7] Pro následující výpočty volím ztrátové číslo plechů $\Delta p_{Fe} = 1,8 \text{ W/kg}$.

V jádře statoru:

Vnější průměr statoru:

$$D_{je} = D_1 + 2 \cdot (h_d + h_{js}) = 1,58 + 2 \cdot (0,115 + 0,14) = 2,096 \text{ m} \quad (2.127)$$

Hmotnost jádra statoru:

$$m_{Fej} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_{je}^2 - D_3^2) \cdot l_e \cdot k_{Fe} \cdot \rho_{Fe} \quad (2.128)$$

$$m_{Fej} = \frac{\pi}{4} \cdot (2,09^2 - 1,81^2) \cdot 0,7 \cdot 0,92 \cdot 7800 = 4604,5 \text{ kg}$$

Ztráty v jádře statoru:

$$\Delta P_{Fej} = 1,8 \cdot \Delta p_{Fe} \cdot B_{js}^2 \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} \cdot m_{Fej} = 1,8 \cdot 1,8 \cdot 1,3^2 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1,3} \cdot 4604,5 \quad (2.129)$$

$$\Delta P_{Fej} = 25212 \text{ W}$$

V zubech statoru:

Hmotnost zubů statoru:

$$m_{Fez} = Q \cdot z_2 \cdot h_d \cdot l_e \cdot k_{Fe} \cdot \rho_{Fe} = 108 \cdot 0,028 \cdot 0,115 \cdot 0,7 \cdot 0,92 \cdot 7800 \quad (2.130)$$

$$m_{Fez} = 1857 \text{ kg}$$

Ztráty v zubech statoru:

$$\Delta P_{Fez} = 12 \cdot \Delta p_{Fe} \cdot B_{z2}^2 \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} \cdot m_{Fez} = 12 \cdot 1,8 \cdot 1,3^2 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1,3} \cdot 1857 \quad (2.131)$$

$$\Delta P_{Fez} = 17544 \text{ W}$$

2.8.3 Povrchové ztráty

Vlivem drážkování statoru (rozdílná vzduchová mezera proti zubu a proti drážce) dochází ke kolísání magnetické indukce ve vzduchové mezeře a kvůli tomu vznikají na povrchu pólového nástavce povrchové ztráty. [6]

$$\Delta P_p = \frac{\pi}{2} \cdot D_1 \cdot \alpha \cdot L_p \cdot k_0 \cdot \left(\frac{Q \cdot n}{10000} \right)^{1,5} \cdot (t_{d1} \cdot \beta \cdot 1000 \cdot B_\delta \cdot k_{cd})^2 \quad (2.132)$$

$$\Delta P_p = \frac{\pi}{2} \cdot 1,58 \cdot 0,65 \cdot 0,87 \cdot 4,6 \cdot \left(\frac{108 \cdot 750}{10000} \right)^{1,5} \cdot (0,05 \cdot 0,06 \cdot 1000 \cdot 0,86 \cdot 1,085)^2$$

$$\Delta P_p = 1598 \text{ W}$$

kde k_0 a β jsou činitele povrchových ztrát a určují se z grafu, viz příloha K.

2.8.4 Mechanické ztráty

Mechanické ztráty obsahují ztráty způsobené třením v ložiskách a ztráty ventilační. Jelikož je určení všech parametrů složité využívá se opět zjednodušený empirický vztah. [6]

$$\Delta P_m = v_r^{2,5} \cdot D_1 \cdot \sqrt{l_e} = 621^{2,5} \cdot 1,58 \cdot \sqrt{0,7} = 41208 \text{ W} \quad (2.133)$$

2.8.5 Přídavné ztráty

Přídavné ztráty vznikají jednak vlivem vířivých proudů ve statorovém vinutí i v železe statoru. Dále mohou vznikat přídavné ztráty v pólových nástavcích vlivem vyšších harmonických magnetického pole kotvy. [7]

$$\Delta P_{př} = 0,003 \cdot S = 0,003 \cdot 9000 \cdot 10^3 = 27000 \text{ W} \quad (2.134)$$

2.8.6 Celkové ztráty

$$\Delta P = \Delta P_{Cu1} + \Delta P_{Cub} + \Delta P_{Fej} + \Delta P_{Fez} + \Delta P_p + \Delta P_m + \Delta P_{př} \quad (2.135)$$

$$\Delta P = 58071 + 25510 + 25212 + 17544 + 1598 + 41208 + 27000 = 196144 \text{ W}$$

2.8.7 Účinnost

$$\eta = \left(\frac{P}{P + \Delta P} \right) \cdot 100 = \left(\frac{7200}{7200 + 196,144} \right) = 97,3 \% \quad (2.136)$$

3 Mechanické výpočty

Výpočty v kapitolách (3.1-3) uvádím, protože součástí této práce jsou výkresy navrženého stroje (podélný řez – příloha M, N; příčný řez – příloha O).

3.1 Stanovení průměrů hřídele

Průměr hřídele v místě přívodu mechanické energie:

$$d_H = 0,135 \cdot \sqrt[3]{\frac{P}{n}} = 0,135 \cdot \sqrt[3]{\frac{9000}{750}} = 0,29 \text{ m} \quad (3.1)$$

Průměr hřídele v nejširším místě:

$$D_H = (1,2 \div 1,8) \cdot d_H = 1,5 \cdot 0,29 = 0,43 \text{ m} \quad (3.2)$$

Průměr jha rotoru:

$$D_{jr} = D_1 - 2 \cdot (\delta + h_p + h_n) \quad (3.3)$$

$$D_{jr} = 1,58 - 2 \cdot (0,018 + 0,186 + 0,062) = 1,05 \text{ m}$$

Jelikož u jha rotoru vychází velký průměr, tak jho nebude součástí hřídele, ale bude nasazeno na hřídel samostatně.

3.2 Výpočet odstředivé síly pólů

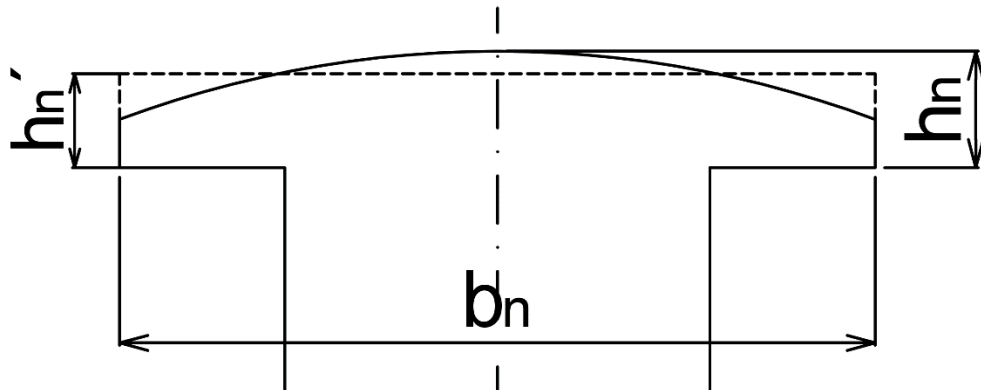
Velikost odstředivé síly pólů s cívkou počítáme z toho důvodu, abychom mohli určit způsob připevnění pólu ke jhu rotoru. Póly mohou být přichyceny pomocí šroubů, což je nejlevnější varianta, ale použitelná pouze pro malé odstředivé síly. Pro větší odstředivé síly se k uchycení používají kladiva nebo rybiny. [8]

Hmotnost pólu:

$$m_p = \rho_{Cu} \cdot h_p \cdot b_p \cdot L_p = 7800 \cdot 0,186 \cdot 0,227 \cdot 0,87 = 288,2 \text{ kg} \quad (3.4)$$

Hmotnost pólového nástavce:

$$m_n = \rho_{Cu} \cdot h'_n \cdot b_n \cdot L_n = 7800 \cdot 0,05 \cdot 0,404 \cdot 1,05 = 165,5 \text{ kg} \quad (3.5)$$



Obr. č. 3.1: Znárodnění náhradní výšky pólového nástavce.

Délka pólového nástavce:

$$L_n = L_p + (b_n - b_p) = 0,87 + (0,404 - 0,227) = 1,05 \text{ m} \quad (3.6)$$

Hmotnost cívky:

$$m_{cub} = \rho_{Cu} \cdot S_b \cdot l_{bs} \cdot N_b = 8900 \cdot 3 \cdot 10^{-5} \cdot 2,57 \cdot 474 = 323,4 \text{ kg} \quad (3.7)$$

Poloměr těžiště pólu r_p a cívky r_c :

$$r_p = r_c = \frac{1}{2} \cdot (D_1 - 2 \cdot \delta - 2 \cdot h_n - h_p) \quad (3.8)$$

$$r_p = r_c = \frac{1}{2} \cdot (1,58 - 2 \cdot 0,018 - 2 \cdot 0,062 - 0,186) = 0,617 \text{ m}$$

Poloměr těžiště pólového nástavce:

$$r_n = \frac{1}{2} \cdot (D_1 - 2 \cdot \delta - h_n) = \frac{1}{2} \cdot (1,58 - 2 \cdot 0,018 - 0,062) = 0,71 \text{ m} \quad (3.9)$$

Úhlová rychlost:

$$\omega_m = \frac{\pi \cdot 1,2 \cdot n}{30} = \frac{\pi \cdot 1,2 \cdot 750}{30} = 94,2 \text{ 1/s} \quad (3.10)$$

Velikost odstředivé síly pólu s cívkou:

$$F_p = \omega_m^2 \cdot [(m_p + m_{Cub}) \cdot r_p + m_n \cdot r_n] \quad (3.11)$$

$$F_p = 94,2^2 \cdot [(288,2 + 323,4) \cdot 0,617 + 165,5 \cdot 0,71] = 4,397 \cdot 10^6 \text{ N}$$

Odstředivá síla na jednotku délky pólu:

$$F_{p1} = \frac{F_p}{L_p} = \frac{4,397 \cdot 10^6}{0,87} = 5,02 \cdot 10^6 \text{ N/m} \quad (3.12)$$

Jelikož síla F_{p1} vyšla větší než $2,5 \cdot 10^6 \text{ N/m}$, tak budou póly přichyceny pomocí kladiv.

3.3 Návrh rozměrů kladiva

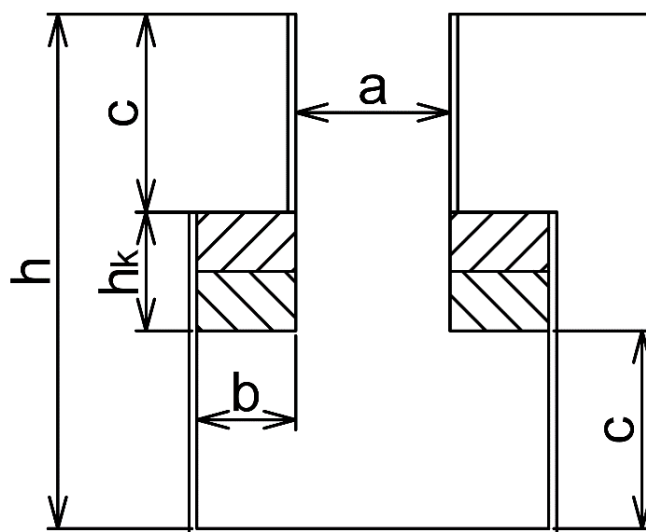
Šířka kladiva v krčku:

$$a = \frac{F_{p1}}{\sigma_{dov}} = \frac{5,02 \cdot 10^6}{130 \cdot 10^6} = 0,039 \text{ m} \quad (3.13)$$

kde σ_{dov} je dovolené mechanické napětí.

Vzhledem k určité rezervě volím: $a = 0,055 \text{ m}$. Výška kladiva: $c = a = 0,055 \text{ m}$.

Rozšíření kladiva: $b = \frac{c}{2} = \frac{0,055}{2} = 0,0275 \text{ m}$.



Obr. č. 3.2: Rozměry kladiva pro uchycení pólů.

Maximální mechanické napětí:

$$\sigma_{cmax} = \frac{F_{p1}}{c} \cdot \left[\frac{3 \cdot b}{4 \cdot c} + \sqrt{1 + \left(\frac{3 \cdot b}{4 \cdot c} \right)^2} \right] \quad (3.14)$$

$$\sigma_{cmax} = \frac{5,02 \cdot 10^6}{0,055} \cdot \left[\frac{3 \cdot 0,0275}{4 \cdot 0,055} + \sqrt{1 + \left(\frac{3 \cdot 0,0275}{4 \cdot 0,055} \right)^2} \right] = 125,6 \cdot 10^6 \text{ MPa}$$

Z hlediska mechanického napětí je návrh rozměrů kladiva v pořádku, jelikož je splněna podmínka: $\sigma_{cmax} < \sigma_{dov}$. Nicméně při kreslení příčného řezu se zjistilo, že výhodnější budou dvě kladiva o polovičních rozměrech.

3.4 Stanovení počtu mezipólových rozpěrek

Vzdálenost těžiště cívky od osy pólu:

$$e = \frac{b_p}{2} + b_c + t_k = \frac{0,23}{2} + 0,083 + 0,005 = 0,201 \text{ m} \quad (3.15)$$

Rozteč rozpěrek:

$$t = \frac{1}{\omega_m} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \sigma_{dov} \cdot b_v}{\rho \cdot e}} = \frac{1}{94,2} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 130 \cdot 10^6 \cdot 0,003}{8900 \cdot 0,201}} = 0,221 \text{ m} \quad (3.16)$$

Počet rozpěrek:

$$i = \frac{L_p}{t} - 1 = \frac{0,875}{0,221} - 1 = 2,95 \quad (3.17)$$

Z výpočtu vychází, že mezi jednotlivými póly budou 3 rozpěrky.

4 Tepelné obvody

4.1 Obecné poznatky

Při práci elektrického stroje vzniká teplo, které zahřívá jeho jednotlivé části a tím se zvyšuje jejich teplota. [7] V elektrickém stroji je na teplo nejvíce náchylná izolace vinutí, která se vlivem vysoké teploty může poškodit nebo i zničit. Z toho důvodu provádíme výpočet maximálního oteplení. Toto oteplení nesmí přesáhnout tepelnou odolnost použité izolace. Podle tepelné odolnosti se izolační materiály dělí na jednotlivé třídy (viz tabulka 4.1). [6]

Tab. č. 4.1: Třídy izolačních materiálů. [6]

Třída	Y	A	E	B	F	H	C
Max. teplota [°C]	90	105	120	130	155	180	Nad 180
Max. oteplení [°C]	45	60	75	80	105	130	Nad 130

Pozn.: Teplota je stav daného místa či objektu a lze ji zjistit pomocí čidla (termočlánek, teploměr, termistor). Oteplení $\Delta\vartheta$ je rozdíl teploty některé části stroje od teploty okolního prostředí, tedy:

$$\Delta\vartheta = \vartheta - \vartheta_0. [6] \quad (4.1)$$

Oteplení elektrického stroje závisí také na druhu zatížení. Podle pracovního režimu elektrických strojů rozlišujeme dva druhy výpočtů:

- výpočet ustáleného oteplení (trvalý chod),
- výpočet přechodných tepelných dějů (krátkodobý chod, přerušovaný chod). [7]

Elektrické stroje se běžně provozují v trvalém chodu, a proto postačí výpočet ustáleného oteplení. Nicméně některé elektrické stroje pracují v regulovaných pohonech a potom je nutné spočítat i přechodné tepelné děje, které přinášejí řadu komplikací. [7]

Způsoby šíření tepla:

- Vedení tepla

Vedení tepla se uplatňuje uvnitř látky. Pro vedení tepla je určující měrná tepelná vodivost dané látky. Jedná o fyzikální vlastnost látky, a proto se uvádí ve fyzikálních tabulkách. [6]

Pro vedení tepla v trojrozměrném anizotropním prostředí lze odvodit následující rovnici.

$$\lambda_x \cdot \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial \vartheta_x^2} + \lambda_y \cdot \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial \vartheta_y^2} + \lambda_z \cdot \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial \vartheta_z^2} = -q' + c \cdot \rho \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial t} \quad (4.2)$$

- Přestup tepla

K přestupu tepla dochází na rozhraní dvou látek s různou teplotou. Dochází tedy k přenesení tepla z povrchu ochlazovaného tělesa do okolního prostředí (proudícího). Přestup tepla je charakterizován součinitelem přestupu tepla α . Tento součinitel neuvádí žádnou vlastnost látky, a proto není uváděn ve fyzikálních tabulkách. Nicméně je závislý na fyzikálních vlastnostech ochlazovaného prostředí. [6]

- Sálání

Sálání je třetí způsob sdílení tepla a představuje vyzařování tepla z povrchu tělesa do okolního prostředí. U elektrických strojů lze sálání zanedbat, jelikož se uplatňuje až při vyšších teplotách. [6]

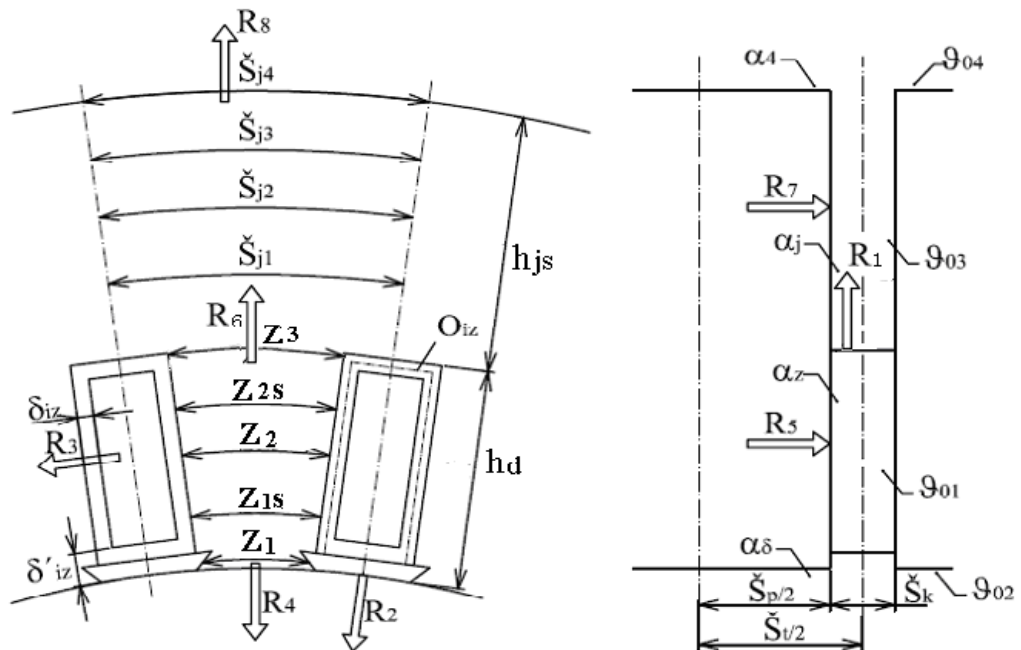
Metoda náhradních tepelných obvodů

Při návrhu elektrických strojů se velmi rozšířila metoda náhradních tepelných obvodů, která využívá tepelných odporů. [7] Pro řešení tepelných obvodů lze použít elektroanalogii, která využívá předpokladu, že tyto obvody jsou ekvivalentní s elektrickými obvody. Díky tomu můžeme aplikovat například Ohmův zákon či Kirchhoffovy zákony. Podstata řešení této metody spočívá v rozdělení stroje na jednotlivé prvky. Teplota prvku je dána teplotou v uzlu. Je pochopitelné, že čím větší počet prvků zvolíme, tím budeme mít přesnější výpočet. S rostoucím počtem prvků však roste i náročnost na výpočet. Z toho důvodu musíme zvolit určitý kompromis mezi přesností a obtížností výpočtu. V elektrických strojích využíváme hrubé dělení prvků, kde prvky představují jednotlivé části stroje (čela vinutí, drážková část vinutí, zub statoru apod.). [6]

V kapitole 4.2 a 4.3 se provádí výpočet oteplení drážkové části a čel bez uvažování podélného šíření tepla. V těchto kapitolách opět postupuji dle materiálu uvedeného v [5].

4.2 Výpočet oteplení cívky kotvy bez uvažování podélného šíření tepla – drážková část statorového vinutí

V první řadě musíme, z celé kotvy stroje, vybrat co nejmenší úsek, tak aby všechny ostatní úseky měly shodné tepelné a chladicí podmínky. Vybraný úsek představuje jednu drážkovou rozteč a polovinu rozteče radiálního ventilačního kanálu, viz obrázek 4.1. Pro tento úsek musíme určit příslušné rozměry a také ztráty, které ve vymezeném úseku vznikají. [6]



Obr. č. 4.1: Vymezený úsek. [5]

4.2.1 Určení rozměrů ve vymezeném úseku stroje

Pro dosažení co nejvyšší přesnosti jsem si nakreslil vymezený úsek pomocí softwaru AutoCAD a následně jsem změřil všechny potřebné rozměry: $\delta_{iz} = 0,0041 \text{ m}$, $\delta'_{iz} = 0,0146 \text{ m}$, $z_2 = 0,0283 \text{ m}$, $z_{1s} = 0,0266 \text{ m}$, $z_{2s} = 0,0299 \text{ m}$, $\check{s}_{j1} = 0,0547 \text{ m}$, $\check{s}_{j2} = 0,0568 \text{ m}$, $\check{s}_{j3} = 0,0589 \text{ m}$, $\check{s}_{j4} = 0,0609 \text{ m}$.

4.2.2 Ztráty ve vybraných úsecích

Ztráty ve vinutí statoru:

$$\Delta P_{Cud1} = \frac{\Delta P_{Cud}}{2 \cdot Q \cdot i} = \frac{30742}{2 \cdot 108 \cdot 15} = 9,49 \text{ W} \quad (4.3)$$

Ztráty v zubu kotvy:

$$\Delta P_{Fez1} = \frac{\Delta P_{Fez}}{2 \cdot Q \cdot i} = \frac{17544}{2 \cdot 108 \cdot 15} = 5,41 \text{ W} \quad (4.4)$$

Ztráty ve jhu kotvy:

$$\Delta P_{Fej1} = \frac{\Delta P_{Fej}}{2 \cdot Q \cdot i} = \frac{25212}{2 \cdot 108 \cdot 15} = 7,78 \text{ W} \quad (4.5)$$

4.2.3 Výpočet potřebného množství chladiva

Pro stroje malých a středních výkonů se jako chladicí médium využívá vzduch, jelikož je volně dostupný, a tudíž i nejlevnější. Vzduch však nesmí obsahovat znečišťující (agresivní) příměsi. Pro určení potřebného množství vzduchu všemi kanály využijeme kalorimetrickou rovnici (vztah 4.7). Abychom mohli tuto rovnici vypočítat, tak si musíme stanovit ztráty odváděné rotorovou větví (vztah 4.6) a určit maximální oteplení vzduchu $\Delta\vartheta$, který proudí radiálním kanálem. Vycházíme z normy, že chladicí vzduch, který projde celým strojem se nesmí ohřát o více než 20 °C. Dále předpokládáme, že vzduch procházející rotorem se oteplí o 5 °C. Z toho nám vyplývá: $\Delta\vartheta = 15 \text{ °C}$. [6]

Ztráty odváděné rotorovou větví:

$$\Delta P_{rv} = \Delta P - (\Delta P_{Cuč} + \Delta P_m + \Delta P_{př}) \quad (4.6)$$

$$\Delta P_{rv} = 196\,143 - (27\,329 + 41\,208 + 27\,000) = 100\,606 \text{ W}$$

Průtočné množství vzduchu všemi kanály:

$$Q_{rv} = \frac{\Delta P_{rv}}{c_v \cdot \Delta\vartheta} = \frac{100\,606}{1250 \cdot 15} = 5,4 \text{ m}^3/\text{s} \quad (4.7)$$

kde c_v je objemové měrné teplo chladiva (pro vzduch: $c_v = 1250 \text{ W} \cdot \text{s}/\text{°C} \cdot \text{m}^3$).

Množství vzduchu na jeden kanál a drážkovou rozteč:

$$Q_{r1} = \frac{Q_{rv}}{Q \cdot i_p} = \frac{5,4}{108 \cdot 15} = 0,0033 \text{ m}^3/\text{s} \quad (4.8)$$

4.2.4 Stanovení součinitelů přestupu tepla

Součinitel přestupu tepla je jedním ze základních parametrů tepelného výpočtu. [6] Všechny následující součinitelé se určí z grafu, který je uveden v příloze L. Pro odečet v tomto grafu musíme znát střední rychlost proudění vzduchu v příslušné oblasti.

Součinitel přestupu tepla ve vzduchové mezeře

Střední rychlosti proudění vzduchu ve vzduchové mezeře je již určena ve vztahu (2.109), tedy: $v_{\delta} = 20,46 \text{ m/s}$.

Po odečtení z grafu v příloze L jsem získal součinitel přestupu tepla: $\alpha_{\delta} = 83 \text{ W/}^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^2$.

Součinitel přestupu tepla v radiálním kanálu v oblasti zubu

Střední rychlosti proudění vzduchu:

$$v_{kz} = \frac{Q_{r1}}{\check{s}_{z3} \cdot \check{s}_k} = \frac{0,0033}{0,0283 \cdot 0,01} = 11,7 \text{ m/s} \quad (4.9)$$

Po odečtení z grafu v příloze L jsem získal součinitel přestupu tepla: $\alpha_z = 57 \text{ W/}^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^2$.

Součinitel přestupu tepla v radiálním kanálu v oblasti jha

Střední rychlosti proudění vzduchu:

$$v_{kj} = \frac{Q_{r1}}{\check{s}_{j2} \cdot \check{s}_k} = \frac{0,0033}{0,0568 \cdot 0,01} = 5,8 \text{ m/s} \quad (4.10)$$

Po odečtení z grafu v příloze L jsem získal součinitel přestupu tepla: $\alpha_j = 46 \text{ W/}^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^2$.

Součinitel přestupu tepla na výstupu z radiálního kanálu

Střední rychlosti proudění vzduchu:

$$v_4 = \frac{Q_{r1}}{\check{s}_{j4} \cdot \check{s}_k} = \frac{0,0033}{0,0609 \cdot 0,01} = 5,4 \text{ m/s} \quad (4.11)$$

Po odečtení z grafu v příloze L jsem získal součinitel přestupu tepla: $\alpha_4 = 41 \text{ W/}^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^2$.

4.2.5 Okolní teploty ve vymezeném úseku stroje

Do statoru (radiálního kanálu) vstupuje chladící vzduch ze vzduchové mezery, který je ohřátý od ztrát vzniklých v rotoru stroje. Vzduch procházející radiálním kanálem postupně přibírá ztráty z induktu a tím se zvyšuje jeho teplota. Průběh zvyšující se teploty vzduchu je uveden na obrázku číslo 4.2. [6] Jelikož za teplotu okolí ϑ_0 dosadím $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, tak se u výsledku nejedná o teplotu, ale o oteplení.

Oteplení chladiva ve vzduchové mezeře:

$$\vartheta_{02} = \vartheta_0 + \frac{\Delta P_{rot}}{c_v \cdot Q_{rv}} = 0 + \frac{25510 + 1598}{1250 \cdot 5,4} = 4,04\text{ }^{\circ}\text{C} \quad (4.12)$$

Oteplení chladiva v okolí zubu kanálu:

$$\vartheta_{01} = \vartheta_{02} + \frac{\Delta P_{Fez} + \Delta P_{Cud}}{2 \cdot c_v \cdot Q_{rv}} = 4,04 + \frac{17544 + 30741}{2 \cdot 1250 \cdot 5,4} = 7,64\text{ }^{\circ}\text{C} \quad (4.13)$$

Oteplení chladiva v okolí jha kotvy kanálu:

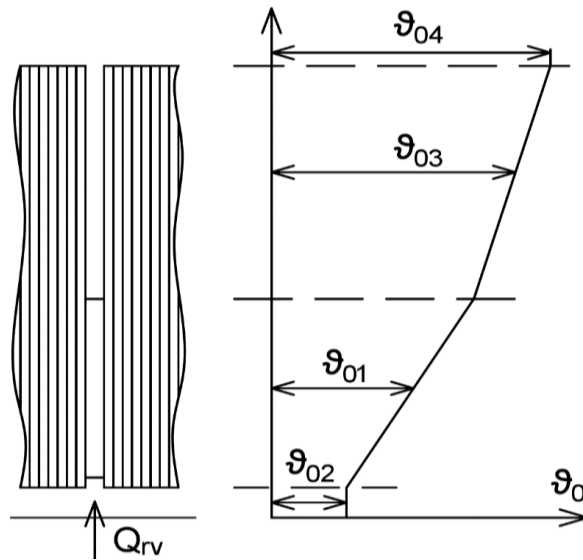
$$\vartheta_{03} = \vartheta_{02} + \frac{\Delta P_{Fez} + \Delta P_{Cud} + \frac{1}{2} \cdot \Delta P_{Fej}}{c_v \cdot Q_{rv}} \quad (4.14)$$

$$\vartheta_{03} = 4,04 + \frac{17544 + 30741 + \frac{1}{2} \cdot 25212}{1250 \cdot 5,4} = 13,12\text{ }^{\circ}\text{C}$$

Oteplení chladiva vystupujícího z kanálu:

$$\vartheta_{04} = \vartheta_{02} + \frac{\Delta P_{Fez} + \Delta P_{Cud} + \Delta P_{Fej}}{c_v \cdot Q_{rv}} \quad (4.15)$$

$$\vartheta_{04} = 4,04 + \frac{17544 + 30741 + 25212}{1250 \cdot 5,4} = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$$



Obr. č. 4.2: Průběh teploty vzduchu v radiálním kanálu.

4.2.6 Výpočet tepelných odporů

Konstanty potřebné pro následující výpočtech tepelných odporů:

- měrná tepelná vodivost izolace: $\lambda_{iz} = 0,2 \text{ W}/^\circ\text{C} \cdot \text{m}$,
- měrná tepelná vodivost plechového svazku v podélném směru: $\lambda_{Fed} = 45 \text{ W}/^\circ\text{C} \cdot \text{m}$,
- měrná tepelná vodivost plechového svazku v příčném směru: $\lambda_{Feq} = 1 \text{ W}/^\circ\text{C} \cdot \text{m}$,
- měrná tepelná vodivost vzduchu: $\lambda_{vzd} = 0,028 \text{ W}/^\circ\text{C} \cdot \text{m}$.

U elektrických strojů se převážně používá ovíjená izolace, která způsobí vznik vzduchových vrstviček mezi jednotlivými vrstvami izolace. Celkový součet vzduchových vrstviček závisí na tloušťce izolace a na technologickém postupu, volím tedy: $\delta_{vzd} = 0,0001 \text{ m}$. [6]

Obvod izolace vodiče:

$$O_{iz} = 2 \cdot h_d + b_d = 2 \cdot 0,115 + 0,021 = 0,251 \text{ m} \quad (4.16)$$

Tepelný odpor ze satorového vinutí do ventilačního kanálu:

$$R_1 = \frac{\delta_{iz}}{\lambda_{iz} \cdot O_{iz} \cdot \frac{\check{s}_k}{2}} + \frac{\delta_{vzd}}{\lambda_{vzd} \cdot O_{iz} \cdot \frac{\check{s}_k}{2}} + \frac{1}{\alpha_z \cdot O_{iz} \cdot \frac{\check{s}_k}{2}} \quad (4.17)$$

$$R_1 = \frac{0,0042}{0,2 \cdot 0,251 \cdot \frac{0,01}{2}} + \frac{0,0001}{0,028 \cdot 0,251 \cdot \frac{0,01}{2}} + \frac{1}{57 \cdot 0,251 \cdot \frac{0,01}{2}} = 33,16 \text{ }^\circ\text{C}/\text{W}$$

Tepelný odpor ze satorového vinutí do vzduchové mezery:

$$R_2 = \frac{\delta'_{iz}}{\lambda_{iz} \cdot b_d \cdot \frac{\check{s}_t}{2}} + \frac{\delta_{vzd}}{\lambda_{vzd} \cdot b_d \cdot \frac{\check{s}_t}{2}} + \frac{1}{\alpha_\delta \cdot b_d \cdot \frac{\check{s}_k}{2}} \quad (4.18)$$

$$R_2 = \frac{0,0146}{0,2 \cdot 0,021 \cdot \frac{0,06}{2}} + \frac{0,0001}{0,028 \cdot 0,021 \cdot \frac{0,06}{2}} + \frac{1}{83 \cdot 0,021 \cdot \frac{0,06}{2}} = 140,67 \text{ }^\circ\text{C/W}$$

Tepelný odpor ze satorového vinutí do zuby satoru:

$$R_3 = \frac{\delta_{iz}}{\lambda_{iz} \cdot O_{iz} \cdot \frac{\check{s}_p}{2}} + \frac{\delta_{vzd}}{\lambda_{vzd} \cdot O_{iz} \cdot \frac{\check{s}_p}{2}} + \frac{\frac{z_2}{2}}{3 \cdot \lambda_{Fed} \cdot O_{iz} \cdot \frac{\check{s}_p}{2}} \quad (4.19)$$

$$R_3 = \frac{0,0041}{0,2 \cdot 0,251 \cdot \frac{0,05}{2}} + \frac{0,0001}{0,028 \cdot 0,251 \cdot \frac{0,05}{2}} + \frac{\frac{0,0283}{2}}{3 \cdot 45 \cdot 0,251 \cdot \frac{0,05}{2}} = 3,85 \text{ }^\circ\text{C/W}$$

Tepelný odpor ze zuby satoru do vzduchové mezery:

$$R_4 = \frac{\frac{h_d}{2}}{3 \cdot \lambda_{Feq} \cdot z_{1s} \cdot \frac{\check{s}_p}{2}} + \frac{1}{\alpha_\delta \cdot z_1 \cdot \frac{\check{s}_p}{2}} \quad (4.20)$$

$$R_4 = \frac{\frac{0,115}{2}}{3 \cdot 1 \cdot 0,0266 \cdot \frac{0,05}{2}} + \frac{1}{83 \cdot 0,025 \cdot \frac{0,05}{2}} = 48,1 \text{ }^\circ\text{C/W}$$

Tepelný odpor ze zuby satoru do ventilačního kanálu:

$$R_5 = \frac{\frac{\check{s}_p}{2}}{3 \cdot \lambda_{Feq} \cdot z_2 \cdot h_d} + \frac{1}{\alpha_z \cdot z_2 \cdot h_d} \quad (4.21)$$

$$R_5 = \frac{\frac{0,05}{2}}{3 \cdot 1 \cdot 0,0283 \cdot 0,115} + \frac{1}{57 \cdot 0,0265 \cdot 0,115} = 7,95 \text{ }^\circ\text{C/W}$$

Tepelný odpor z plechů zubu do plechů jha statoru:

$$R_6 = \frac{\frac{h_d}{2}}{3 \cdot \lambda_{Fed} \cdot z_{2s} \cdot \frac{\check{s}_p}{2}} + \frac{\frac{h_{js}}{2}}{3 \cdot \lambda_{Fed} \cdot \check{s}_{j1} \cdot \frac{\check{s}_p}{2}} \quad (4.22)$$

$$R_6 = \frac{\frac{0,115}{2}}{3 \cdot 45 \cdot 0,0299 \cdot \frac{0,05}{2}} + \frac{\frac{0,142}{2}}{3 \cdot 45 \cdot 0,0547 \cdot \frac{0,05}{2}} = 0,95 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

Tepelný odpor z plechů jha statoru do ventilačního kanálu:

$$R_7 = \frac{\frac{\check{s}_p}{2}}{3 \cdot \lambda_{Feq} \cdot \check{s}_{j2} \cdot h_{js}} + \frac{1}{\alpha_j \cdot \check{s}_{j2} \cdot h_{js}} \quad (4.23)$$

$$R_7 = \frac{\frac{0,05}{2}}{3 \cdot 1 \cdot 0,0568 \cdot 0,142} + \frac{1}{46 \cdot 0,0568 \cdot 0,142} = 3,72 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

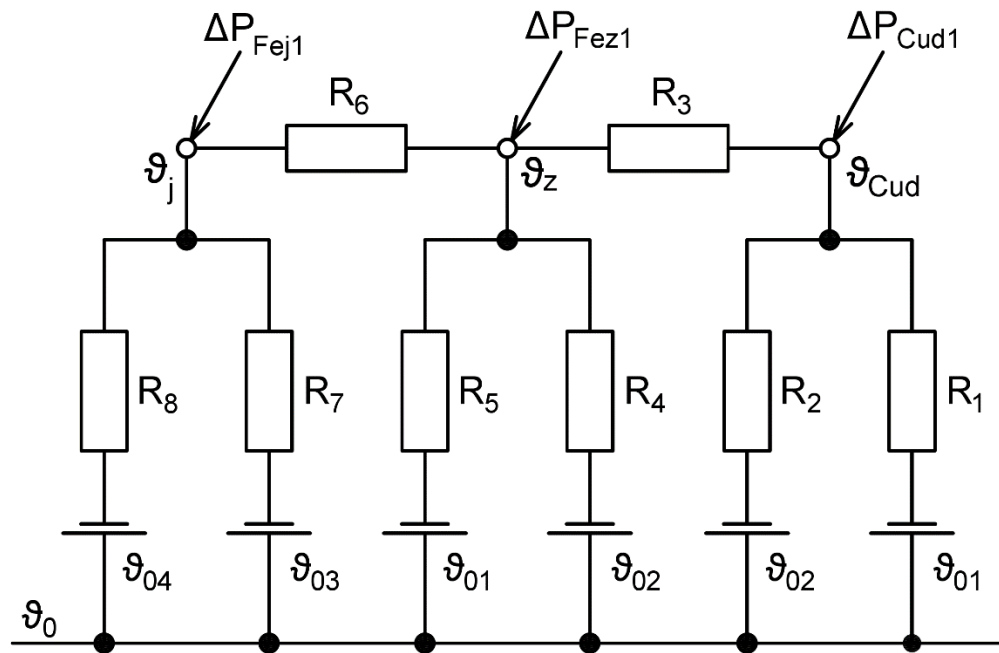
Tepelný odpor z plechů jha statoru na vnější obvod statoru:

$$R_8 = \frac{\frac{h_{js}}{2}}{3 \cdot \lambda_{Fed} \cdot \check{s}_{j3} \cdot \frac{\check{s}_p}{2}} + \frac{1}{\alpha_4 \cdot \check{s}_{j4} \cdot \frac{\check{s}_p}{2}} \quad (4.24)$$

$$R_8 = \frac{\frac{0,142}{2}}{3 \cdot 45 \cdot 0,0589 \cdot \frac{0,05}{2}} + \frac{1}{41 \cdot 0,0609 \cdot \frac{0,05}{2}} = 16,38 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

4.2.7 Sestavení a řešení náhradního tepelného obvodu

Na základě obrázku číslo 4.1 můžeme sestavit schéma pro náhradní tepelný obvod vymezeného úseku (Obr. č. 4.3). Nyní známe všechny potřebné parametry k tomu, abychom vypočítali teploty uzlů (ϑ_{Cud} , ϑ_j , ϑ_z). Vzhledem k tomu, že pro řešení tepelných obvodů můžeme využít elektro analogii, tak daný obvod popíšeme metodou uzlových napětí. Tím získáme soustavu tří lineárně nezávislých rovnic. [6]



Obr. č. 4.3: Schéma náhradního tepleného obvodu vymezeného úseku.

$$\frac{\vartheta_{Cud} - \vartheta_{01}}{R_1} + \frac{\vartheta_{Cud} - \vartheta_{02}}{R_2} + \frac{\vartheta_{Cud} - \vartheta_z}{R_3} = \Delta P_{Cud1} \quad (4.25a)$$

$$\frac{\vartheta_z - \vartheta_{Cud}}{R_3} + \frac{\vartheta_z - \vartheta_{02}}{R_4} + \frac{\vartheta_z - \vartheta_{01}}{R_5} + \frac{\vartheta_z - \vartheta_j}{R_6} = \Delta P_{Fez1} \quad (4.26a)$$

$$\frac{\vartheta_j - \vartheta_z}{R_6} + \frac{\vartheta_j - \vartheta_{03}}{R_7} + \frac{\vartheta_j - \vartheta_{04}}{R_8} = \Delta P_{Fej1} \quad (4.27a)$$

Dále do této soustavy rovnic dosadíme již známé proměnné.

$$\frac{\vartheta_{Cud} - 7,64}{33,16} + \frac{\vartheta_{Cud} - 4,04}{140,67} + \frac{\vartheta_{Cud} - \vartheta_z}{3,85} = 9,49 \quad (4.25b)$$

$$\frac{\vartheta_z - \vartheta_{Cud}}{3,85} + \frac{\vartheta_z - 4,04}{48,1} + \frac{\vartheta_z - 7,64}{7,95} + \frac{\vartheta_z - \vartheta_j}{0,95} = 5,41 \quad (4.26b)$$

$$\frac{\vartheta_j - \vartheta_z}{0,95} + \frac{\vartheta_j - 13,12}{3,72} + \frac{\vartheta_j - 15}{16,38} = 7,78 \quad (4.27b)$$

Nyní soustavu rovnic upravíme do základního tvaru.

$$5,334 \cdot \vartheta_{Cud} - 4,665 \cdot \vartheta_z + 0 \cdot \vartheta_j = 175,08 \quad (4.25c)$$

$$-0,363 \cdot \vartheta_{Cud} + 2,041 \cdot \vartheta_z - 1,472 \cdot \vartheta_j = 9,03 \quad (4.26c)$$

$$0 \cdot \vartheta_{Cud} - 0,061 \cdot \vartheta_z + 0,08 \cdot \vartheta_j = 0,71 \quad (4.27c)$$

Po vyřešení soustavy rovnic získáme oteplení uzlů (částí stroje) nad teplotu okolí:

- drážková část statorového vinutí: $\Delta\vartheta_{Cud} = 82,2 \text{ } ^\circ\text{C}$,
- zub statoru: $\Delta\vartheta_z = 56,4 \text{ } ^\circ\text{C}$,
- jho statoru: $\Delta\vartheta_j = 51,8 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Výsledné oteplení v drážkové části vinutí vyšlo vyšší než $80 \text{ } ^\circ\text{C}$, a proto musíme využít izolaci třídy F, viz tabulka číslo 4.1.

Výslednou teplotu jednotlivých částí stroje lze vypočítat pomocí vztahu 4.1. K oteplení připočteme teplotu okolí, která dle normy činí $40 \text{ } ^\circ\text{C}$.

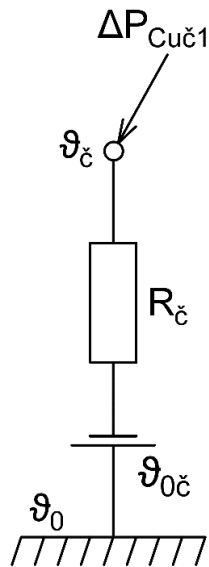
$$\vartheta_{Cud} = \Delta\vartheta_{Cud} + \vartheta_0 = 82,2 + 40 = 122,2 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4.28)$$

$$\vartheta_z = \Delta\vartheta_z + \vartheta_0 = 56,4 + 40 = 96,4 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4.29)$$

$$\vartheta_j = \Delta\vartheta_j + \vartheta_0 = 51,8 + 40 = 91,8 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4.30)$$

4.3 Výpočet oteplení cívký kotvy bez uvažování podélného šíření tepla – čela statorového vinutí

Čela statorového vinutí mají shodné chladicí podmínky, jelikož jsou rovnoměrně rozložené po obvodu a tím pádem i rovnoměrně profukované chladícím vzduchem. Díky tomu si pro výpočet oteplení můžeme zvolit jedno čelo o délce l_ξ a vnějším obvodu O_ξ (Obr. č. 2.6). Pro zvolené čelo vinutí lze sestavit jednoduché náhradní tepelné schéma, které disponuje jedním tepelným odporem a jedním uzlem. [6]



Obr. č. 4.4: Náhradní tepelné schéma čel statorového vinutí.

4.3.1 Oboustranný ventilační systém

Ztráty vzniklé v jednom čele statorové cívky:

$$\Delta P_{Cu\check{c}1} = \frac{\Delta P_{Cu\check{c}}}{2 \cdot Q} = \frac{27329}{2 \cdot 108} = 126,52 \text{ W} \quad (4.31)$$

Vnější obvod čela:

$$O_{\check{c}} = 2 \cdot (h_{\check{c}} + b_{\check{c}}) = 2 \cdot (0,051 + 0,021) = 0,143 \text{ m} \quad (4.32)$$

Součinitel přestupu tepla je odhadnut na: $\alpha_{\check{c}} = 30 \text{ W}/^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^2$.

Činitel zakrytí čel k_{oka} bývá v rozmezí 0,6 až 0,8. Velikost závisí na konstrukčním uspořádání čel. Tento činitel představuje zakrytí čel vlivem křížení horní a spodní vrstvy, vložek mezi vrstvami, bandáží, podpěrným kruhem atd. [6] Zvolil jsem hodnotu $k_{oka} = 0,8$.

Tepelný odpor jednoho čela:

$$R_{\check{c}1} = \frac{\delta_{iz}}{\lambda_{iz} \cdot O_{\check{c}} \cdot l_{\check{c}}} + \frac{\delta_{vzd}}{\lambda_{vzd} \cdot O_{\check{c}} \cdot l_{\check{c}}} + \frac{1}{\alpha_{\check{c}} \cdot k_{oka} \cdot O_{\check{c}} \cdot l_{\check{c}}} \quad (4.33)$$

$$R_{\check{c}1} = \frac{0,0041}{0,2 \cdot 0,143 \cdot 0,861} + \frac{0,0001}{0,028 \cdot 0,143 \cdot 0,861} + \frac{1}{30 \cdot 0,8 \cdot 0,143 \cdot 0,861} = 0,53 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{W}$$

Tepelný odpor na jednotku délky čela:

$$r_{\zeta 1} = R_{\zeta 1} \cdot l_{\zeta} = 0,53 \cdot 0,861 = 0,459 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{W} \cdot \text{m} \quad (4.34)$$

Oteplení čela statorového vinutí:

$$\Delta\vartheta_{\zeta} = \Delta P_{Cu\zeta 1} \cdot R_{\zeta 1} = 126,52 \cdot 0,53 = \mathbf{67,6 \text{ }^{\circ}\text{C}} \quad (4.35)$$

Výsledná teplota čela statorového vinutí:

$$\vartheta_{\zeta} = \Delta\vartheta_{\zeta} + \vartheta_0 = 67,6 + 40 = 107,6 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (4.36)$$

Teplota v okolí čel je mírně vyšší než teplota vzduchu, který vstupuje do stroje. Důvodem ohřátí vzduchu jsou ventilační ztráty a také část budících ztrát. [6] Nicméně se jedná o malý přírůstek teploty, a proto je ve výpočtu zanedbán.

4.3.2 Jednostranná ventilační systém

Při jednostranné ventilaci je teplota okolí zadních čel (vzdálenější od ventilátoru) zvýšena o ztráty v rotoru, tedy $\vartheta_{0\zeta 3} = \vartheta_{02} = 4,04 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Dále budeme předpokládat zmenšení chladícího povrchu čel kvůli umístění vývodů právě na straně těchto čel na $k_{oka} = 0,6$. Kolem zadních čel vinutí bude nižší rychlost proudění než u předních čel, což má za následek snížení součinitele přestupu tepla: $\alpha_{\zeta} = 25$.

Tepelný odpor zadního čela:

$$R_{\zeta 3} = \frac{\delta_{iz}}{\lambda_{iz} \cdot O_{\zeta} \cdot l_{\zeta}} + \frac{\delta_{vzd}}{\lambda_{vzd} \cdot O_{\zeta} \cdot l_{\zeta}} + \frac{1}{\alpha_{\zeta} \cdot k_{oka} \cdot O_{\zeta} \cdot l_{\zeta}} \quad (4.37)$$

$$R_{\zeta 3} = \frac{0,0041}{0,2 \cdot 0,143 \cdot 0,861} + \frac{0,0001}{0,028 \cdot 0,143 \cdot 0,861} + \frac{1}{25 \cdot 0,6 \cdot 0,143 \cdot 0,861} = 0,74 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{W}$$

Tepelný odpor na jednotku délky zadního čela:

$$r_{\zeta 3} = r_3 = R_{\zeta 3} \cdot l_{\zeta} = 0,74 \cdot 0,861 = 0,635 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{W} \cdot \text{m} \quad (4.38)$$

Oteplení zadního čela vinutí:

$$\Delta\vartheta_{\check{c}3} = \Delta P_{Cu\check{c}3} \cdot R_{\check{c}3} + \vartheta_{0\check{c}3} = 126,52 \cdot 0,74 + 4,04 = 97,3 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4.39)$$

Při nesymetrické ventilaci bychom museli použít izolaci třídy F, která umožňuje maximální oteplení 105 °C, viz tabulka číslo 4.1.

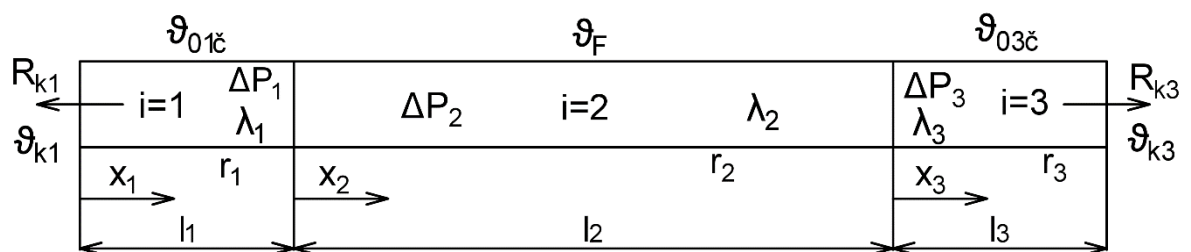
Teplota zadního čela vinutí:

$$\vartheta_{\check{c}3} = \Delta\vartheta_{\check{c}3} + \vartheta_0 = 97,3 + 40 = 137,3 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4.40)$$

Pro oboustrannou i jednostrannou ventilaci vychází poměrně velký rozdíl mezi oteplením drážkové části a čely vinutí, což znamená, že dochází k proudění tepla mezi nimi. Pro získání přesnějšího výsledku je potřeba uvažovat podélné šíření tepla mezi těmito částmi cívky. [6]

4.4 Podélného šíření tepla ve satorovém vinutí

Pro tepelný výpočet oteplení satorového vinutí, ve kterém uvažujeme podélné šíření tepla, využijeme uspořádání na obrázku číslo 4.5, kde je vidět vinutí rozdělené na tři různě chlazené úseky (čelo – drážková část – čelo). Lze zvolit i vyšší počet úseků. [6]



Obr. č. 4.5: Rozdělené satorového vinutí na jednotlivé úseky. [6]

Vysvětlení jednotlivých parametrů:

i – úsek tyče ($i = 1, 2, 3$),

l_i – délka zvoleného úseku,

ΔP_i – tepelný tok vznikající v jednotce délky zvoleného úseku,

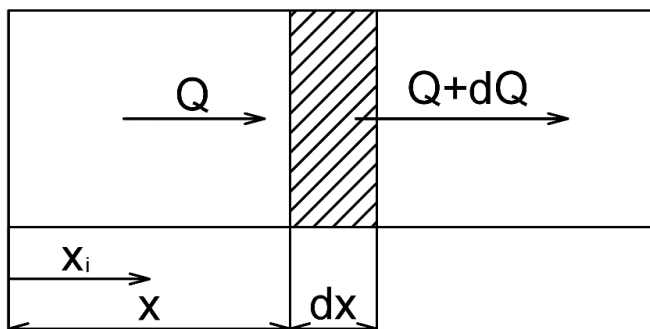
λ_i – tepelná vodivost zvoleného úseku,

S_i – průřez zvoleného úseku,

ϑ_i – teplota okolí zvoleného úseku,

r_i – tepelný odpor zvoleného úseku na jednotku délky. [6]

V i -tém úseku tyče (vinutí) zvolíme element dx a vyjádříme změnu tepelného toku dQ a tepelnou rovnováhu. [6]



Obr. č. 4.6: Šíření tepla v i -tém úseku tyče. [6]

Množství tepelného toku procházející zvoleným elementem dx :

$$Q = -\lambda_i \cdot S_i \cdot \frac{d\vartheta_i}{dx_i} \quad (4.41)$$

Vztah 4.41 derivujeme a získáme změnu tepelného toku:

$$dQ = -\lambda_i \cdot S_i \cdot \frac{d^2\vartheta_i}{dx_i^2} \cdot dx_i \quad (4.42)$$

Nyní lze vyjádřit tepelnou rovnováhu na elementu dx :

$$dQ = -\lambda_i \cdot S_i \cdot \frac{d^2\vartheta_i}{dx_i^2} \cdot dx_i = \Delta P_i \cdot dx - \frac{\vartheta_i - \vartheta_{i0}}{\frac{r_i}{dx_i}} \quad (4.43)$$

Po úpravě vztahu 4.43 získáme diferenciální rovnici 2. řádu:

$$\frac{d^2\vartheta_i}{dx_i^2} - \frac{1}{\lambda_i \cdot S_i \cdot r_i} \cdot (\vartheta_i - \vartheta_{i0}) = \frac{\Delta P_i}{-\lambda_i \cdot S_i} \quad (4.44)$$

Rovnici 4.44 integrujeme a získáme následující řešení:

$$\vartheta_i = A_i \cdot \sinh(a_i \cdot x_i) + B_i \cdot \cosh(a_i \cdot x_i) + r_i \cdot \Delta P_i + \vartheta_{0i} \quad (4.45)$$

kde člen $r_i \cdot \Delta P_i + \vartheta_{0i}$ vyjadřuje teplotu daného úseku, pokud bychom neuvažovali podélné šíření tepla. A_i a B_i jsou integrační konstanty, které lze určit z okrajových podmínek. Konstanta argumentu a_i je určena vztahem 4.46. [6]

$$a_i = \sqrt{\frac{1}{\lambda_i \cdot S_i \cdot r_i}} \quad (4.46)$$

Rovnici 4.45 můžeme upravit pro jednotlivé úseky statorového vinutí. Tím získáme tři rovnice 4.47-49, pomocí kterých lze určit průběh teploty podél vinutí. [6]

$$\vartheta_1 = A_1 \cdot \sinh(a_1 \cdot x_1) + B_1 \cdot \cosh(a_1 \cdot x_1) + r_1 \cdot \Delta P_1 + \vartheta_{01č} \quad (4.47)$$

$$\vartheta_2 = A_2 \cdot \sinh(a_2 \cdot x_2) + B_2 \cdot \cosh(a_2 \cdot x_2) + r_2 \cdot \Delta P_2 + \vartheta_F \quad (4.48)$$

$$\vartheta_3 = A_3 \cdot \sinh(a_3 \cdot x_3) + B_3 \cdot \cosh(a_3 \cdot x_3) + r_3 \cdot \Delta P_3 + \vartheta_{03č} \quad (4.49)$$

Pro vyřešení těchto tří rovnic potřebujeme stanovit několik doposud neznámých parametrů.

4.5 Výpočet oteplení cívký kotvy při uvažování podélného šíření tepla – oboustranný ventilační systém

V kapitolách 4.5 a 4.6 jsem převážně vycházel z materiálů uvedených v [5] a [6].

4.5.1 Stanovení tepelných odporů

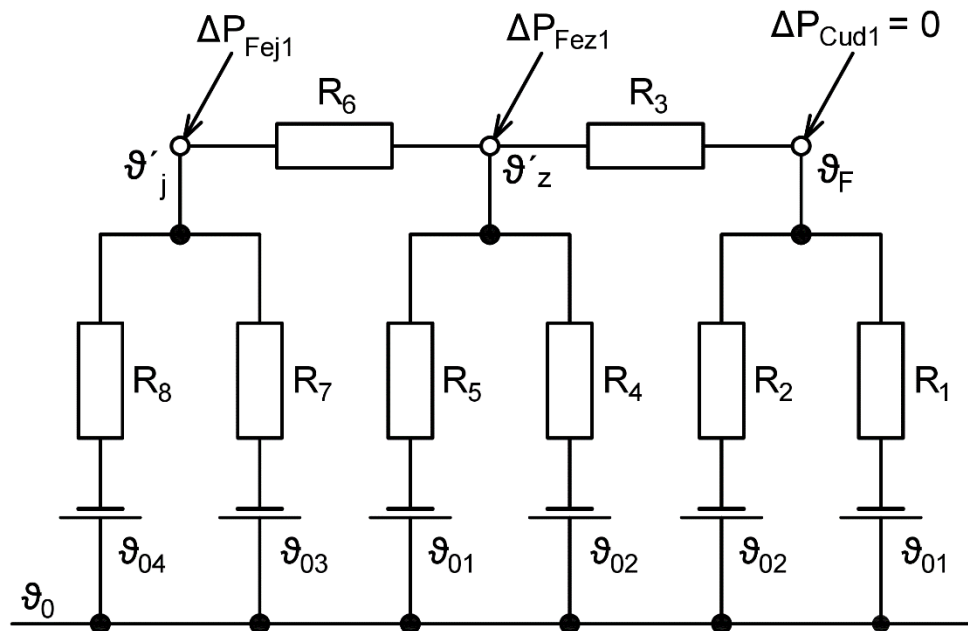
Tepelný odpor čel vinutí

Jelikož se jedná o oboustranný ventilační systém, tak tepelný odpor bude stejný pro obě čela vinutí.

$$r_1 = r_3 = r_č = R_{č1} \cdot l_č = 0,53 \cdot 0,861 = 0,46 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W} \cdot \text{m} \quad (4.50)$$

Tepelný odpor drážkové části vinutí

Pro určení tepelného odporu drážkové části na jednotku délky r_2 potřebujeme znát fiktivní teplotu ϑ_F , která znázorňuje ohřátí drážkové části vinutí od ztrát vzniklých v železe (zuby a jho statoru). Fiktivní teplotu získáme tak, že opět budeme řešit náhradní tepelný obvod jako v kapitole 4.2.7, pouze s tím rozdílem, že ztráty v drážkové části vinutí jsou nulové ($\Delta P'_{Cud1} = 0$), viz obrázek číslo 4.7. Nový náhradní tepelný obvod popíšeme metodou uzlových napětí a získáme soustavu tří rovnic.

Obr. č. 4.7: Náhradní tepelný obvod pro určení ϑ_F .

$$\frac{\vartheta_F - \vartheta_{01}}{R_1} + \frac{\vartheta_F - \vartheta_{02}}{R_2} + \frac{\vartheta_F - \vartheta'_z}{R_3} = \Delta P'_{Cud1} \quad (4.51a)$$

$$\frac{\vartheta'_z - \vartheta_F}{R_3} + \frac{\vartheta'_z - \vartheta_{02}}{R_4} + \frac{\vartheta'_z - \vartheta_{01}}{R_5} + \frac{\vartheta'_z - \vartheta'_j}{R_6} = \Delta P'_{Fez1} \quad (4.52a)$$

$$\frac{\vartheta'_j - \vartheta'_z}{R_6} + \frac{\vartheta'_j - \vartheta_{03}}{R_7} + \frac{\vartheta'_j - \vartheta_{04}}{R_8} = \Delta P'_{Fej1} \quad (4.53a)$$

Dále do této soustavy rovnic dosadíme proměnné z kapitol 4.2.5 a 4.2.6.

$$\frac{\vartheta_F - 7,64}{33,16} + \frac{\vartheta_F - 4,04}{140,67} + \frac{\vartheta_F - \vartheta'_z}{3,85} = 0 \quad (4.51b)$$

$$\frac{\vartheta'_z - \vartheta_F}{3,85} + \frac{\vartheta'_z - 4,04}{48,1} + \frac{\vartheta'_z - 7,64}{7,95} + \frac{\vartheta'_z - \vartheta'_j}{0,95} = 5,41 \quad (4.52b)$$

$$\frac{\vartheta'_j - \vartheta'_z}{0,95} + \frac{\vartheta'_j - 13,12}{3,72} + \frac{\vartheta'_j - 15}{16,38} = 7,78 \quad (4.53b)$$

V dalším kroku upravíme soustavu rovnic do základního tvaru.

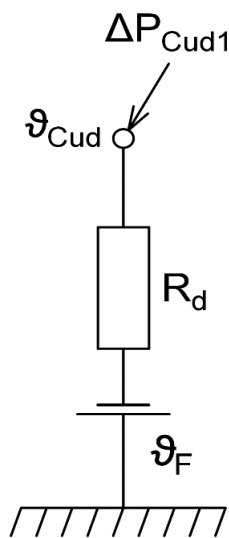
$$5,334 \cdot \vartheta_F - 4,665 \cdot \vartheta'_z + 0 \cdot \vartheta'_j = 4,65 \quad (4.51c)$$

$$-0,363 \cdot \vartheta_F + 2,041 \cdot \vartheta'_z - 1,472 \cdot \vartheta'_j = 9,03 \quad (4.52c)$$

$$0 \cdot \vartheta_F - 0,061 \cdot \vartheta'_z + 0,08 \cdot \vartheta'_j = 0,71 \quad (4.53c)$$

Po vyřešení soustavy rovnic získáme fiktivní oteplení nad teplotu okolí: $\Delta\vartheta_F = 32 \text{ }^\circ\text{C}$.

Nyní je potřeba přetransformovat náhradní tepelný obvod (Obr. č. 4.7) na jednoduché schéma s jedním odporem a jedním uzlem, které je vidět na obrázku číslo 4.8.



Obr. č. 4.8: Zjednodušený náhradní tepelný obvod.

Tepelný odpor drážkové části:

$$R_d = \frac{\vartheta_{Cud} - \vartheta_F}{\Delta P_{Cud1}} = \frac{82,2 - 32}{9,49} = 5,29 \text{ }^\circ\text{C}/\text{W} \quad (4.54)$$

Tepelný odpor drážkové části na jednotku délky:

$$r_2 = 2 \cdot R_d \cdot \frac{\check{s}_t}{2} = 2 \cdot 5,29 \cdot \frac{0,06}{2} = 0,317 \text{ }^\circ\text{C}/\text{W} \cdot \text{m} \quad (4.55)$$

kde \check{s}_t je šířka jednoho paketu.

Tepelný odpor na konci čel vinutí

Délka oka čela je již vypočtena ve vztahu 2.45: $l_{oka} = 0,055 \text{ m}$. Na obrázku číslo 2.6 můžeme vidět, že se jedná o polovinu střední délky oka čela, jelikož druhá půlka oka již patří k jinému čelu.

Tepelný odpor na konci čel vinutí:

$$R_{k1} = R_{k3} = \frac{\delta_{iz}}{\lambda_{iz} \cdot O_{\check{c}} \cdot l_{oka}} + \frac{\delta_{vzd}}{\lambda_{vzd} \cdot O_{\check{c}} \cdot l_{oka}} + \frac{1}{\alpha_{\check{c}} \cdot k_{oka} \cdot O_{\check{c}} \cdot l_{oka}} \quad (4.56)$$

$$R_{k1} = R_{k3} = \frac{0,0041}{0,2 \cdot 0,143 \cdot 0,055} + \frac{0,0001}{0,028 \cdot 0,143 \cdot 0,055} + \frac{1}{30 \cdot 0,8 \cdot 0,143 \cdot 0,055} = 8,3 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}}$$

4.5.2 Délky úseků tyče

Délka odpovídající čelům:

$$l_1 = l_3 = v + x = 0,055 + 0,319 = 0,374 \text{ m} \quad (4.57)$$

kde délky v a x jsou určeny v kapitole 2.3.6.

Délka odpovídající drážkové části: $l_2 = L = 0,87 \text{ m}$ (vztah 2.30).

4.5.3 Ztráty v jednotlivých oblastech vinutí

Ztráty v drážkové části jedné cívky vztažené na jednotku délky

$$\Delta P_2 = \frac{\Delta P_{Cu1d}}{2 \cdot Q \cdot L} = \frac{30741}{2 \cdot 108 \cdot 0,87} = 162,6 \text{ W/m} \quad (4.58)$$

Ztráty v čele jedné cívky vztažené na jednotku délky

$$\Delta P_1 = \Delta P_3 = \frac{\Delta P_{Cu1\check{c}}}{2 \cdot Q \cdot l_{\check{c}}} = \frac{27329}{2 \cdot 108 \cdot 0,861} = 147 \text{ W/m} \quad (4.59)$$

Ztráty na konci čela vinutí

$$\Delta P_{k1} = \Delta P_{k3} = \frac{\Delta P_{Cu1\check{c}} \cdot l_{oka}}{2 \cdot Q \cdot l_{\check{c}}} = \frac{27329 \cdot 0,055}{2 \cdot 108 \cdot 0,861} = 8,1 \text{ W/m} \quad (4.60)$$

4.5.4 Teploty okolí

Teplota v okolí čel: $\vartheta_{01\check{c}} = \vartheta_{03\check{c}} = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$

Teplota v drážkové části: $\vartheta_{02} = \vartheta_F = 32 \text{ } ^\circ\text{C}$

Pro zjednodušení výpočtu uvažují teplotu na konci čel nulovou: $\vartheta_{k1} = \vartheta_{k3} = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$.

4.5.5 Konstanty argumentů

Měrná tepelná vodivost úseků: $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_{Cu} = 385 \text{ W}/^\circ\text{C} \cdot \text{m}$

Průřezy vodičů úseků:

$$S_1 = S_2 = S_3 = \frac{n_d \cdot S_{Cu1}}{2} = \frac{4 \cdot 0,202}{2} = 403 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \quad (4.61)$$

Oblast čel:

$$a_1 = a_3 = \sqrt{\frac{1}{\lambda_1 \cdot S_1 \cdot r_1}} = \sqrt{\frac{1}{385 \cdot 403 \cdot 10^{-6} \cdot 0,46}} = 3,74 \quad (4.62)$$

Drážková část:

$$a_2 = \sqrt{\frac{1}{\lambda_2 \cdot S_2 \cdot r_2}} = \sqrt{\frac{1}{385 \cdot 403 \cdot 10^{-6} \cdot 0,317}} = 4,5 \quad (4.63)$$

4.5.6 Stanovení integračních konstant

Integrační konstanty A_i a B_i se stanovují z okrajových podmínek. Musíme určit šest okrajových podmínek, což vyplývá z rozdělení satorového vinutí na tři úseky.

Pro úplnost uvedu, že derivace rovnic popisující průběh teploty podél vinutí (4.47-49) mají následující tvar:

$$\frac{d\vartheta_1}{dx_1} = A_1 \cdot a_1 \cdot \cosh(a_1 \cdot x_1) + B_1 \cdot a_1 \cdot \sinh(a_1 \cdot x_1) \quad (4.64)$$

$$\frac{d\vartheta_2}{dx_2} = A_2 \cdot a_2 \cdot \cosh(a_2 \cdot x_2) + B_2 \cdot a_2 \cdot \sinh(a_2 \cdot x_2) \quad (4.65)$$

$$\frac{d\vartheta_3}{dx_3} = A_3 \cdot a_3 \cdot \cosh(a_3 \cdot x_3) + B_3 \cdot a_3 \cdot \sinh(a_3 \cdot x_3) \quad (4.66)$$

1) Okrajové podmínky vyjadřující tepelný tok na koncích úseků

Tepelný tok přestupující z konce úseku do okolního prostředí se musí rovnat tepelnému toku vystupujícímu z daného úseku.

$$-\lambda_1 \cdot S_1 \cdot \left(\frac{d\vartheta_1}{dx_1} \right)_{x_1=0} = \frac{\vartheta_{k1} - \vartheta_1(0)}{R_{k1}} \quad (4.67)$$

$$-\lambda_3 \cdot S_3 \cdot \left(\frac{d\vartheta_3}{dx_3} \right)_{x_3=l_3} = \frac{\vartheta_3(l_3) - \vartheta_{k3}}{R_{k3}} \quad (4.68)$$

a) **Konec úseku 1** ($x_1 = 0$).

$$-\lambda_1 \cdot S_1 \cdot [A_1 \cdot a_1 \cdot \cosh(a_1 \cdot x_1) + B_1 \cdot a_1 \cdot \sinh(a_1 \cdot x_1)] = \frac{\vartheta_{k1} - \vartheta_1(0)}{R_{k1}} \quad (4.69a)$$

$$-385 \cdot 403 \cdot 10^{-6} \cdot (A_1 \cdot 3,74 \cdot \cosh 0 + B_1 \cdot 3,74 \cdot \sinh 0) = \frac{0 - \vartheta_1(0)}{8,3} \quad (4.69b)$$

$$\vartheta_1(0) = 4,824 \cdot A_1 \quad (4.69c)$$

Výsledný vztah 4.69c dosadíme do rovnice 4.47.

$$4,824 \cdot A_1 = A_1 \cdot \sinh 0 + B_1 \cdot \cosh 0 + 0,46 \cdot 147 + 0 \quad (4.70a)$$

$$4,824 \cdot A_1 - B_1 = 67,6 \quad (4.70b)$$

b) Konec úseku 3 ($x_3 = l_3 = 0,375$).

$$-\lambda_3 \cdot S_3 \cdot (A_3 \cdot a_3 \cdot \cosh(a_3 \cdot x_3) + B_3 \cdot a_3 \cdot \sinh(a_3 \cdot x_3)) = \frac{\vartheta_3(l_3) - \vartheta_{k3}}{R_{k3}} \quad (4.71a)$$

$$-385 \cdot 403 \cdot 10^{-6} \cdot [A_3 \cdot 3,74 \cdot \cosh(3,74 \cdot 0,375) + B_3 \cdot 3,74 \cdot \sinh(3,74 \cdot 0,375)] = \frac{\vartheta_3(l_3) - 0}{8,3} \quad (4.71b)$$

$$\vartheta_3(l_3) = -10,408 \cdot A_3 - 9,223 \cdot B_3 \quad (4.71c)$$

Dosadíme výsledný výraz 4.71c do rovnice 4.49.

$$-10,408 \cdot A_3 - 9,223 \cdot B_3 = A_3 \cdot \sinh(3,74 \cdot 0,375) + B_3 \cdot \cosh(3,74 \cdot 0,375) + 0,46 \cdot 147 + 0 \quad (4.72a)$$

$$-12,320 \cdot A_3 - 11,380 \cdot B_3 = 67,6 \quad (4.72b)$$

2) Okrajové podmínky vyjadřující teplo na rozhraní úseků

Teplota na konci úseku se musí rovnat teplotě na začátku následujícího úseku.

$$\vartheta_1(l_1) = \vartheta_2(0) \quad (4.73)$$

$$\vartheta_2(l_2) = \vartheta_3(0) \quad (4.74)$$

a) Rozhraní mezi prvním a druhým úsekem ($x_1 = l_1 = 0,375$; $x_2 = 0$).

$$A_1 \cdot \sinh(a_1 \cdot x_1) + B_1 \cdot \cosh(a_1 \cdot x_1) + r_1 \cdot \Delta P_1 + \vartheta_{01č} = A_2 \cdot \sinh(a_2 \cdot x_2) + B_2 \cdot \cosh(a_2 \cdot x_2) + r_2 \cdot \Delta P_2 + \vartheta_F \quad (4.75a)$$

$$A_1 \cdot \sinh(3,74 \cdot 0,375) + B_1 \cdot \cosh(3,74 \cdot 0,375) + 0,46 \cdot 147 + 0 = A_2 \cdot \sinh 0 + B_2 \cdot \cosh 0 + 0,317 \cdot 162,6 + 32 \quad (4.75b)$$

$$1,912 \cdot A_1 + 2,157 \cdot B_1 - B_2 = 16,1 \quad (4.75c)$$

b) Rozhraní mezi druhým a třetím úsekem ($x_2 = l_2 = 0,875$; $x_3 = 0$).

$$\begin{aligned} & A_2 \cdot \sinh(a_2 \cdot x_2) + B_2 \cdot \cosh(a_2 \cdot x_2) + r_2 \cdot \Delta P_2 + \vartheta_F \\ & = A_3 \cdot \sinh(a_3 \cdot x_3) + B_3 \cdot \cosh(a_3 \cdot x_3) + r_3 \cdot \Delta P_3 + \vartheta_{03č} \end{aligned} \quad (4.76a)$$

$$\begin{aligned} & A_2 \cdot \sinh(4,5 \cdot 0,875) + B_2 \cdot \cosh(4,5 \cdot 0,875) + 0,317 \cdot 162,6 + 32 \\ & = A_3 \cdot \sinh 0 + B_3 \cdot \cosh 0 + 0,46 \cdot 147 + 0 \end{aligned} \quad (4.76b)$$

$$25,741 \cdot A_2 + 25,760 \cdot B_2 - B_3 = -16,1 \quad (4.76c)$$

3) Okrajové podmínky vyjadřující tepelný tok na rozhraní úseků

Tepelný tok, který vychází z některého úseku, musí být stejný jako tepelný tok vstupující do vedlejšího úseku.

$$\lambda_1 \cdot S_1 \cdot \left(\frac{d\vartheta_1}{dx_1} \right)_{x_1=l_1} = \lambda_2 \cdot S_2 \cdot \left(\frac{d\vartheta_2}{dx_2} \right)_{x_2=0} \quad (4.77)$$

$$\lambda_2 \cdot S_2 \cdot \left(\frac{d\vartheta_2}{dx_2} \right)_{x_2=l_2} = \lambda_3 \cdot S_3 \cdot \left(\frac{d\vartheta_3}{dx_3} \right)_{x_3=0} \quad (4.78)$$

a) Rozhraní mezi prvním a druhým úsekem ($x_1 = l_1 = 0,375$; $x_2 = 0$).

$$\begin{aligned} & \lambda_1 \cdot S_1 \cdot [A_1 \cdot a_1 \cdot \cosh(a_1 \cdot x_1) + B_1 \cdot a_1 \cdot \sinh(a_1 \cdot x_1)] \\ & = \lambda_2 \cdot S_2 \cdot [A_2 \cdot a_2 \cdot \cosh(a_2 \cdot x_2) + B_2 \cdot a_2 \cdot \sinh(a_2 \cdot x_2)] \end{aligned} \quad (4.79a)$$

$$\begin{aligned} & A_1 \cdot 3,74 \cdot \cosh(3,74 \cdot 0,375) + B_1 \cdot 3,74 \cdot \sinh(3,74 \cdot 0,375) \\ & = A_2 \cdot 4,5 \cdot \cosh(4,5 \cdot 0) + B_2 \cdot 4,5 \cdot \sinh(4,5 \cdot 0) \end{aligned} \quad (4.79b)$$

$$8,076 \cdot A_1 - 4,5 \cdot A_2 + 7,156 \cdot B_1 = 0 \quad (4.79c)$$

b) Rozhraní mezi druhým a třetím úsekem ($x_2 = l_2 = 0,875$; $x_3 = 0$).

$$\begin{aligned} & \lambda_2 \cdot S_2 \cdot [A_2 \cdot a_2 \cdot \cosh(a_2 \cdot x_2) + B_2 \cdot a_2 \cdot \sinh(a_2 \cdot x_2)] \\ & = \lambda_3 \cdot S_3 \cdot [A_3 \cdot a_3 \cdot \cosh(a_3 \cdot x_3) + B_3 \cdot a_3 \cdot \sinh(a_3 \cdot x_3)] \end{aligned} \quad (4.80a)$$

$$\begin{aligned} & A_2 \cdot 4,5 \cdot \cosh(4,5 \cdot 0,875) + B_2 \cdot 4,5 \cdot \sinh(4,5 \cdot 0,875) \\ & = A_3 \cdot 3,74 \cdot \cosh(3,74 \cdot 0) + B_3 \cdot 3,74 \cdot \sinh(3,74 \cdot 0) \end{aligned} \quad (4.80b)$$

$$116,044 \cdot A_2 - 3,74 \cdot A_3 + 115,956 \cdot B_2 = 0 \quad (4.80c)$$

Tímto postupem jsme získali soustavu o šesti rovnicích (4.70b, 4.72b, 4.75c, 4.76c, 4.79c, 4.80c):

$$\begin{aligned}
 4,824 \cdot A_1 - B_1 &= 67,6 \\
 -12,320 \cdot A_3 - 11,380 \cdot B_3 &= 67,6 \\
 1,912 \cdot A_1 + 2,157 \cdot B_1 - B_2 &= 16,1 \\
 25,741 \cdot A_2 + 25,760 \cdot B_2 - B_3 &= -16,1 \\
 8,076 \cdot A_1 - 4,5 \cdot A_2 + 7,156 \cdot B_1 &= 0 \\
 116,044 \cdot A_2 - 3,74 \cdot A_3 + 115,956 \cdot B_2 &= 0
 \end{aligned}$$

Po vyřešení této soustavy rovnic získáme potřebné integrační konstanty, viz tabulka 4.2.

Tab. č. 4.2: Integrační konstanty.

Integrační konstanty	A ₁	A ₂	A ₃	B ₁	B ₂	B ₃
Výsledek [-]	12,346	9,386	-11,295	-8,025	-9,758	6,289

4.5.7 Výsledné rovnice pro stanovení šíření tepla ve zvolených úsecích

V této fázi již máme určené všechny vstupní parametry, které potřebujeme k vyřešení diferenciálních rovnic 4.47-49. Po dosazení všech parametrů získáme následující rovnice, pomocí kterých lze vypočítat oteplení v jakémkoli místě cívky.

$$\vartheta_1(x_1) = 12,35 \cdot \sinh(3,74 \cdot x_1) - 8,03 \cdot \cosh(3,74 \cdot x_1) + 0,46 \cdot 147 + 0 \quad (4.81)$$

$$\vartheta_2(x_2) = 9,39 \cdot \sinh(4,5 \cdot x_2) - 9,76 \cdot \cosh(4,5 \cdot x_2) + 0,317 \cdot 162,6 + 32 \quad (4.82)$$

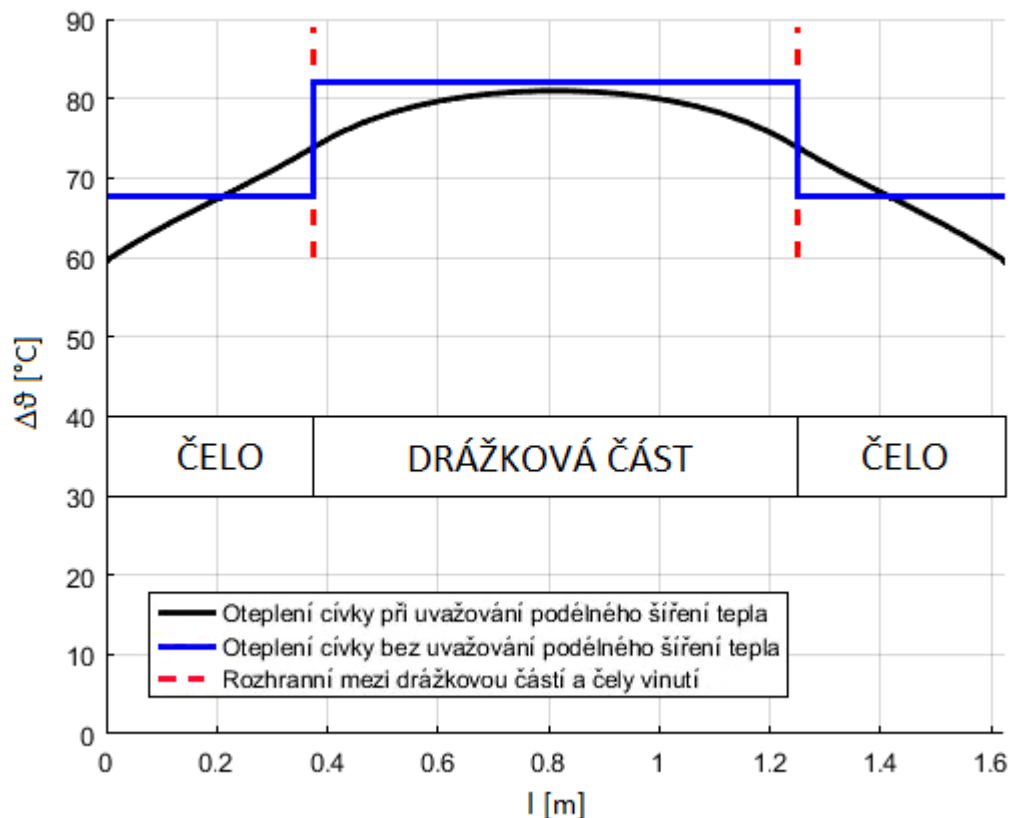
$$\vartheta_3(x_3) = -11,30 \cdot \sinh(3,74 \cdot x_3) + 6,29 \cdot \cosh(3,74 \cdot x_3) + 0,46 \cdot 147 + 0 \quad (4.83)$$

V tabulce číslo 4.3 uvádím několik kontrolních hodnot výsledného oteplení. Z této tabulky lze vyčíst, že na rozhraní úseků se výsledné oteplení shoduje: $\vartheta_1(l_1) = \vartheta_2(0) = 73,88 \text{ }^\circ\text{C}$ a $\vartheta_2(l_2) = \vartheta_3(0) = 73,88 \text{ }^\circ\text{C}$.

Tab. č. 4.3: Kontrolní výsledky oteplení.

Oteplení nad teplotu okolí	$\vartheta_1(0)$	$\vartheta_1\left(\frac{l_1}{2}\right)$	$\vartheta_1(l_1)$	$\vartheta_2(0)$	$\vartheta_2\left(\frac{l_2}{2}\right)$	$\vartheta_2(l_2)$	$\vartheta_3(0)$	$\vartheta_3\left(\frac{l_3}{2}\right)$	$\vartheta_3(l_3)$
Výsledek [°C]	59,56	66,89	73,88	73,88	80,97	73,88	73,88	66,89	59,56

Pomocí softwaru Matlab jsem si dopočítal oteplení po celé délce cívky a vznikla spojitá čára představující oteplení podél statorového vinutí cívky, viz obrázek číslo 4.9.



Obr. č. 4.9: Výsledné oteplení cívky induktu při oboustranném ventilačním systému.

4.6 Výpočet oteplení cívky kotvy při uvažování podélného šíření tepla – jednostranný ventilační systém

V této kapitole budeme uvažovat pouze jednostranný ventilační systém, což znamená, že čela vinutí, které se nachází na opačné straně než ventilátor, budou hůře chlazena. Důvod je ten, že chladící vzduch procházející strojem se vlivem ztrát ohřeje a ke vzdálenějším čelům se dostane s vyšší teplotou. Výpočet se oproti symetrické ventilaci liší ve vstupních parametrech pro úsek 3 (vzdálenější čelo).

4.6.1 Tepelné odpory

Tepelný odpor zadního čela vinutí:

$$r_3 = R_{\zeta 3} \cdot l_{\zeta} = 0,74 \cdot 0,861 = 0,63 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W} \cdot \text{m} \quad (4.84)$$

Tepelný odpor na konci zadního čela cívky:

$$R_{k3} = \frac{\delta_{iz}}{\lambda_{iz} \cdot O_{\zeta} \cdot l_{oka}} + \frac{\delta_{vzd}}{\lambda_{vzd} \cdot O_{\zeta} \cdot l_{oka}} + \frac{1}{\alpha_{\zeta} \cdot k_{oka} \cdot O_{\zeta} \cdot l_{oka}} \quad (4.85)$$

$$R_{k3} = \frac{0,0041}{0,2 \cdot 0,143 \cdot 0,055} + \frac{0,0001}{0,028 \cdot 0,143 \cdot 0,055} + \frac{1}{25 \cdot 0,6 \cdot 0,143 \cdot 0,055} = 9,35 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}$$

4.6.2 Teploty okolí úseků

Teplota na konci vzdálenějšího čela: $\vartheta_{k3} = 4,04 \text{ } ^\circ\text{C}$.

4.6.3 Konstanta argumentu

Oblast vzdálenějšího čela:

$$a_3 = \sqrt{\frac{1}{\lambda_3 \cdot S_3 \cdot r_3}} = \sqrt{\frac{1}{385 \cdot 403 \cdot 10^{-6} \cdot 0,63}} = 3,19 \quad (4.86)$$

4.6.4 Určení integračních konstant

1) Okrajové podmínky vyjadřující tepelný tok na koncích úseků

a) **Konec čela 1** ($x_1 = 0$)

$$-\lambda_1 \cdot S_1 \cdot [A_1 \cdot a_1 \cdot \cosh(a_1 \cdot x_1) + B_1 \cdot a_1 \cdot \sinh(a_1 \cdot x_1)] = \frac{\vartheta_{k1} - \vartheta_1(0)}{R_{k1}} \quad (4.87a)$$

$$-385 \cdot 403 \cdot 10^{-6} \cdot (A_1 \cdot 3,74 \cdot \cosh 0 + B_1 \cdot 3,74 \cdot \sinh 0) = \frac{0 - \vartheta_1(0)}{8,3} \quad (4.87b)$$

$$\vartheta_1(0) = 4,824 \cdot A_1 \quad (4.87c)$$

Výsledný výraz (4.87c) dosadíme do rovnice (4.47).

$$4,824 \cdot A_1 = A_1 \cdot \sinh 0 + B_1 \cdot \cosh 0 + 0,46 \cdot 147 + 0 \quad (4.88a)$$

$$4,824 \cdot A_1 - B_1 = 67,6 \quad (4.88b)$$

b) Konec čela 3 ($x_3 = l_3 = 0,375$)

$$-\lambda_3 \cdot S_3 \cdot [A_3 \cdot a_3 \cdot \cosh(a_3 \cdot x_3) + B_3 \cdot a_3 \cdot \sinh(a_3 \cdot x_3)] = \frac{\vartheta_3(l_3) - \vartheta_{k3}}{R_{k3}} \quad (4.89a)$$

$$\begin{aligned} -385 \cdot 403 \cdot 10^{-6} \cdot [A_3 \cdot 3,26 \cdot \cosh(3,726 \cdot 0,375) + B_3 \cdot 3,26 \\ \cdot \sinh(3,26 \cdot 0,375)] = \frac{\vartheta_3(l_3) - 4,04}{10,93} \end{aligned} \quad (4.89b)$$

$$\vartheta_3(l_3) = -10,219 \cdot A_3 - 8,589 \cdot B_3 + 4,04 \quad (4.89c)$$

Dosadíme výsledný výraz (4.89c) do rovnice (4.49).

$$\begin{aligned} -10,219 \cdot A_3 - 8,589 \cdot B_3 + 4,04 = A_3 \cdot \sinh(3,26 \cdot 0,375) + B_3 \cdot \\ \cosh(3,26 \cdot 0,375) + 0,61 \cdot 147 + 4,04 \end{aligned} \quad (4.90a)$$

$$-11,77 \cdot A_3 - 10,435 \cdot B_3 = 89 \quad (4.90b)$$

2) Okrajové podmínky vyjadřující teplo na rozhraní úseků

a) Rozhraní mezi prvním a druhým úsekem ($x_1 = l_1 = 0,375$; $x_2 = 0$).

$$\begin{aligned} A_1 \cdot \sinh(a_1 \cdot x_1) + B_1 \cdot \cosh(a_1 \cdot x_1) + r_1 \cdot \Delta P_1 + \vartheta_{01} \\ = A_2 \cdot \sinh(a_2 \cdot x_2) + B_2 \cdot \cosh(a_2 \cdot x_2) + r_2 \cdot \Delta P_2 + \vartheta_F \end{aligned} \quad (4.91a)$$

$$\begin{aligned} A_1 \cdot \sinh(3,74 \cdot 0,375) + B_1 \cdot \cosh(3,74 \cdot 0,375) + 0,46 \cdot 147 + 0 \\ = A_2 \cdot \sinh 0 + B_2 \cdot \cosh 0 + 0,317 \cdot 162,6 + 32 \end{aligned} \quad (4.91b)$$

$$1,912 \cdot A_1 + 2,157 \cdot B_1 - B_2 = 16,1 \quad (4.91c)$$

b) Rozhraní mezi druhým a třetím úsekem ($x_2 = l_2 = 0,875$; $x_3 = 0$).

$$\begin{aligned} & A_2 \cdot \sinh(a_2 \cdot x_2) + B_2 \cdot \cosh(a_2 \cdot x_2) + r_2 \cdot \Delta P_2 + \vartheta_F \\ & = A_3 \cdot \sinh(a_3 \cdot x_3) + B_3 \cdot \cosh(a_3 \cdot x_3) + r_3 \cdot \Delta P_3 + \vartheta_{03č} \end{aligned} \quad (4.92a)$$

$$\begin{aligned} & A_2 \cdot \sinh(4,5 \cdot 0,875) + B_2 \cdot \cosh(4,5 \cdot 0,875) + 0,317 \cdot 162,6 + 32 \\ & = A_3 \cdot \sinh 0 + B_3 \cdot \cosh 0 + 0,61 \cdot 147 + 4,04 \end{aligned} \quad (4.92b)$$

$$25,741 \cdot A_2 + 25,760 \cdot B_2 - B_3 = 9,5 \quad (4.92c)$$

3) Okrajové podmínky vyjadřující tepelný tok na rozhraní úseků

a) Rozhraní mezi prvním a druhým úsekem ($x_1 = l_1 = 0,375$; $x_2 = 0$).

$$\begin{aligned} & \lambda_1 \cdot S_1 \cdot [A_1 \cdot a_1 \cdot \cosh(a_1 \cdot x_1) + B_1 \cdot a_1 \cdot \sinh(a_1 \cdot x_1)] \\ & = \lambda_2 \cdot S_2 \cdot [A_2 \cdot a_2 \cdot \cosh(a_2 \cdot x_2) + B_2 \cdot a_2 \cdot \sinh(a_2 \cdot x_2)] \end{aligned} \quad (4.93a)$$

$$\begin{aligned} & A_1 \cdot 3,74 \cdot \cosh(3,74 \cdot 0,375) + B_1 \cdot 3,74 \cdot \sinh(3,74 \cdot 0,375) \\ & = A_2 \cdot 4,5 \cdot \cosh(4,5 \cdot 0) + B_2 \cdot 4,5 \cdot \sinh(4,5 \cdot 0) \end{aligned} \quad (4.93b)$$

$$8,076 \cdot A_1 - 4,5 \cdot A_2 + 7,156 \cdot B_1 = 0 \quad (4.93c)$$

b) Rozhraní mezi druhým a třetím úsekem ($x_2 = l_2 = 0,875$; $x_3 = 0$).

$$\begin{aligned} & \lambda_2 \cdot S_2 \cdot [A_2 \cdot a_2 \cdot \cosh(a_2 \cdot x_2) + B_2 \cdot a_2 \cdot \sinh(a_2 \cdot x_2)] \\ & = \lambda_3 \cdot S_3 \cdot [A_3 \cdot a_3 \cdot \cosh(a_3 \cdot x_3) + B_3 \cdot a_3 \cdot \sinh(a_3 \cdot x_3)] \end{aligned} \quad (4.94a)$$

$$\begin{aligned} & A_2 \cdot 4,5 \cdot \cosh(4,5 \cdot 0,875) + B_2 \cdot 4,5 \cdot \sinh(4,5 \cdot 0,875) \\ & = A_3 \cdot 3,26 \cdot \cosh(3,26 \cdot 0) + B_3 \cdot 3,26 \cdot \sinh(3,26 \cdot 0) \end{aligned} \quad (4.94b)$$

$$116,044 \cdot A_2 - 3,26 \cdot A_3 + 115,956 \cdot B_2 = 0 \quad (4.94c)$$

Tímto postupem jsem získal soustavu šesti rovnic (4.88b, 4.90b, 4.91c, 4.92c, 4.93c, 4.94c)

$$4,824 \cdot A_1 - B_1 = 67,6$$

$$-11,77 \cdot A_3 - 10,435 \cdot B_3 = 89$$

$$1,912 \cdot A_1 + 2,157 \cdot B_1 - B_2 = 16,1$$

$$25,741 \cdot A_2 + 25,760 \cdot B_2 - B_3 = 9,5$$

$$8,076 \cdot A_1 - 4,5 \cdot A_2 + 7,156 \cdot B_1 = 0$$

$$116,044 \cdot A_2 - 3,26 \cdot A_3 + 115,956 \cdot B_2 = 0$$

Po vyřešení této soustavy rovnic získáme potřebné integrační konstanty, viz tabulka 4.4.

Tab. č. 4.4: Integrační konstanty.

Integrační konstanty	A ₁	A ₂	A ₃	B ₁	B ₂	B ₃
Výsledek [-]	12,364	9,553	0,678	-7,940	-9,541	-9,295

4.6.5 Výsledné rovnice pro stanovení šíření tepla ve zvolených úsecích

V této fázi již máme určené všechny vstupní parametry, které potřebujeme k vyřešení diferenciálních rovnic 4.47-49. Po dosazení všech parametrů získáme následující rovnice, pomocí kterých lze vypočítat oteplení v jakémkoli místě cívky.

$$\vartheta_1(x_1) = 12,36 \cdot \sinh(3,74 \cdot x_1) - 7,94 \cdot \cosh(3,74 \cdot x_1) + 0,46 \cdot 147 + 0 \quad (4.95)$$

$$\vartheta_2(x_2) = 9,55 \cdot \sinh(4,5 \cdot x_2) - 9,54 \cdot \cosh(4,5 \cdot x_2) + 0,317 \cdot 162,6 + 32 \quad (4.96)$$

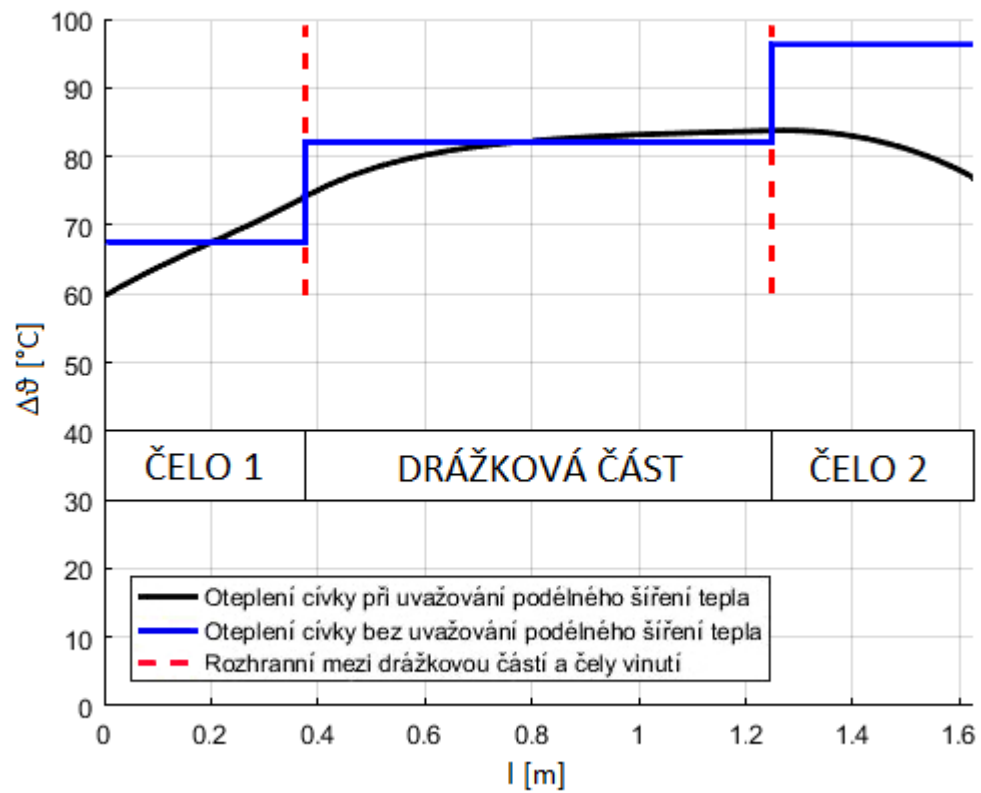
$$\vartheta_3(x_3) = 0,68 \cdot \sinh(3,19 \cdot x_3) - 9,29 \cdot \cosh(3,19 \cdot x_3) + 0,61 \cdot 147 + 4,04 \quad (4.97)$$

V tabulce číslo 4.3 uvádím několik kontrolních hodnot výsledného oteplení. Z dané tabulky lze vyčíst, že na rozhraní úseků se výsledné oteplení opět shoduje: $\vartheta_1(l_1) = \vartheta_2(0) = 74,09 \text{ } ^\circ\text{C}$ a $\vartheta_2(l_2) = \vartheta_3(0) = 83,76 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Tab. č. 4.5: Kontrolní výsledky oteplení.

Oteplení nad teplotu okolí	$\vartheta_1(0)$	$\vartheta_1\left(\frac{l_1}{2}\right)$	$\vartheta_1(l_1)$	$\vartheta_2(0)$	$\vartheta_2\left(\frac{l_2}{2}\right)$	$\vartheta_2(l_2)$	$\vartheta_3(0)$	$\vartheta_3\left(\frac{l_3}{2}\right)$	$\vartheta_3(l_3)$
Výsledek [°C]	59,56	67,02	74,09	74,09	82,35	83,76	83,76	82,40	76,95

Pomocí softwaru Matlab jsem si dopočítal oteplení po celé délce cívky a vznikla spojitá čára představující oteplení podél statorového vinutí cívky, viz obrázek číslo 4.10.



Obr. č. 4.10: Výsledné oteplení cívky induktu pro jednostranný ventilační systém.

Závěr

V první kapitole jsem shrnul obecné informace o synchronním stroji. Dále jsem uvedl princip a konstrukci stroje, včetně rozdělení na stroje s vyniklými póly a s hladkým rotorem.

Druhou kapitolu jsem věnoval elektromagnetickému návrhu, který je nezbytný pro stěžejní část této diplomové práce, tedy pro podrobný výpočet oteplení cívký kotvy synchronního stroje. V elektromagnetickém návrhu jsem se zabýval návrhem základních rozměrů stroje, statorového vinutí, magnetického obvodu, budícího vinutí, tlumícího vinutí, kroužků a kartáčů. Na závěr jsem stanovil velikost celkových ztrát, ze kterých vychází účinnost stroje 97,3 %.

Třetí kapitola obsahuje výpočty pro stanovení základních průměrů hřídele, rozměrů kladiva a počtu mezipólových rozpěrek. Dané výpočty jsou nezbytné k vytvoření konstrukčních výkresů v podélném i příčném řezu, viz příloha M, N a O.

V úvodu čtvrté kapitoly jsem se obecně věnoval tepelným obvodům včetně metody náhradních tepelných obvodů, kterou jsem využil pro výpočty oteplení. V první řadě jsem provedl výpočet oteplení cívký induktu bez uvažování podélného šíření tepla mezi drážkovou částí a čely vinutí. Výpočet oteplení pro drážkovou část i pro čela vinutí se provádí samostatně, jelikož se jedná o tepelně oddělené oblasti (vysoký tepelný odpor). Pro oboustranný ventilační systém je výsledné oteplení cívký v drážkové části 82,2 °C a v čelech 67,6 °C. Pro jednostranný ventilační systém se hůře chladí čelo, které je více vzdálené od ventilátoru a jeho oteplení činí 97,3 °C. Pro oba ventilační systémy je rozdíl oteplení poměrně vysoký, z čehož vyplývá, že výše uvedený předpoklad není zcela přesný. Z toho důvodu jsem počítal oteplení cívký induktu i s uvažováním podélného šíření tepla. Výsledný průběh oteplení podél cívký kotvy je, pro oboustranný ventilační systém, znázorněn na obrázku číslo 4.9. Z daného obrázku vyplývá, že nejvyšší oteplení se vyskytuje uprostřed drážkové části a směrem k čelům se snižuje. Pro jednostranný ventilační systém je průběh oteplení podél statorové cívký zobrazen na obrázku číslo 4.10. Nejvyšší hodnota oteplení se přesunula na rozhraní mezi drážkovou část a hůře chlazené čelo vinutí.

Seznam literatury a informačních zdrojů

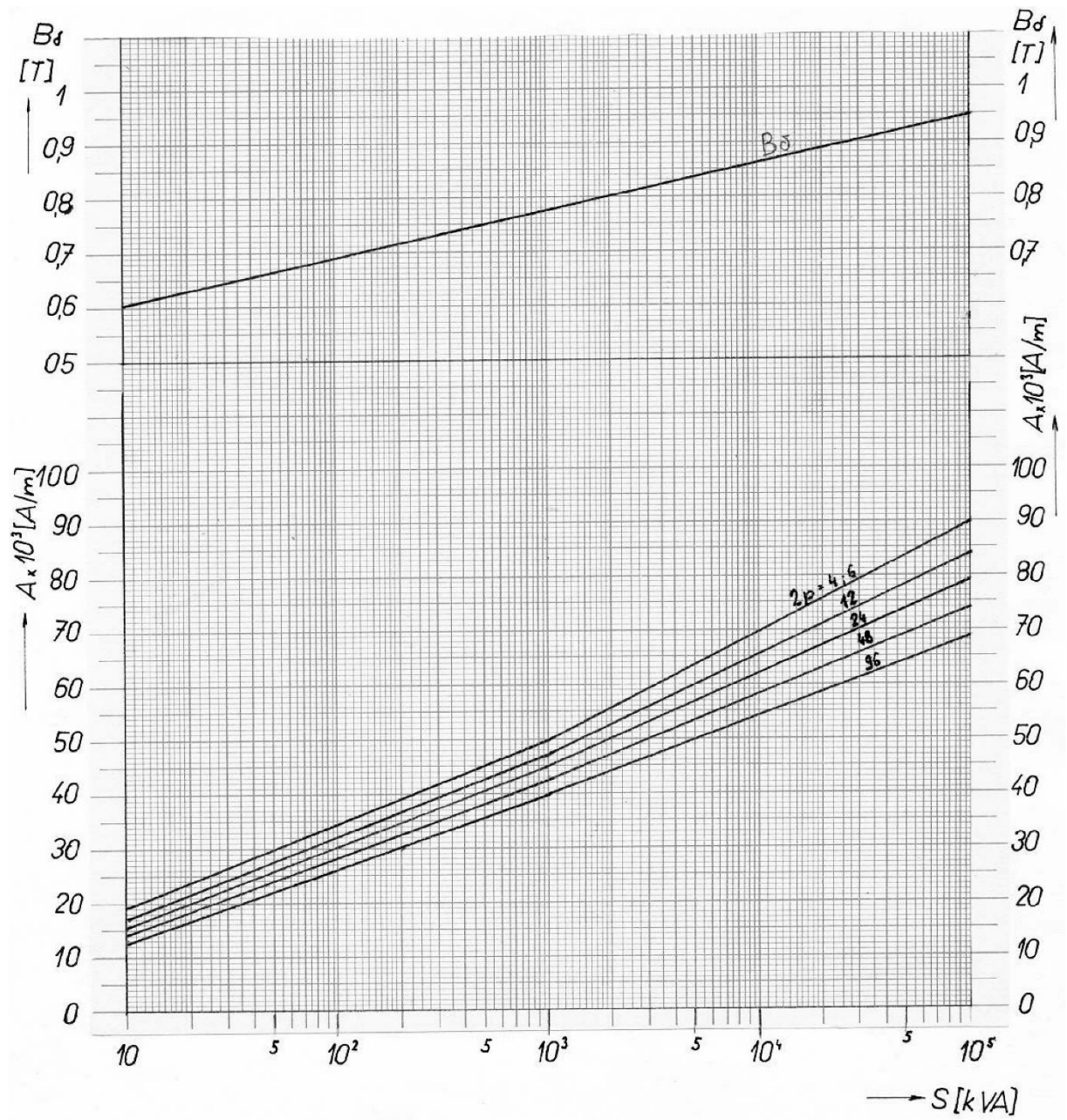
- [1] UHLÍŘ, Ivan. *Elektrické stroje a pohony*. 2. vyd. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007. 137 s. ISBN 978-80-01-03730-0.
- [2] MĚŘIČKA, Jiří, Václav HAMATA a Petr VOŽENÍLEK. *Elektrické stroje*. 2. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000. ISBN 80-01-02109-2.
- [3] PETROV, Georgij N. *Elektrické stroje 2: asynchronní stroje – synchronní stroje*. 1. vyd. Praha: Academia, 1982. 732 s.
- [4] BARTOŠ, Václav. *Elektrické stroje*. 2. vyd. Plzeň: ZČU, 2004. 222 s. ISBN 80-7043-332-9.
- [5] ČERVENÝ, Josef. *Postup při elektromagnetickém návrhu synchronního stroje*. Plzeň: ZČU, 2016.
- [6] ČERVENÝ, Josef. *Stavba elektrických strojů*. Plzeň: ZČU, 2016.
- [7] KOPYLOV, Igor Petrovič. *Stavba elektrických strojů*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988. 685 s.
- [8] ČERVENÝ, Josef. *Přehled konstrukce elektrických točivých strojů*. Plzeň: ZČU, 2016.
- [9] ČERVENÝ, Josef. *Konstrukční tabulky a grafy*. Plzeň: ZČU, 2016.

Přílohy

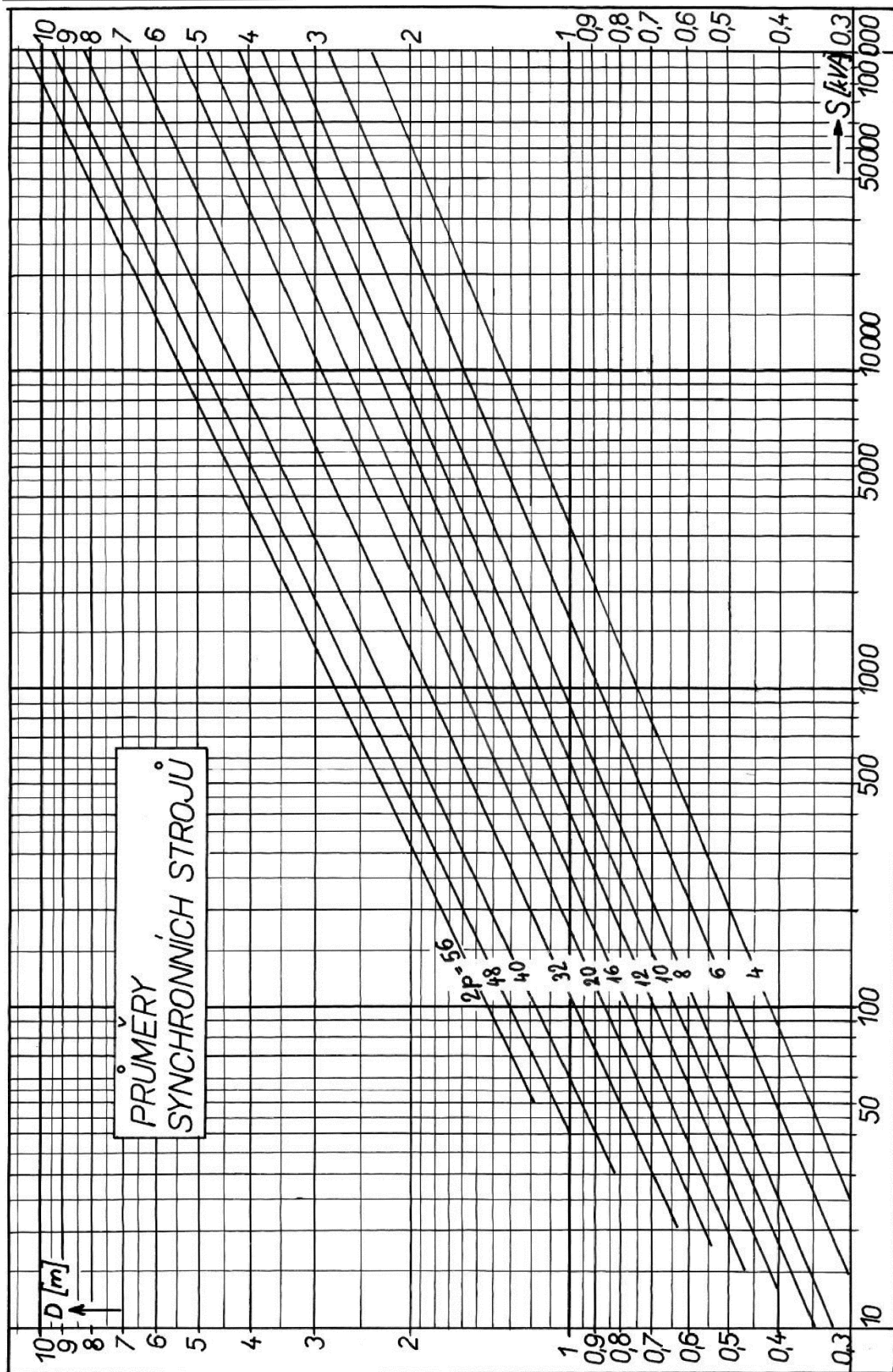
- [A] Graf k určení obvodové proudové hustoty a indukce ve vzduchové mezeře.
- [B] Graf ke stanovení průměru synchronního stroje.
- [C] Tabulka s normalizovanými rozměry drážek.
- [D] Tabulka s normalizovanými rozměry měděných pasů.
- [E] Graf k výpočtu činitele základní harmonické magnetické indukce.
- [F] Graf pro stanovení deformačního činitele magnetického napětí.
- [G] Graf k určení Carterova činitele.
- [H] Magnetizační charakteristika elektrotechnických plechů.
- [I] Magnetizační charakteristika konstrukční oceli.
- [J] Nomogram pro určení skutečné magnetické indukce v zubech induktu.
- [K] Graf pro určení činitelů povrchových ztrát.
- [L] Graf ke stanovení součinitele přestupu tepla.
- [M] Podélný řez synchronního stroje – oboustranný ventilační systém.
- [N] Podélný řez synchronního stroje – jednostranný ventilační systém.
- [O] Příčný řez synchronního stroje – pro oboustranný i jednostranný ventilační systém.

Přílohy A-B zdroj [9]; příloha C zdroj [7] a přílohy D-L zdroj [9].

Příloha A – Graf k určení obvodové proudové hustoty a indukce ve vzduchové mezeře.



Příloha B – Graf ke stanovení průměru synchronního stroje.



Příloha C – Tabulka s normalizovanými rozměry drážek.

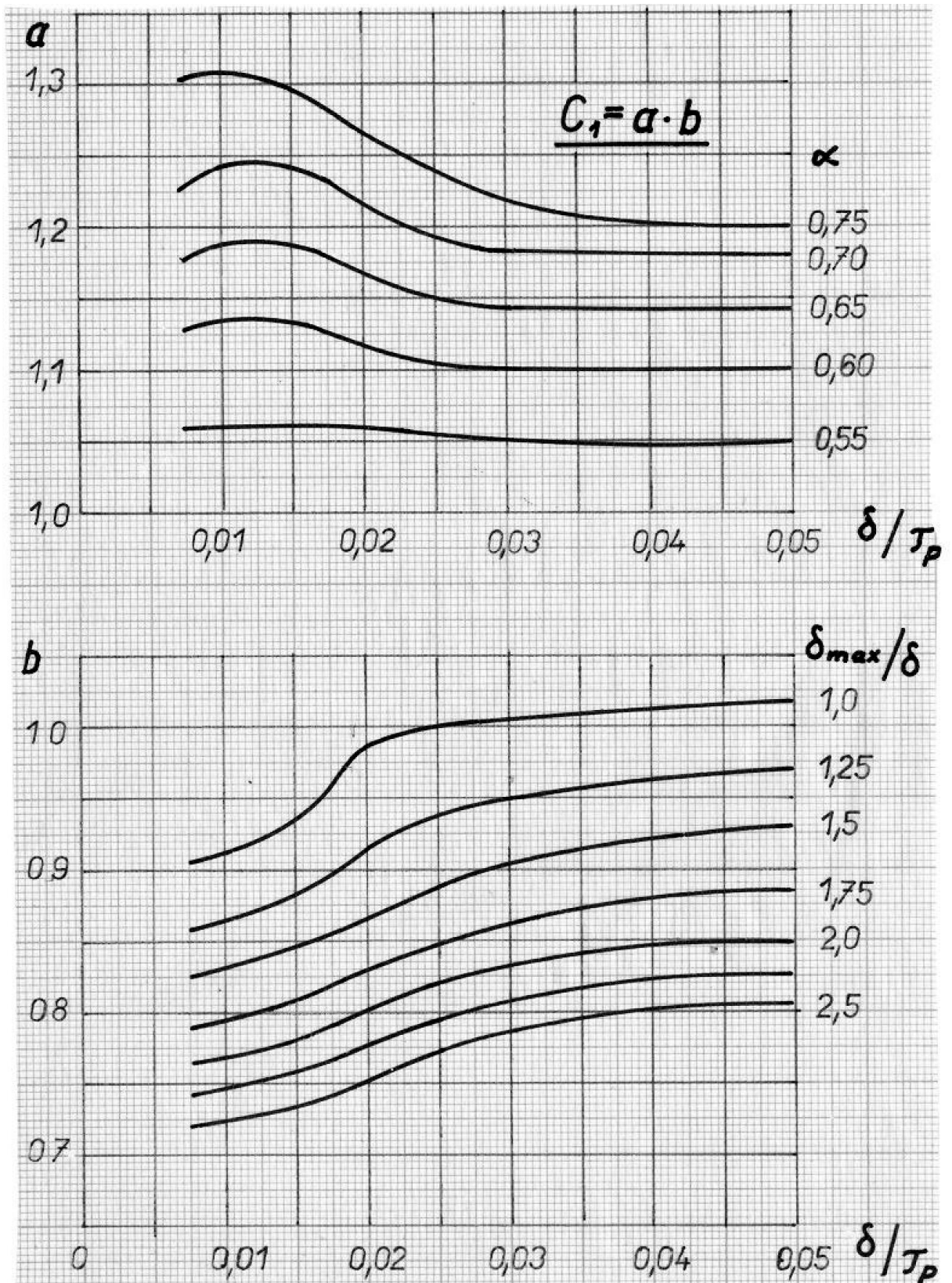
Drážka M					Drážka W						Drážka U
b_1	h_0	h_1	x_1	λ_z	b_1	b_0	h_0	h_1	u	λ_z	b_1
5	0,7	3,5	1,2	0,704	4	2,2	0,5	0,90	1,50	0,561	1,4
5,2		3,3	1,1	0,658	4,2			1,00	1,40	0,587	1,5
5,5		3,6	1,2	0,664	4,4			0,95	1,55	0,516	1,6
5,8		3,5	1,2	0,621	4,6	1,05		1,45	0,540	1,7	
6		3,3	1,1	0,581	4,8	1,15		1,35	0,562	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	0,603	2
7		4,0	1,4	0,576	5,5	2,8		1,35	1,25	0,553	2,2
7,3		3,6	1,25	0,517	5,8			1,50	1,10	0,580	2,4
7,6		4,0	1,4	0,536	6	3,0		1,50	1,00	0,550	2,6
8		4,0	1,4	0,522	6,2			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	3,2		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		1,0	4,0	1,4	0,420	7,2		3,5	2,00	0,40	0,599
10,5	0,402				7,5	1,60	1,40		0,477	3,8	
11	0,386				7,8	1,72	1,28		0,493	4	
11,5	5,0		1,65	0,371	8	4,0	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	0,343	9		2,00	1,00	0,528	4,6	
13	0,331		9,5	0,331	9,5	2,20	0,80	0,550	4,8		
13,5	0,404		10	0,404	10	4,5	2,20	0,80	0,505	5	
14	0,390		10,5	0,390	10,5		2,40	0,60	0,524	5,2	
14,5	0,372		11	0,372	11		2,60	0,40	0,541	5,5	
15	6,0		1,6	0,366	11,5	5,0	1,95	1,05	0,412	5,8	
15,5				0,355	12		2,10	0,90	0,424	6	
16				0,345	12,5		2,25	0,75	0,436	6,2	
16,5	0,392		13	0,392	13	5,5	2,25	1,25	0,407	6,5	
17	0,391		13,5	0,391	13,5		2,40	1,10	0,418	6,8	
17,5	0,368	14	0,368	14	2,55		0,95	0,428	7		
18	9,0	2,45	0,362	14,5	6,0	2,55	0,95	0,403	7,2		
18,5			0,352	15		2,70	0,80	0,412	7,5		
19			0,344	15,5		2,85	0,65	0,472	7,8		
19,5	0,461	16	0,461	16	1,0	3,00	0,50	0,480	8		
20	0,450	16,5	0,450	16,5		3,15	0,85	0,489	8,5		
20,5	0,441	17	0,441	17		3,30	0,70	0,497	9		
21	0,430	17,5	0,430	17,5	7,0	3,45	0,55	0,504	9,5		
21,5	0,415	18	0,415	18		3,60	0,40	0,512	10		
22	0,405	18,5	0,405	18,5		3,75	0,25	0,519	10,5		
22,5	0,397	19	0,397	19	1,0	3,90	0,10	0,525	11		
23	0,389	20	0,389	20		2,80	1,20	0,414	11,5		
23,5	0,388	21	0,388	21		3,00	1,00	0,422	12		
24	0,382	22	0,382	22	3,20	0,80	0,430	12,5			
25	0,367	23	0,367	23	3,40	0,60	0,436	13			
26	0,354	24	0,354	24	3,40	0,60	0,395	13,5			
27	0,342	25	0,342	25	3,60	0,40	0,402	14			
28	0,322	26	0,322	26	3,80	0,20	0,408	14,5			
30	0,310	27	0,310	27	4,00	0,00	0,413	15			
32	0,292	28	0,292	28	4,20	0,80	0,419				

Příloha D – Tabulka s normalizovanými rozměry měděných pasů.

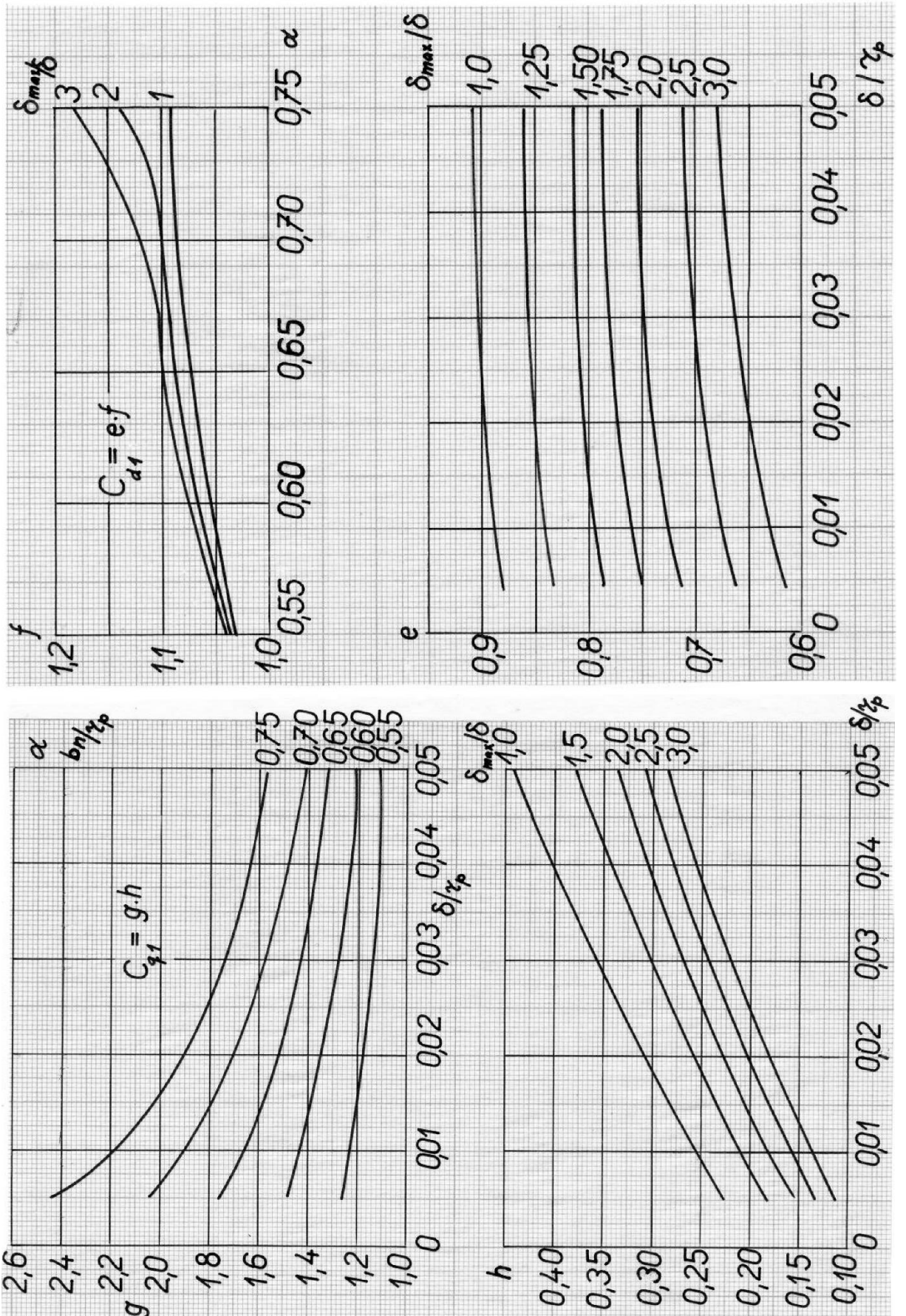
Jmenovitá tloušťka [mm]	1,8	1,3	1,66	0,8	1,0	1,1	1,2	1,4	(1,3)	1,4	(1,5)	1,6	1,8	2,0	2,2	2,5	2,8
0,30																	
2,0	2,18	2,38	2,58	2,69	2,89												
2,2	2,42	2,64	2,86	2,99	3,21												
2,5	2,78	3,03	3,28	3,44	3,69	4,19	4,45										
2,8	2,1	2,66	2,94	3,14	3,42	3,70	3,89	4,17	4,73	5,05							
3,0	2,26	2,86	3,16	3,38	3,68	3,98	4,19	4,49	5,09	5,45	6,05	6,9					
3,5	2,66	3,36	3,71	3,98	4,33	4,68	4,94	5,29	5,99	6,45	7,15	8,2	9,25				
4,0	3,06	3,86	4,26	4,58	4,98	5,38	5,69	6,09	6,89	7,45	8,25	9,45	10,6				
4,5	3,46	4,36	4,81	5,18	5,63	6,08	6,44	6,89	7,79	8,45	9,35	10,7	12,0				
5,0	3,86	4,86	5,36	5,78	6,28	6,78	7,19	7,69	8,69	9,45	10,4	12,0	13,5				
5,5	4,26	5,36	5,91	6,38	6,93	7,48	7,94	8,49	9,59	10,4	11,5	13,2	14,8				
6,0	4,66	5,86	6,46	6,98	7,58	8,18	8,69	9,29	10,5	11,4	12,6	14,5	16,3				
6,5	5,06	6,36	7,01	7,58	8,23	8,88	9,44	10,1	11,4	12,4	13,7	17,7	17,6				
7	5,46	6,86	7,56	8,18	8,88	9,58	10,2	10,9	12,3	13,4	14,8	17,0	19,0				
8	6,26	7,86	8,66	9,38	10,2	11,0	11,7	12,5	14,1	15,4	17,0	19,5	21,8				
9	7,06	8,86		10,6	11,5	12,4	13,2	14,1	15,9	17,4	19,2	22,0	24,6				
10	7,86	9,86		11,8	12,8	13,8	14,7	15,7	17,7	19,4	21,4	24,5	27,4				
11	8,66	10,9		13,0	14,1	15,2	16,2	17,3	19,5	21,4	23,6	27,0	30,2				
12	9,46	11,9		14,2	15,4	16,6	17,7	18,9	21,8	23,4	25,8	29,5	33,0				
13																	
14																	
(15)																	
16																	
18																	
20																	
25																	
30																	
3,0																	
(3,2)																	
3,5																	
4																	
4,5																	
5																	
5,5																	
6																	
(6,5)																	
7																	
8																	
9																	
10																	

Jmenovitá tloušťka [mm]	3,0	(3,2)	3,5	4	4,5	5	5,5	6	(6,5)	7	8	9	10
0,30													
2,0													
2,2													
2,5													
2,8													
3,0													
3,5													
4,0													
4,5													
5,0													
5,5													
6,0													
6,5													
7													
8													
9													
10													

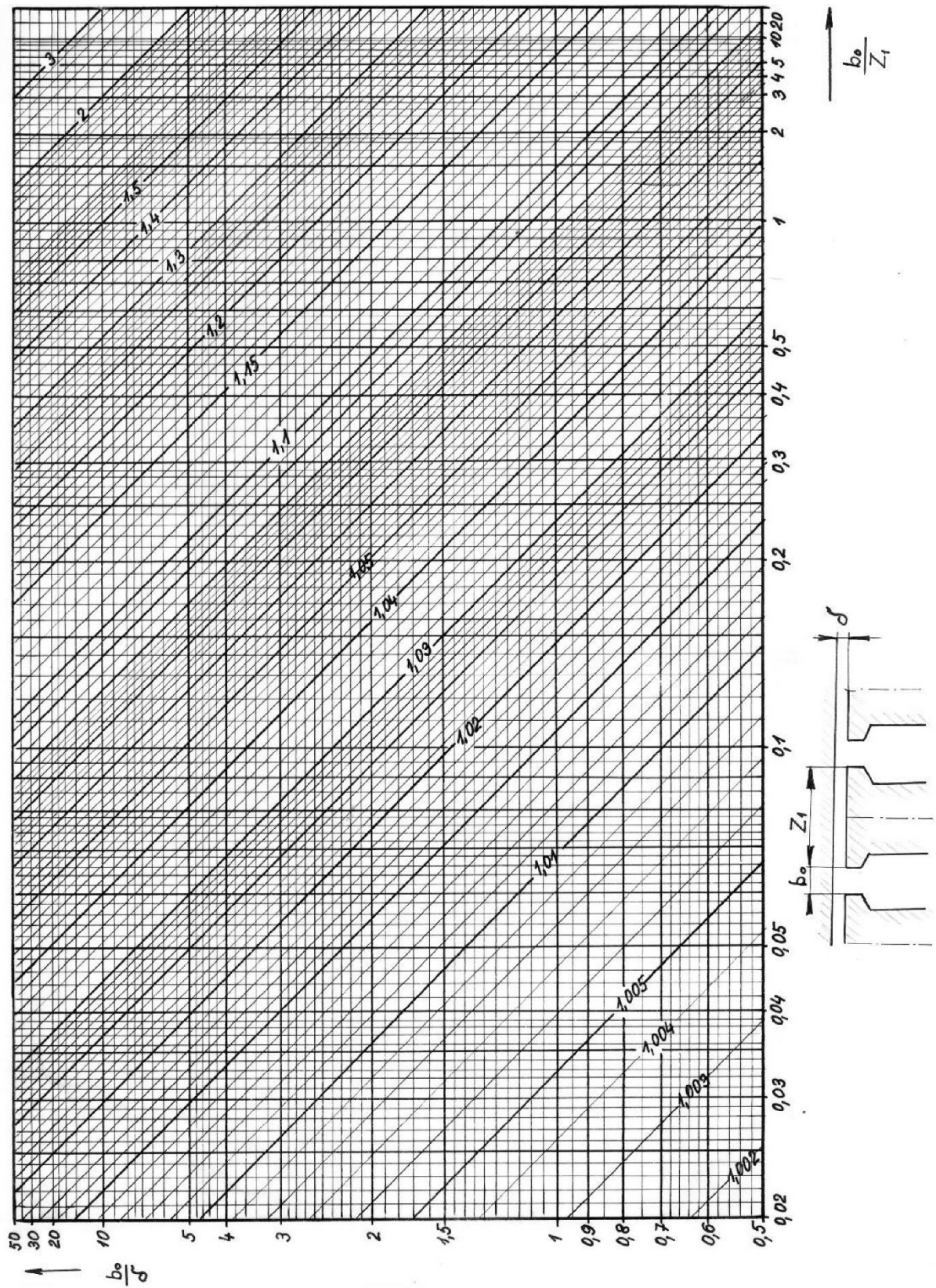
Příloha E – Graf k výpočtu činitele základní harmonické magnetické indukce.



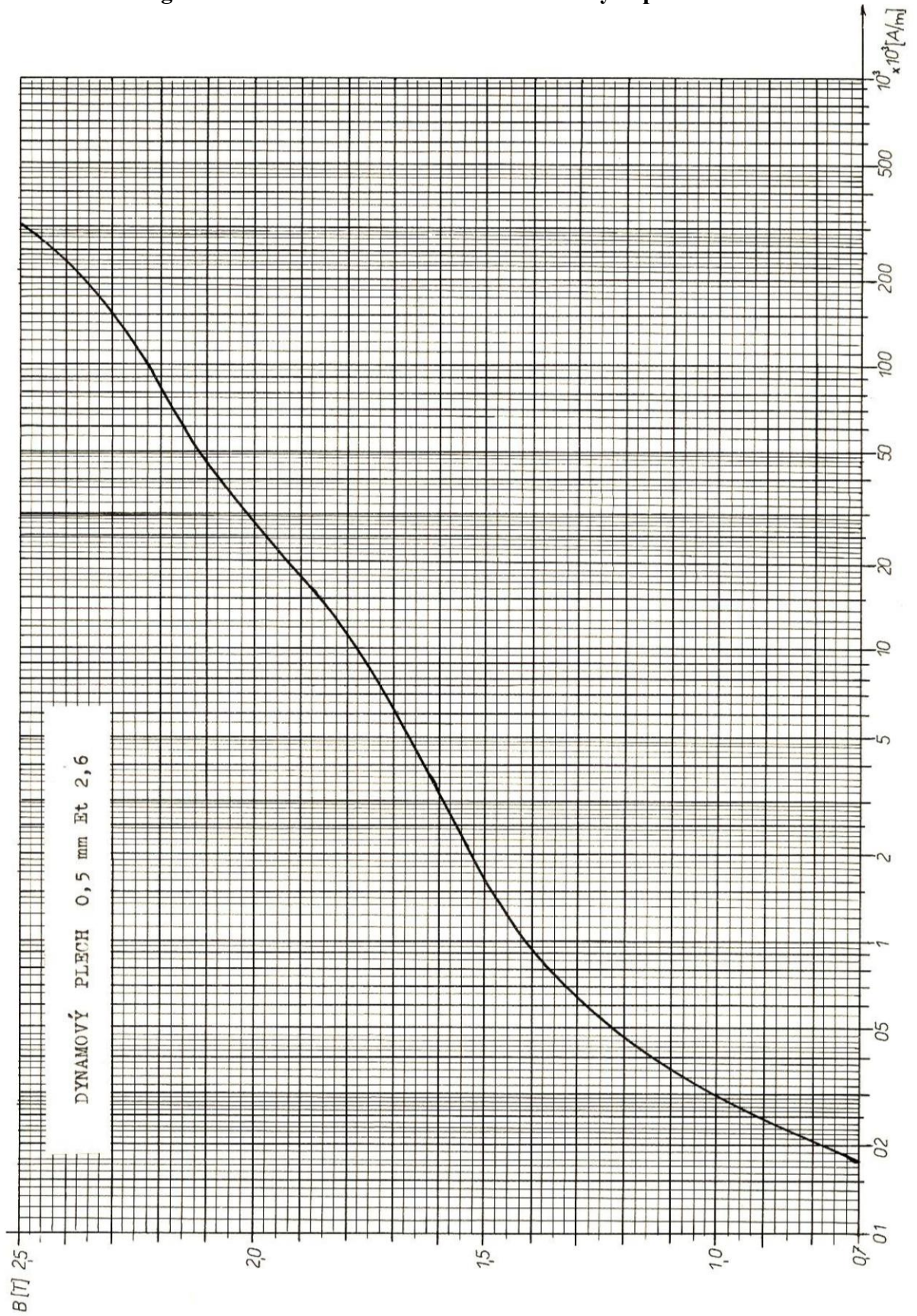
Příloha F – Graf pro stanovení deformačního činitele magnetického napětí.



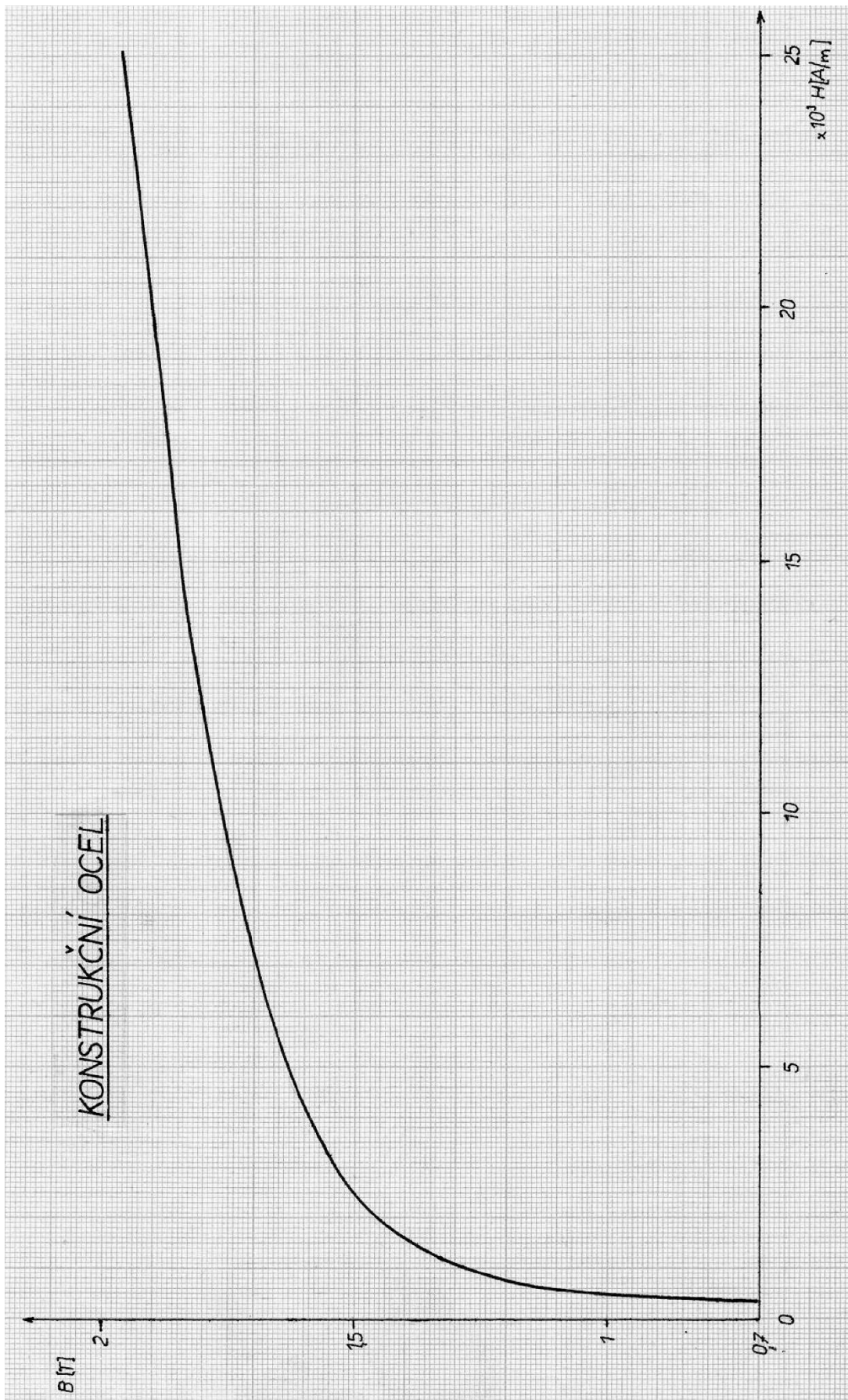
Příloha G – Graf k určení Carterova činitele.



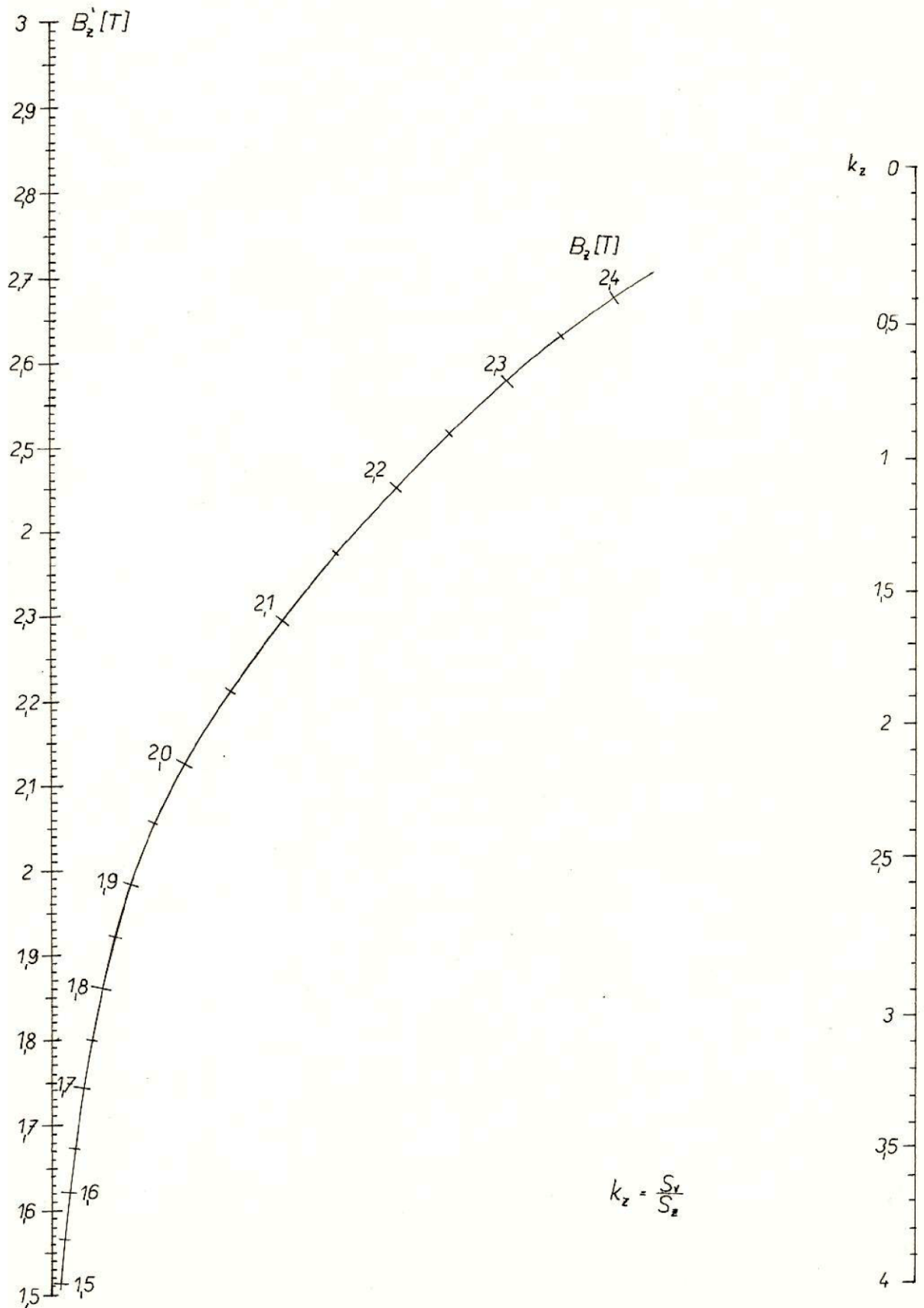
Příloha H – Magnetizační charakteristika elektrotechnických plechů.



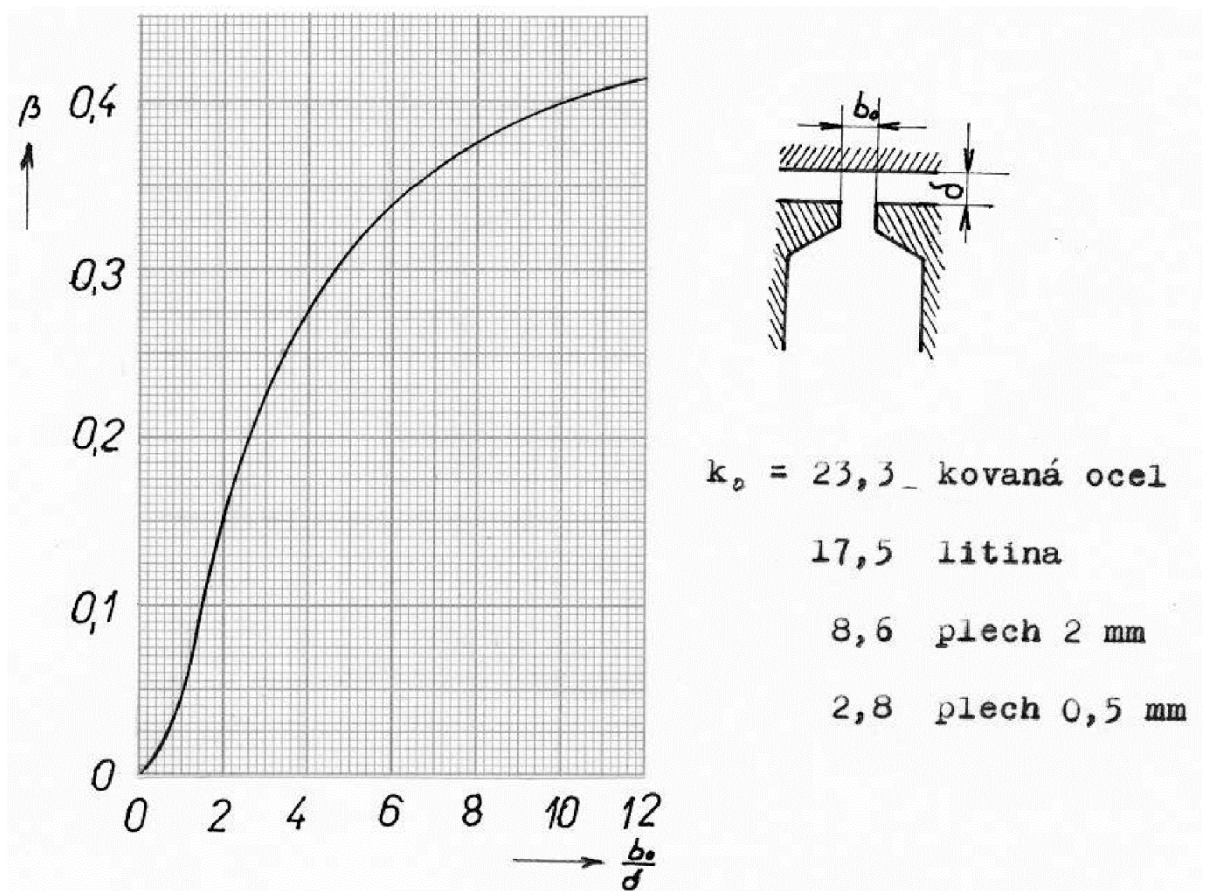
Příloha I – Magnetizační charakteristika konstrukční oceli.



Příloha J – Nomogram pro určení skutečné magnetické indukce v zubech induktu.



Příloha K – Graf pro určení činitelů povrchových ztrát.



Příloha L – Graf ke stanovení součinitele přestupu tepla.

