

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ
ELEKTRONIKY**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Vliv velikosti činitele pólového krytí na vlastnosti
synchronního stroje**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2017/2018

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Bc. Vojtěch ŠAFÁŘ

Osobní číslo: E16N0062P

Studijní program: N2612 Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: Průmyslová elektronika a elektromechanika

Název tématu: Vliv velikosti činitele pólového krytí na vlastnosti synchronního stroje

Zadávatel katedra: Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

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

1. Proveďte elektromagnetický návrh synchronního generátoru s parametry: $S=6500$ kVA; $U_s=6300$ V; $2p=10$; $m=3$; $f=50$ Hz; $\cos \varphi=0,8$; $\alpha=0,65$.
2. Proveďte výpočet stroje se stejnými parametry pro $\alpha=0,75$.
3. Využijte k výpočtu stroje průběhu magnetického pole, které získáte pomocí MKP.
4. Proveďte vyhodnocení výsledku.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

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

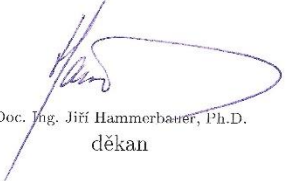
Vedoucí diplomové práce:

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

Tato diplomová práce se zabývá problematikou elektromagnetického návrhu a vlivem velikosti činitele pólového krytí na vlastnosti synchronního stroje. Práce je rozdělena do 6 částí. V první části je proveden elektromagnetický návrh synchronního stroje s činitelem pólového krytí $\alpha = 0,65$. Ve druhé části je vypočten elektromagnetický návrh synchronního stroje s činitelem pólového krytí $\alpha = 0,75$. Třetí část je věnována analýze magnetického pole těchto strojů metodou konečných prvků. Ve čtvrté a páté části je proveden upřesňující výpočet strojů z první a druhé části se získanými hodnotami z analýzy magnetického pole. Šestá část srovnává parametry vypočtených strojů.

Klíčová slova

Synchronní stroj, elektromagnetický návrh, činitel pólového krytí, pólový nástavec, metoda konečných prvků, FEMM, magnetické pole, magnetická indukce, magnetický tok

Abstract

The master these deals with the issue of electromagnetic field's proposal and the influence of pole coverage factor to properties of synchronous machines. The these is divided into six parts. The electromagnetic proposal of synchronous machine with the pole coverage factor $\alpha = 0,65$ is realized in the first part. The electromagnetic proposal of synchronous machine with the pole coverage factor $\alpha = 0,75$ is calculated in the second part. The third part is focused on an analysis of electromagnetic field of these machines using the finite element method. The advanced calculation of machines from the first and the second part is provided in the fourth and fifth part with values obtained from the magnetic field analysis. The sixth part compares parameters of calculated machines.

Key words

Synchronous machine, electromagnetic proposal, pole coverage factor, pole piece, finite element method, FEMM, magnetic field, magnetic induction, magnetic flux

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 bakalářské/diplomové práce je legální.

.....
podpis

V Plzni dne 21. 5. 2018

Vojtěch Šafář

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce, doc. Ing. Josefovi Červenému, CSc., a doc. Ing. Karlovi Hruškovi, Ph.D., za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	11
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	13
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK (ŘECKÁ PÍSMENA)	19
1. ELEKTROMAGNETICKÝ NÁVRH SYNCHRONNÍHO GENERÁTORU S $A = 0,65$.21	
1.1 ZADANÉ PARAMETRY	21
1.2 ZÁKLADNÍ VÝPOČTY	21
1.3 NÁVRH VINUTÍ INDUKTU	23
1.3.1 <i>Vinutí – parametry</i>	26
1.3.2 <i>Výpočet činitele vinutí</i>	28
1.3.3 <i>Essonův činitel</i>	29
1.4 NÁVRH DRÁŽKY	30
1.5 ODPOR A ROZPTYLOVÁ REAKTANCE STATOROVÉHO VINUTÍ	33
1.5.1 <i>Délka čela</i>	34
1.5.2 <i>Vyložení čel v podélném směru:</i>	35
1.5.3 <i>Odpor jedné fáze</i>	36
1.5.4 <i>Rozptylová reaktance statorového vinutí</i>	37
1.6 NÁVRH MAGNETICKÉHO OBVODU	38
1.6.1 <i>Magnetické napětí reakce kotvy</i>	39
1.6.2 <i>Dimenzování magnetického obvodu</i>	40
1.6.3 <i>Délka středních siločar jednotlivých částí magnetického obvodu</i>	42
1.6.4 <i>Charakteristika naprázdno</i>	42
1.7 NÁVRH BUDÍČÍHO VINUTÍ:	46
1.7.1 <i>Budící cívka</i>	46
1.7.2 <i>Orientační výpočet oteplení budící cívky</i>	48
1.8 TLUMIČ	50
1.9 KARTÁČE	51
1.10 PŘIPEVNĚNÍ PÓLŮ	53
1.10.1 <i>Hmotnost pólů</i>	54
1.10.2 <i>Výpočet kladiva</i>	56
1.10.3 <i>Mezipólové rozpěrky</i>	57
1.11 ZTRÁTY A ÚČINNOST	58
1.11.1 <i>Jouleovy ztráty</i>	58
1.11.2 <i>Ztráty v železe</i>	59
1.11.3 <i>Povrchové ztráty</i>	60
1.11.4 <i>Mechanické ztráty</i>	60
1.11.5 <i>Přídavné ztráty</i>	60
1.11.6 <i>Celkové ztráty</i>	60
1.11.7 <i>Účinnost</i>	61
2. ELEKTROMAGNETICKÝ NÁVRH SYNCHRONNÍHO GENERÁTORU S $A=0,75$...62	
2.1 ZADANÉ PARAMETRY	62
2.2 NÁVRH MAGNETICKÉHO OBVODU	62
2.2.1 <i>Magnetické napětí reakce kotvy</i>	63
2.2.2 <i>Dimenzování magnetického obvodu</i>	64
2.2.3 <i>Délka středních siločar jednotlivých částí magnetického obvodu</i>	65
2.2.4 <i>Charakteristika naprázdno</i>	65

2.3	NÁVRH BUDÍČÍHO VINUTÍ:	68
2.3.1	<i>Budící cívka</i>	68
2.3.2	<i>Orientační výpočet oteplení budící cívky</i>	70
2.4	TLUMIČ	72
2.5	KARTÁČE	73
2.6	PŘIPEVNĚNÍ PÓLŮ A HMOTNOST PÓLŮ	75
2.6.1	<i>Hmotnost pólů</i>	75
2.6.2	<i>Výpočet kladiva</i>	77
2.6.3	<i>Mezipólové rozpěrky</i>	78
2.7	ZTRÁTY A ÚČINNOST	79
2.7.1	<i>Jouleovy ztráty</i>	79
2.7.2	<i>Ztráty v železe</i>	79
2.7.3	<i>Povrchové ztráty</i>	80
2.7.4	<i>Mechanické ztráty</i>	80
2.7.5	<i>Přídavné ztráty</i>	81
2.7.6	<i>Celkové ztráty</i>	81
2.7.7	<i>Účinnost</i>	81
3.	ANALÝZA MAGNETICKÉHO POLE POMOCÍ METODY KONEČNÝCH PRVKŮ	82
3.1	METODA KONEČNÝCH PRVKŮ	82
3.2	DEFINICE PROBLÉMU	82
3.3	VÝSLEDKY VÝPOČTU	84
3.4	ANALÝZA VÝSLEDKŮ.....	87
4.	STROJ S $A = 0,65$ SE SKUTEČNÝM MAGNETICKÝM TOKEM	91
4.1.1	<i>Essonův činitel</i>	92
4.2	ODPOR A ROZPTYLOVÁ REAKTANCE STATOROVÉHO VINUTÍ	92
4.3	NÁVRH MAGNETICKÉHO OBVODU	93
4.3.1	<i>Magnetické napětí reakce kotvy</i>	93
4.3.2	<i>Dimenzování magnetického obvodu</i>	94
4.3.3	<i>Charakteristika naprázdno</i>	96
4.4	NÁVRH BUDÍČÍHO VINUTÍ:	98
4.4.1	<i>Budící cívka</i>	98
4.4.2	<i>Orientační výpočet oteplení budící cívky</i>	100
4.5	ZTRÁTY A ÚČINNOST	101
4.6	HMOTNOST PÓLŮ	101
5.	STROJ S $A = 0,75$ SE SKUTEČNÝM MAGNETICKÝM TOKEM	103
5.1.1	<i>Essonův činitel</i>	103
5.2	ODPOR A ROZPTYLOVÁ REAKTANCE STATOROVÉHO VINUTÍ	104
5.2.1	<i>Rozptylová reaktance statorového vinutí</i>	104
5.3	NÁVRH MAGNETICKÉHO OBVODU	105
5.3.1	<i>Magnetické napětí reakce kotvy</i>	105
5.3.2	<i>Dimenzování magnetického obvodu</i>	106
5.3.3	<i>Charakteristika naprázdno</i>	107
5.4	NÁVRH BUDÍČÍHO VINUTÍ:	109
5.4.1	<i>Budící cívka</i>	109
5.4.2	<i>Orientační výpočet oteplení budící cívky</i>	111
5.5	ZTRÁTY A ÚČINNOST	112
5.6	HMOTNOST PÓLŮ	112
6.	PŘEHLED HODNOT	114
	ZÁVĚR	115

SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ117

PŘÍLOHY1

PŘÍLOHA A – NOMOGRAM K URČENÍ INDUKCE VE VZDUCHOVÉ MEZEŘE A OBVODOVÉ PROUDOVÉ HUSTOTY	2
PŘÍLOHA B – NOMOGRAM K URČENÍ PRŮMĚRU INDUKTU SYNCHRONNÍCH STROJŮ	3
PŘÍLOHA C – NORMALIZOVANÉ ROZMĚRY A PRŮŘEZY MĚDĚNÝCH PASŮ	4
PŘÍLOHA D – B-H CHARAKTERISTIKA KONSTRUKČNÍ OCELI	5
PŘÍLOHA E – B-H CHARAKTERISTIKA DYNAMOVÝCH PLECHŮ	6
PŘÍLOHA F – NOMOGRAM K URČENÍ SKUTEČNÉ INDUKCE V ZUBECH INDUKTU	7
PŘÍLOHA G – CARTERŮV ČINITEL RESPEKTUJÍCÍ VLIV DRÁŽKOVÁNÍ INDUKTU	8
PŘÍLOHA H – ČINITEL ZÁKLADNÍ HARMONICKÉ MAGNETICKÉ INDUKCE A TVARU MAGNETICKÉHO TOKU	9
PŘÍLOHA I – DEFORMAČNÍ ČINITEL MAGNETICKÉHO NAPĚTÍ.....	10
PŘÍLOHA J – ČINITEL POVRCHOVÝCH ZTRÁT	11

Úvod

Elektrické točivé stroje jsou součástí našeho každodenního života. Bez elektrických strojů si dnešní život ani nedokážeme představit. Hrají v našich činnostech důležitou roli. A to ať jako motory pro pohon nejrůznějších zařízení, tak jako generátory, které nám vyrábí elektrickou energii.

Synchronní stroje slouží především jako generátory elektrické energie v tepelných, vodních i jaderných elektrárnách. První komerčně vyráběný synchronní generátor sestrojil v roce 1887 německý inženýr Friedrich August Haselwander. Od té doby prošly stroje značným vývojem, který pokračuje i v dnešní době.

Synchronní stroje lze rozdělit na dva typy. Na stroj s vyniklými póly (hydroalternátory) a stroje s hladkým rotorem (turboalternátory). Hydroalternátory jsou pomaluběžné stroje s velkým počtem pólů $2p \geq 4$. Používají se ve spojení s vodní turbínou. Mají velký průměr a malou délku. Stroje s hladkým rotorem se používají ve spojení s parní nebo plynovou turbínou. Vyrábějí se dvoupólové $2p = 2$, točí se tedy rychlostí 3000 ot/min při frekvenci 50 Hz. Tyto stroje mají kvůli vysoké odstředivé rychlosti menší průměry, avšak jsou dlouhé.

Návrh strojů je dosti komplikovaný a má svá úskalí. Ne všechny parametry lze provést analytickým výpočtem. Některé parametry se volí na základě zkušenosti konstruktéra a již vyrobených strojů. Při návrhu je nutné vhodně dimenzovat jak elektrickou, tak magnetickou část stroje. Velké pokroky v optimalizaci návrhu přineslo nasazení prvních počítačů v 50. letech 20. století. V dnešní době je díky pokročilým simulačním softwarům možno namodelovat celý stroj a získat tak důležité informace např. o rozložení magnetických polí nebo oteplení stroje. Tyto informace nám dovolují provést kvalitnější návrh stroje.

Tato diplomová práce se zabývá vlivem pólového krytí na vlastnosti synchronního stroje. Činitel pólového krytí je podíl délky pólového oblouku k pólové rozteči stroje a je závislý na tvaru a rozměrech pólového nástavce. Samotnou práci lze rozdělit na 6 částí.

V první části je proveden elektromagnetický návrh synchronního stroje s činitelem pólového krytí $\alpha = 0,65$. Návrh zahrnuje určení hlavních rozměrů a parametrů stroje. Dále pak návrh statorového a budícího vinutí, dimenzování magnetického obvodu, stanovení uchycení pólů, výpočet hmotnosti pólů a stanovení ztrát a účinnosti stroje.

V druhé části je proveden stejný elektromagnetický návrh synchronního stroje s činitelem pólového krytí $\alpha = 0,75$.

Třetí kapitola je zaměřena na analýzu magnetického pole obou strojů pomocí metody konečných prvků. Analýza je prováděna v programu FEMM a výsledky vyhodnoceny v programu Matlab.

Ve čtvrté a páté kapitole je pak proveden upřesňující návrh strojů z kapitoly 1 respektive 2, na základě dat získaných analýzou jejich magnetického pole.

V poslední šesté části je provedeno tabulkové srovnání rozdílných parametrů mezi jednotlivými stroji.

Seznam symbolů a zkratek

$2p$	Počet pólů	[-]
A	Obvodová proudová hustota	[A/m]
a	Celkové vyložení čel	[m]
a	Přesahující část pólového nástavce	[m]
a	Šířka krku kladiva	[m]
a_{ss}	Počet paralelních větví každé fáze střídavého vinutí	[-]
B	Magnetická indukce	[T]
B	Šířka klínu kladiva	[m]
B'_{z1}	Pomyslná indukce v hlavě zubu	[T]
B'_{z2}	Pomyslná indukce ve středu zubu	[T]
B'_{z3}	Pomyslná indukce v patě zubu	[T]
b_c	Šířka cívky	[m]
$b_{\check{c}}$	Šířka čela	[m]
b_d	Šířka drážky	[m]
B_{jr}	Magnetická indukce ve jhu rotoru	[T]
B_{js}	Magnetická indukce ve jhu statoru	[T]
b_k	Šířka kartáče	[m]
b_n	Šířka pólového nástavce	[m]
B_p	Magnetická indukce v pólu	[T]
b_p	Šířka pólu	[m]
b_v	Šířka vodiče	[m]
b_{vi}	Šířka izolovaného vodiče	[m]
B_{δ}	Indukce ve vzduchové mezeře	[T]
C	Essonův činitel elektromagnetické využití stroje	[kVA/m ³ .ot/min]
c	Vzdálenost mezi čely	[m]
c	Výška kladiva	[m]
C_1	Činitel základní harmonické magnetické indukce	[-]
C_{d1}	Carterův činitel napětí v podél. směru	[-]
C_{q1}	Carterův činitel napětí v příčném směru	[-]
$\cos\varphi$	Účinník	[-]
D_{je}	Vnější průměr statoru stroje	[m]
d_h	Průměr hřídele	[m]

D_k	Vnější průměr kroužků	[m]
d_t	Průměr tyče tlumiče	[m]
D_1	Průměr induktu ve vzduchové mezeře	[m]
D_2	Průměr induktu ve vzduchové mezeře + výška drážky	[m]
D_3	Průměr induktu ve vzduchové mezeře + 2x výška drážky	[m]
e	Délka oka	[m]
e	Vzdálenost těžiště cívky od osy pólu	[m]
f	Frekvence	[Hz]
F_a	Amplituda základní harmonické reakce kotvy	[A]
F_b	Budicí magnetické napětí	[A]
F_{d1}	Amplituda základní harmonické napětí v podél. směru	[A]
F_{q1}	Amplituda základní harmonické napětí v příčném směru	[A]
F_p	Magnetické napětí v pólu	[A]
F_p	Odstředivá síla pólu s cívkou	[N]
F_{p1}	Síla na jednotku délky pólu	[N/m]
F_r	Magnetické napětí v rotoru	[A]
F_s	Magnetické napětí v statoru	[A]
F_z	Magnetické napětí v zubu	[A]
F_δ	Magnetické napětí ve vzduchové mezeře	[A]
g	Celkový počet vodičů v drážce	[-]
H	Intenzita magnetického pole	[A/m]
h	Výška kladiva	[m]
h'_n	Náhradní výška pólového nástavce	[m]
h_c	Výška cívky	[m]
$h_\check{c}$	Výška čela	[m]
h_d	Hloubka drážky	[m]
h_{js}	Výška statorového jádra	[m]
h_k	Výška klínu	[m]
h_n	Výška pólového nástavce	[m]
H_p	Intenzita magnetického pole v pólu	[A/m]
h_p	Výška pólu	[m]
H_r	Intenzita magnetického pole v rotoru	[A/m]
H_s	Intenzita magnetického pole ve statoru	[A/m]
h_v	Výška vodiče	[m]

h_{vi}	Výška izolovaného vodiče	[m]
$H_{zstř}$	Střední hodnota intenzity magnetického pole	[A/m]
H_{z1}	Intenzita magnetického pole v hlavě zubu	[A/m]
H_{z2}	Intenzita magnetického pole ve středu zubu	[A/m]
H_{z3}	Intenzita magnetického pole v patě zubu	[A/m]
h_0	Výška klínu	[m]
h_1	Výška můstku	[m]
h_2	Hloubka drážky bez klínu	[m]
i	Počet paketů	[-]
i	Počet segmentů vodiče rozděleného na výšku	[-]
i	Počet mezipólových rozpěrek	[-]
I_b	Budící proud	[A]
i_k	Počet kanálů	[-]
i_k	Počet kartáčů jedné polarity	[-]
I_1	Fázový proud	[A]
j	Počet segmentů vodiče rozděleného na šířku	[-]
k	Překladové číslo	[-]
k_c	Výsledný Carterův činitel	[-]
k_{cd}	Carterův činitel respektující vliv drážkování	[-]
k_{cd}	Carterův činitel respektující vliv rad. ventilačních kanálů	[-]
k_{Cu}	Činitel zvýšení elektrického odporu	[-]
k_{Fe}	Činitel plnění železa	[-]
k_v	Činitel vinutí	[-]
k_{z1}	Činitel pro přepočtení mag. indukce v zubu	[-]
k_{z2}	Činitel pro přepočtení mag. indukce ve středu zubu	[-]
k_{z3}	Činitel pro přepočtení mag. indukce v patě zubu	[-]
k_0	Činitel povrchový ztrát v pólovém nástavci	[-]
L	Celková délka induktu	[m]
l_{be}	Vnější obvod budící cívky	[m]
l_{bs}	Střední délka závitu budící cívky	[m]
$l_č$	Délka čela	[m]
l_d	Délka drážky	[m]
l_e	Efektivní délka stroje	[m]
l_k	Délka kartáče	[m]

L_n	Délka pólového nástavce	[m]
L_p	Délka pólu	[m]
l_p	Délka střední siločáry pólu	[m]
L_r	Délka rotoru	[m]
l_r	Délka střední siločáry jha rotoru	[m]
l_s	Délka střední siločáry jha statoru	[m]
l_v	Délka vodiče	[m]
m	Počet fází	[-]
m'	Matematický počet fází	[-]
m_{Cub}	Hmotnost budící cívky	[kg]
m_{Fej}	Hmotnost jádra statoru	[kg]
m_{Fez}	Hmotnost zubů statoru	[kg]
m_n	Hmotnost pólového nástavce	[kg]
m_p	Hmotnost pólu	[kg]
m_v	Výška mezivrstvy	[m]
n	Otáčky	[ot/min]
n'_p	Počet poloh budící cívky	[-]
N'_{p1}	Počet závitů v jedné poloze budící cívky	[-]
N_b	Počet závitů budící cívky	[-]
n_d	Počet vodičů v drážce	[-]
N_s	Počet závitů v sérii	[-]
n_s	Počet segmentů	[-]
o	Délka oka	[m]
P	Činný výkon	[W]
p	Počet pólpárů	[-]
p_k	Měrný tlak	[Pa]
Q	Počet drážek induktu	[-]
q	Počet drážek na pól a fázi	[-]
Q_f	Počet drážek na fázi	[-]
Q_p	Počet drážek na pól	[-]
$Q_{př}$	Počet drážek na překlad	[-]
Q_{tn}	Počet tyčí v pólovém nástavci	[-]
Q_{2pc}	Ochlazovací povrch všech cívek	[-]
R	Střední poloměr oka	[m]

r	Vnitřní poloměr oka	[m]
r_c	Poloměr těžiště cívky	[m]
r_p	Poloměr těžiště pólu	[m]
R_{Cub}	Odpor cívek budícího vinutí	[Ω]
$R_{1\&75}$	Celkový odpor při 75°C	[Ω]
$R_{1\&20}$	Odpor čel vinutí při 20°C	[Ω]
$R_{1\&75}$	Odpor čel vinutí při 75°C	[Ω]
$R_{1d/20}$	Odpor v drážkové části při 20°C	[Ω]
$R'_{1/20}$	Elektrický odpor pro stejnosměrný proud	[Ω]
$R_{1d/75}$	Odpor v drážkové části při 75°C	[Ω]
S	Zdánlivý výkon	[VA]
S'_{cu1}	Průřez vodiče	[mm ²]
S_b	Průřez kruhu	[mm ²]
S_{cu1}	Průřez vodiče tvořící jeden závit	[mm ²]
S_k	Průřez kruhu	[mm ²]
S_k	Průřez všech kartáčů	[mm ²]
S_{k1}	Průřez jednoho kartáče	[mm ²]
S_t	Průřez tyčí tlumiče	[mm ²]
S_1	Skutečný průřez vodiče	[mm ²]
\check{s}_k	Šířka kanálu	[-]
t	Rozteč mezipólových rozpěrek	[m]
t'_t	Rozteč tyčí tlumiče	[m]
t_{d1}	Drážková rozteč	[m]
t_{d2}	Drážková rozteč ve středu zubu	[m]
t_{d3}	Drážková rozteč u paty zubu	[m]
t_i	Šířka izolace	[m]
t_k	Šířka kartáče	[m]
t_k	Tloušťka kostřičky	[m]
t_p	Mezipólová rozteč	[m]
U_f	Fázové napětí	[V]
$u_{př}$	Přechodové napětí	[V]
U_r	Procentní úbytek napětí na omickém odporu	[%]
U_s	Sdružené napětí	[V]
v_0	Maximální obvodová rychlost	[m/s]

x	Délka šroubovice	[m]
x_d	Procentní hodnota nesyčené synchronní reaktance	[%]
X_σ	Rozptylová reaktance	[Ω]
x_σ	Procentní úbytek napětí na rozptylové reaktanci	[%]
y_k	Krok na komutátoru	[-]
y_1	Přední cívkový krok	[-]
y_{1d}	Přední cívkový krok v počtu drážek	[-]
y_2	Zadní cívkový krok v počtu drážek	[-]
z_1	Šířka zubu v hlavě zubu	[-]
z_2	Šířka zubu ve středu zubu	[-]
z_2	Šířka zubu v patě zubu	[-]

Seznam symbolů a zkratk (řecká písmena)

α	Činitel pólového krytí	[-]
α_{ζ}	Úhel sklonu čel	[°]
β	Poměrné zkrácení kroku	[-]
β	Činitel povrchových ztrát v pólovém nástavci	[-]
ΔP	Ztráty celkové	[W]
ΔP_{Cub}	Ztráty v budícím vinutí	[W]
ΔP_{Cu1}	Ztráty ve statorovém vinutí	[W]
$\Delta P_{Cu1\zeta}$	Ztráty v čelech statorového vinutí	[W]
ΔP_{Cu1d}	Ztráty v drážkách statorového vinutí	[W]
Δp_{Fe}	Ztrátové číslo elektrotechnických plechů	[W/kg]
ΔP_{Fej}	Ztráty v železe statoru	[W]
ΔP_{Fez}	Ztráty v železe v zubech statoru	[W]
ΔP_m	Ztráty mechanické	[W]
ΔP_p	Ztráty povrchové	[W]
$\Delta P_{př}$	Ztráty přídatné	[W]
$\Delta \vartheta_{Cub}$	Oteplení cívký	[°C]
δ	Vzduchová mezera	[m]
ζ	Náhradní výška vodiče	[-]
η	Účinnost	[%]
μ	Součinitel tření	[-]
v	Výběh cívký z drážky	[m]
v	Předpokládaná hodnota rozptylového toku	[%]
v	Obvodová rychlost rotoru	[m/s]
v_k	Obvodová rychlost kroužků	[m/s]
ρ_{Cu}	Měrný odpor mědi	[Ωm]
ρ_{Fe}	Hustota železa	[kg/m ³]
σ_{max}	Maximální dovolené namáhání	[Pa]
σ_{Cu1}	Proudová hustota ve vodiči	[A/mm ²]
σ_{dov}	Dovolené namáhání	[Pa]
σ_k	Maximální proudové zatížení	[A/cm ²]
ϕ	Magnetický tok	[Wb]

ω_s Úhlová rychlost

[m/s]

1. Elektromagnetický návrh synchronního generátoru s $\alpha = 0,65$

V této kapitole bude popsán elektromagnetický návrh synchronního generátoru. Návrh se skládá ze stanovení základních rozměrů stroje, návrhu vinutí induktu a návrhu drážky pro vinutí, výpočtu odporu a rozptylové reaktance vinutí. Dále pak z návrhu magnetického obvodu stroje, budícího vinutí, zvolení počtu kartáčů a návrhu tlumiče. Na závěr jsou stanoveny ztráty a účinnosti stroje. Následující návrh vychází ze skript Stavba elektrických strojů od doc. Ing. Josefa Červeného, CSc., určených jako podklady k předmětům Stavba elektrických strojů 1 a 2 na FEL ZČU v Plzni.

1.1 Zadané parametry

Zdánlivý výkon: $S = 6\,500$ (kVA)

Sdružené napětí: $U_S = 6\,300$ (V)

Počet pólů: $2p = 10$ (-)

Počet fází: $m = 3$ (-)

Frekvence: $f = 50$ (Hz)

Účinník: $\cos \varphi = 0,8$ (-)

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

1.2 Základní výpočty

Kromě výpočtů výkonu, napětí a proudu se jedná hlavně o určení hlavních rozměrů stroje, délky stroje a průměr vrtání statoru.

Činný výkon:

$$P = S \cdot \cos \varphi = 6\,500 \cdot 10^3 \cdot 0,8 = 5\,200 \quad (\text{kW}) \quad (1.1)$$

Fázové napětí:

$$U_f = \frac{U}{\sqrt{3}} = \frac{6300}{\sqrt{3}} = 3736 \quad (\text{V}) \quad (1.2)$$

Otáčky:

$$n = \frac{60 \cdot f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{5} = 600 \quad (\text{ot/min}) \quad (1.3)$$

Fázový proud:

$$I_1 = \frac{S}{U_s \cdot \sqrt{3}} = \frac{6\,500 \cdot 10^3}{6\,300 \cdot \sqrt{3}} = 596 \quad (A) \quad (1.4)$$

Průměr induktu ve vzduchové mezeře:

Jednoznačné určení průměru induktu není možné a je potřeba respektovat množství požadavků na něj kladeného. Průměr bude určen dvěma způsoby, a to na základě empirického vzorce a odečtením hodnoty z grafu. Hodnoty budou porovnány a zvolena jedna hodnota pro další výpočty.

1) Empirický vztah:

$$\begin{aligned} D_1 &= 0,08 \cdot (2p)^{0,625} \cdot S^{0,185} = 0,08 \cdot (10)^{0,625} \cdot 6\,500^{0,185} \\ &= 1,71 \quad (m) \end{aligned} \quad (1.5)$$

Zdánlivý výkon S je nutné do vzorce dosadit v kVA.

2) Z grafu již vyrobených strojů:

Viz příloha B.

$$D_1 = 1,8 \quad (m)$$

Zvolen průměr $DI = 1,7$ m

Další hodnoty odečtené z grafů:

1) Obvodová proudová hustota:

$$A = 63\,000 \quad (A/m)$$

2) Indukce ve vzduchové mezeře:

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

Tyto hodnoty jsou odečteny z grafů v příloze A. Jsou to hodnoty pouze předběžné. Jejich hodnota se v průběhu návrhu může změnit bude-li to potřeba.

Mezipólová rozteč:

$$t_p = \frac{\pi D_1}{2p} = \frac{\pi \cdot 1,7}{10} = 0,53 \quad (m) \quad (1.6)$$

1.3 Návrh vinutí induktu

Obvykle je u statorů synchronních strojů voleno buď smyčkové vinutí, které je složeno z cívek s mnoha závitů nebo vlnové vinutí s dvěma efektivními vodiči v drážce. Vinutí je většinou dvouvrstvé. [1]

Drážková rozteč:

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

Velikost drážkové rozteče by se měla volit v rozmezí 15 až 50 mm. Velikost záleží na rozměrech stroje a napětí stroje. [3]

Počet drážek induktu:

$$Q = \frac{\pi \cdot D_1}{t_{d1}} = \frac{\pi \cdot 1,7}{0,04} = 133,52 \quad (1.7)$$

Počet drážek na pól a fázi:

$$q = \frac{Q}{2p \cdot m} = \frac{133,52}{10 \cdot 3} = 4,45 \quad (1.8)$$

Počet drážek na pól a fázi q je menší než 7 až 8, tudíž bude voleno zlomkové vinutí, které zaručí hladší průběh křivky indukovaného napětí. To znamená, že $q = \frac{n}{c}$. Počet drážek ve všech fázích musí být stejný. Je tedy nutné aby:

$$Q_f = \frac{Q}{m} = \frac{2p \cdot m \cdot q}{m} = 2p \cdot q = 2p \cdot \frac{n}{c} = \text{číslo celé} \quad (1.9)$$

$2p = 10$, a proto c může nabývat pouze hodnoty 2 nebo 5. Dále musí být také splněna podmínka, že c nesmí být násobkem počtu fází. [3]

$$q = 4,5 = 4 \frac{2}{5} = \frac{22}{5}$$

Počet drážek na fázi:

$$Q_f = 2p \cdot q = 10 \cdot \frac{22}{5} = 44 \quad (1.10)$$

Skutečný počet drážek:

Při známém počtu drážek na pól a fázi q a počtu drážek na fázi Q_f je dopočten skutečný počet drážek. Musí být splněna podmínka, že počet drážek musí být dělitelný počtem fází a počtem paralelních větví. [3]

$$Q = Q_f \cdot m = 44 \cdot 3 = 132 \quad (1.11)$$

Statorové plechy:

Pokud je průměr statoru větší než 1m, je nutné statorové plechy rozdělit na segmenty. Počet segmentů v jedné vrstvě je číslo celé nebo zlomek. Je vhodnější však volit číslo celé. U velkých strojů je počet segmentů 6 až 18. Může být poloviční nebo třetinový překlad. Počet drážek na překlad musí být číslo celé, aby dělicí rovina procházela středem drážek.

[1]

$$Q = k \cdot n_s \cdot Q_{př} = 2 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 11 \quad (1.12)$$

kde:

k – překladové číslo
n_s – počet segmentů
Q_{př} – počet drážek na překlad

Zvoleno tedy:

$$k = 2$$

$$n_s = 11$$

$$Q_{př} = 6$$

Počet závitů jedné fáze v sérii:

$$N_s = \frac{\pi \cdot D_1 \cdot A}{2 \cdot m \cdot I_1} = \frac{\pi \cdot 1,763000}{2 \cdot 3 \cdot 596} = 94,14 \quad (1.13)$$

Počet vodičů v drážce:

Při použití dvouvrstvého vinutí musí být počet vodičů v drážce sudé číslo.

$$n_d = \frac{a_{stř} \cdot N_s}{p \cdot q} = \frac{1 \cdot 94,14}{5 \cdot \frac{22}{5}} = 4,18 \quad (1.14)$$

Zvoleno $a_{stř} = 1$ (sériové vinutí) a $nd = 4$

Skutečný počet závitů jedné fáze v sérii:

$$N_s = \frac{n_d \cdot p \cdot q}{a_{stř}} = \frac{4 \cdot 5 \cdot \frac{22}{5}}{1} = 90 \quad (1.15)$$

Skutečná obvodová proudová hustota:

$$A = \frac{2 \cdot m \cdot I_1}{\pi \cdot D_1} N_s = \frac{2 \cdot 3 \cdot 596}{\pi \cdot 1,7} \cdot 90 = 60229 \quad (A/m) \quad (1.16)$$

1.3.1 Vinutí – parametry

Počet drážek: $Q = 132$

Počet pólů: $2p = 10$

Počet fází: $m = 3$

Matematický počet fází: $m' = 6$

Typ vinutí: vlnové

Počet drážek na pól a fázi: $q = 4 \frac{2}{5}$

Počet drážek na pól:

$$Q_p = \frac{Q}{2p} = \frac{132}{10} = 13,2 \quad (1.17)$$

$$y_{1d} \sim Q_p$$

Cívkový krok:

Kvůli omezení vlivu vyšších harmonických je třeba zkrátit cívkový krok.

K největšímu potlačení 5. a 7. harmonické dochází při $\beta = 0,83$. Z tohoto důvodu je zvolen přední cívkový krok v počtu drážek takto.

$$y_{1d} = 11$$

Poměrné zkrácení kroku:

$$\beta = \frac{y_{1d}}{Q_p} = \frac{11}{13,2} = 0,83 \quad (1.18)$$

Krok na komutátoru:

Základní stejnosměrné vinutí je vlnové ($\varepsilon=1$), sériové ($a_{ss}=1$), nekřížené (v čitateli je znaménko,-“). [3]

$$y_k = \frac{\varepsilon \cdot K \pm a_{ss}}{p} = \frac{1.132 - 2}{5} = 26 \quad (1.19)$$

Přední cívkový krok:

$$y_1 = 2u \cdot y_{1d} + 1 = 2.11 + 1 = 23 \quad (1.20)$$

Zadní cívkový krok:

$$y_2 = 2 \cdot y_k - y_1 = 2.26 - 23 = 29 \quad (1.21)$$

Počet skupin vinutí:

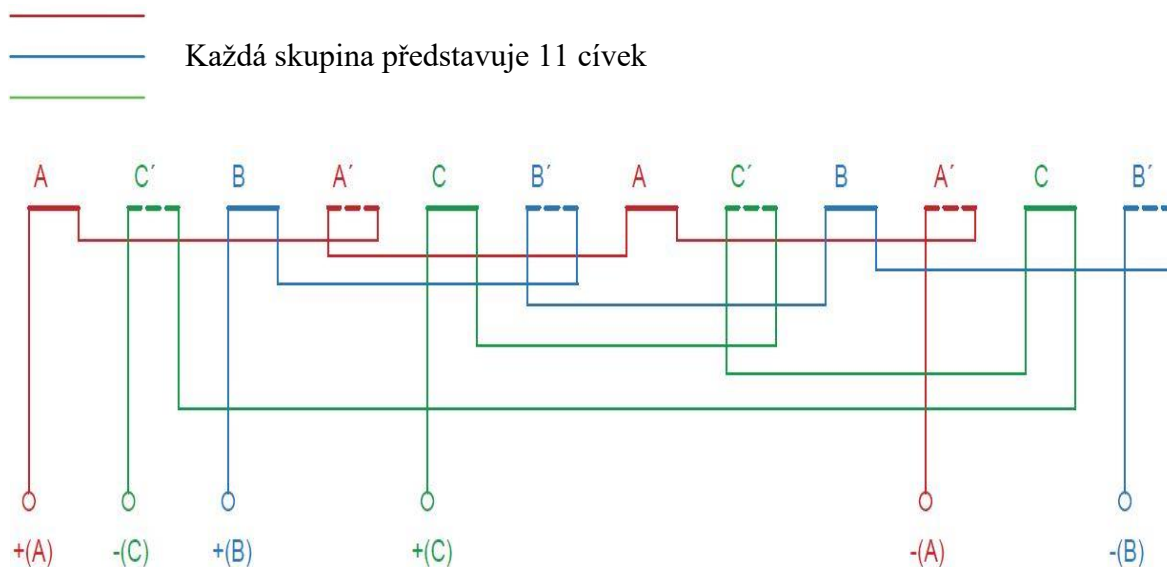
$$a_{ss} \cdot m' = 2.6 = 12 \quad (1.22)$$

Počet skupin v jedné fázi:

$$\frac{a_{ss} \cdot m'}{m} = \frac{2.6}{3} = 4 \quad (1.23)$$

Počet cívek ve skupině:

$$\frac{Q}{a_{ss} \cdot m'} = \frac{132}{12} = 11 \quad (1.24)$$



Obr. 1.1 Úsečkové schéma vinutí

1.3.2 Výpočet činitele vinutí

Činitel vinutí v-té harmonické:

$$k_{vv} = \sin\left(v\beta\frac{\pi}{2}\right) \frac{\sin v\frac{\pi}{m'}}{n \cdot \sin v\frac{\pi}{m'n}} \quad (1.25)$$

kde:

- v – řád harmonické
- β – poměrné zkrácení kroku
- m' - matematický počet fází
- n – čísel počet drážek na pól a fázi q

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

$$k_{v1} = \sin\left(1.0,83\frac{\pi}{2}\right) \frac{\sin\left(1\frac{\pi}{6}\right)}{22 \cdot \sin\left(1\frac{\pi}{6.22}\right)} = 0,92 \quad (1.26)$$

$$k_{v5} = 0,05$$

$$k_{v7} = -0,04$$

$$k_{v11} = -0,08$$

$$k_{v13} = -0,07$$

1.3.3 Essonův činitel

Essonův činitel elektromagnetického využití stroje:

$$C = \frac{\pi^2}{60 \cdot \sqrt{2}} \cdot A \cdot B_{\delta} \cdot kv1 = \frac{\pi^2}{60 \cdot \sqrt{2}} \cdot 60229 \cdot 0,85 \cdot 0,92$$

$$= 5,49 \quad \left(\frac{kVA}{m^3 \cdot \frac{ot}{min}} \right) \quad (1.27)$$

Efektivní délka stroje:

$$l_e = \frac{S}{CD_1^2 n} = \frac{6\,500}{5,48 \cdot 1,7^2 \cdot 600} = 0,68 \quad (m) \quad (1.28)$$

Zdánlivý výkon S je nutné do vzorce dosadit v kVA.

Počet paketů:

Je-li stroj delší, je statorový svazek kvůli lepšímu chlazení rozdělen na několik paketů, mezi nimiž jsou radiální ventilační kanály. Obvykle je šířka paketů \check{s}_p 40 až 50 mm a šířka ventilačního kanálu \check{s}_k 10 mm. [1]

$$i = \frac{l_e}{\check{s}_p} = \frac{0,65}{0,05} = 14 \quad (1.29)$$

Počet kanálů:

$$i_k = i - 1 = 14 - 1 = 13 \quad (1.30)$$

Celková délka induktu (včetně radiálních kanálů):

$$L = l_e + \check{s}_k \cdot i_k = 0,68 + 0,01 \cdot 13 = 0,81 \quad (1.31)$$

1.4 Návrh drážky

Po konečném určení počtu drážek Q je nutné určit drážkovou rozteč, rozměry statorové drážky a rozměry vodičů. Dle zkušeností i na základě teoretických rozborů je dáno optimum poměru šířky drážky b_d ku drážkové rozteči t_{d1} asi 0,42. Dodržení tohoto poměru zajistí co nejlepší využití stroje, avšak malá odchylka od této hodnoty nemá podstatný vliv na parametry stroje. [1]

Velikost drážkové rozteče na průměru D_1 :

Je zvolena otevřená obdélníková drážka tvaru M.

$$t_{d1} = \frac{\pi D_1}{Q} = \pi \cdot \frac{1,7}{132} = 40,46 \quad (mm) \quad (1.32)$$

Šířka zubu:

Jelikož drážka je otevřená, obdélníkového tvaru, zub bude mít tvar lichoběžníku. Magnetická indukce v zubu B'_{z1} se volí v rozmezí 1,55 až 1,85 T a činitel plnění železa k_{Fe} 0,92. [1]

$$z_1 = \frac{B_\delta \cdot t_{d1}}{B'_{z1} \cdot k_{fe}} = \frac{0,85 \cdot 40,46}{1,7 \cdot 0,92} = 21,99 \quad (mm) \quad (1.33)$$

Šířka drážky:

$$b_d = t_{d1} - z_1 = 40,46 - 21,99 = 18,47 \quad (mm) \quad (1.34)$$

Nejbližší normalizovaná šířka drážky tvaru M je:

$$b_d = 18 \quad (mm)$$

Skutečná šířka zubu na průměru D_1 :

$$z_1 = t_{d1} - b_d = 40,46 - 18,00 = 22,46 \quad (\text{mm}) \quad (1.35)$$

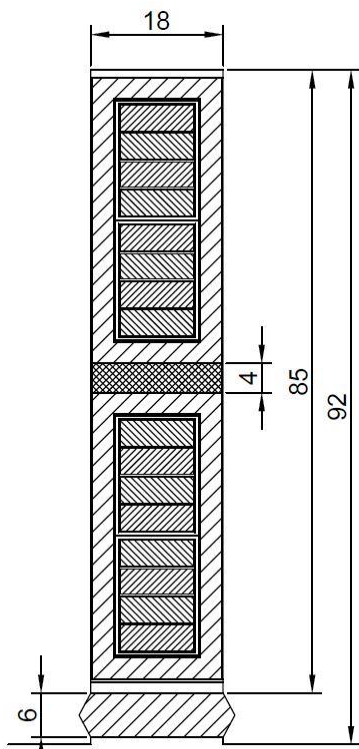
Název	Šířka [mm]		Hloubka [mm]	
Vyložení drážky	-	-	-	-
Izolace proti železu	$2 \cdot t_i \rightarrow 2.2,90$	5,8	$4 \cdot t_i \rightarrow 4.2,90$	11,6
Tmelení	$2 \cdot 0,10$	0,2	$4 \cdot 0,10$	0,4
Stažení vodičů	$2 \cdot 0,15$	0,3	$4 \cdot 0,15$	0,6
Izolace závitů	$2 \cdot 0,48$	0,96	$2 \cdot n_d \cdot 0,48 \rightarrow 2.4.0,48$	3,84
Izolace vodičů	$1 \cdot j \cdot 0,35 \rightarrow 1.1.0,35$	0,35	$n_d \cdot i \cdot 0,35 \rightarrow 4.4.0,35$	5,6
Mezivrstva	-	-	$1 \cdot m_v \rightarrow 1.4$	4
Σ izolace		7,61		26,04
Vůle na šířku	0,20 až 0,60	0,39	-	-
Holý vodič	$j \cdot b_v \rightarrow 1.10$	10	$n_d \cdot i \cdot h_v \rightarrow 4.4.3,5$	56
Vložka na dno	-	-	$1 \cdot 1,00$	1
Vložka pod klín	-	-	$1 \cdot 0,50$	0,5
Vůle na hloubku	-	-	0,40 až 2,00	1,46
Rozměr drážky bez klínu	b_d	18	h_2	85
Klín + můstek	-	-	$h_0 + h_1 \rightarrow 1,00 + 6,00$	7
Konečný rozměr drážky	b_d	18	h_d	92

Tab. 1.1 Návrh drážky a izolace

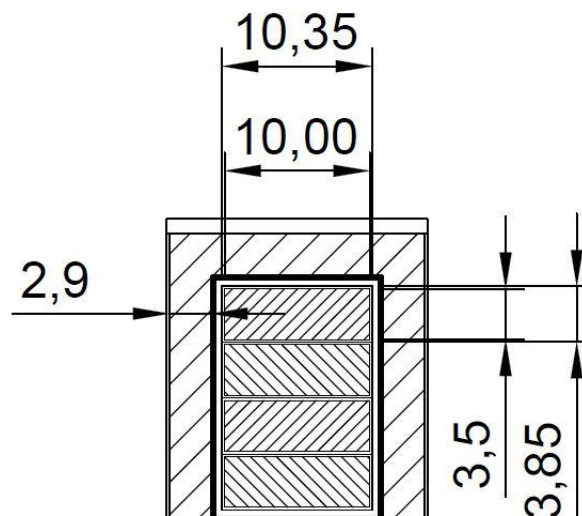
Dle doporučení normy ČSN je hloubka drážky bez klínu h_2 volena tak, aby končila na číslici 0 nebo 2 nebo 5 nebo 8. S tímto ohledem je pak volena vůle na hloubku, která je vyplněna vložkou pod drážkovým klínem. [3]

Izolace proti železu – t (mm)					
Napětí (kV)	Mezivrstva				Mezivrstva m_v (mm)
	obyčejná	lepší	typ semicatherm	typ Relanex	
0,4 až 1,5	0,45	-	-	-	3
3	1,8	1,6	1,4	1,4	3
6,3	3	2,7	2,4	1,8	4
10,5	3,5	3,3	3,1	2,8	6
13,8	4,5	4,2	4	3,8	6
15,7		4,6	4,4	4	7
18		5,5	5	5	7
24				6,5	

Tab. 1.2 Velikost izolace proti železu [5]



Obr. 1.2 Statorová drážka



Obr. 1.3 Detail drážky

Průřez vodiče:

$$S'_{Cu1} = \frac{I_1}{a_{stř} \cdot \sigma_{Cu1}} = \frac{596}{1,4,36} = 136,66 \quad (mm^2) \quad (1.36)$$

Proudová hustota ve vodiči:

$$\sigma_{Cu1} = \sqrt{\frac{K}{b_v}} = \sqrt{\frac{190}{10}} = 4,36 \quad (A/mm^2) \quad (1.37)$$

kde:

K - konstanta závislá na napětí

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

Tab. 1.3 Konstanta K dle napětí stroje [5]

Výška vodiče při šířce $b_v = 10 \text{ mm}$:

$$h_v = \frac{S_{Cu1}}{b_v} = \frac{136,66}{10} = 13,67 \quad (1.38)$$

Z důvodu snížení přídavných ztrát vlivem skinefektu je původní vodič rozdělen na výšku na čtyři vodiče ($i=4$). Vodiče jsou voleny dle normalizovaných rozměrů a jim odpovídajícím skutečným průřezům. Rozměr holého/izolovaného vodiče $10 \times 3,5/ 10,35 \times 3,85 \text{ mm}$.

Skutečný průřez jednoho vodiče dle ČSN:

$$S_1 = 34,1 \quad (\text{mm}^2)$$

viz. příloha C

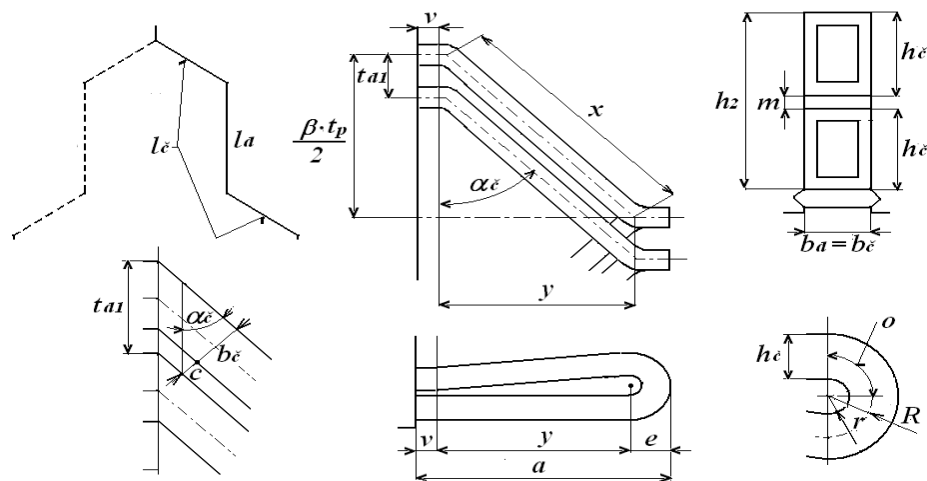
Průřez vodiče tvořícího jeden závit:

$$S_{Cu1} = j \cdot i \cdot S_1 = 1.4 \cdot 34,1 = 136,4 \quad (\text{mm}^2) \quad (1.39)$$

Skutečná proudová hustota:

$$\sigma_{Cu1} = \frac{I_1}{a_{stř} \cdot S_{Cu1}} = \frac{596}{1.132,8} = 4,37 \quad (\text{A/mm}^2) \quad (1.40)$$

1.5 Odpor a rozptylová reaktance statorového vinutí



Obr. 1.4 Čela vinutí [5]

1.5.1 Délka čela

Výběh cívky z drážky v je dán napětím stroje dle následující tabulky.

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

Tab. 1.4 Výběh z drážky dle napětí stroje [5]

Zvoleno $v = 50$ mm

Vnitřní poloměr oka r je závislý na rozměrech vodiče, velikosti cívek, napětí a požadavku na chlazení čel. Je v rozmezí 5 až 20 mm. [3]

Zvoleno $r = 10$ mm

Výška čela:

$$h_{\zeta} = \frac{1}{2} \cdot (h_2 - m_v) = \frac{1}{2} \cdot (85 - 4) = 40,50 \quad (mm) \quad (1.41)$$

Střední poloměr oka:

$$R = r + \frac{h_{\zeta}}{2} = 10 + \frac{40,5}{2} = 30,25 \quad (mm) \quad (1.42)$$

Vzdálenost mezi čely:

$$c = 4 + \frac{U}{2} = 4 + \frac{6,3}{2} = 7,15 \quad (mm) \quad (1.43)$$

Napětí U je dosazeno v kV

Úhel sklonu čel válcového vinutí:

Šířka čela b_{ζ} se volí stejná jako šířka drážky b_d .

$$\alpha_{\zeta} = \arcsin\left(\frac{b_{\zeta} + c}{t_{d1}}\right) = \arcsin\left(\frac{18 + 7,15}{40,46}\right) = 38 \quad (^\circ) \quad (1.44)$$

Délka šroubovice tvořící část čela:

$$x = \frac{\beta \cdot t_p}{2 \cdot \cos(\alpha_\zeta)} = \frac{0,83 \cdot 0,53}{2 \cdot \cos(38^\circ)} = 282 \quad (mm) \quad (1.45)$$

Délka oka:

$$o = \frac{\pi \cdot R}{2} = \frac{\pi \cdot 30,25}{2} = 47,50 \quad (mm) \quad (1.46)$$

Délka čela:

$$\begin{aligned} l_\zeta &= 2 \cdot (v + x + o) = 2 \cdot (50 + 282 + 47,5) \\ &= 760 \quad (mm) \end{aligned} \quad (1.47)$$

Délka vodiče:

$$l_v = L + l_\zeta = 0,81 + 0,760 = 1,57 \quad (m) \quad (1.48)$$

1.5.2 Vyložení čel v podélném směru:

Délka oka:

$$e = h_\zeta + r = 40,5 + 10 = 50,5 \quad (mm) \quad (1.49)$$

Průmět x do osového směru:

$$y = \frac{\beta \cdot t_p}{2} \cdot \operatorname{tg}(\alpha_\zeta) = \frac{0,83 \cdot 0,53}{2} \cdot \operatorname{tg}(38^\circ) = 173 \quad (mm) \quad (1.50)$$

Celkové vyložení:

$$a = v + y + e = 50 + 173 + 50,5 = 274 \quad (mm) \quad (1.51)$$

1.5.3 Odpor jedné fáze

Elektrický odpor pro stejnosměrný proud (bez skin efektu):

$$R'_{1/20} = \rho_{cu} \cdot \frac{2 \cdot l_v \cdot N_s}{a_{stř} \cdot S_{Cu1}} = \frac{1}{56} \cdot \frac{2 \cdot 1,57,90}{1,136,4} = 0,04 \quad (\Omega) \quad (1.52)$$

kde:

$$\rho_{cu} = \frac{1}{56} \quad (\Omega \cdot m)$$

Náhradní výška vodiče:

$$\begin{aligned} \zeta &= 2 \cdot \pi \cdot h_v \sqrt{\frac{j \cdot b_v \cdot f}{b_d \cdot \rho} \cdot 10^{-7}} = 2 \cdot \pi \cdot 3,5 \sqrt{\frac{1,10,50}{18 \cdot \frac{1}{56}} \cdot 10^{-7}} \\ &= 0,39 \quad (-) \end{aligned} \quad (1.53)$$

Celkový počet vodičů v drážce:

$$g = i \cdot n_d = 4 \cdot 4 = 16 \quad (1.54)$$

Činitel zvýšení elektrického odporu:

$$k_{Cu} = \frac{g^2 - 0,2}{9} \cdot \zeta^4 = \frac{16^2 - 0,2}{9} \cdot 0,39^4 = 0,64 \quad (-) \quad (1.55)$$

Odpor v drážkové části vinutí při 20°C při uvažování skin efektu:

$$\begin{aligned} R_{1d/20} &= (1 + k_{Cu}) \cdot \frac{R'_{1/20}}{l_v} \cdot l_d = (1 + 0,64) \cdot \frac{0,04}{1,57} \cdot 0,81 \\ &= 0,03 \quad (\Omega) \end{aligned} \quad (1.56)$$

Zvoleno $l_d=L$

Odpor v drážkové části vinutí při 75°C při uvažování skinefektu:

$$R_{1d/75} = 1,22 \cdot R_{1d/20} = 1,22 \cdot 0,03 = 0,04 \quad (\Omega) \quad (1.57)$$

Odpor čel vinutí při 20°C:

$$R_{1\check{c}/20} = \frac{R'_{1/20}}{l_v} \cdot l_{\check{c}} = \frac{0,04}{1,57} \cdot 0,760 = 0,02 \quad (\Omega) \quad (1.58)$$

Odpor čel vinutí při 75°C:

$$R_{1\check{c}/75} = 1,22 \cdot R_{1\check{c}/20} = 0,02 \quad (\Omega) \quad (1.59)$$

Celkový odpor:

$$R_{1/75} = R_{1d/75} + R_{1\check{c}/75} = 0,04 + 0,02 = 0,06 \quad (\Omega) \quad (1.60)$$

Procentní hodnota úbytku napětí na ohmickém odporu:

$$u_R = \frac{R_{1/75} \cdot I_1}{U_f} \cdot 100 = \frac{0,06 \cdot 596}{3637} \cdot 100 = 0,98 \quad (\%) \quad (1.61)$$

1.5.4 Rozptylová reaktance statorového vinutí

Rozptylová reaktance statorového vinutí závisí na magnetické vodivosti drážky induktu, vodivosti čel vinutí a vodivosti mezi sousedními zuby přes vzduchovou mezeru. H_d je vzdálenost krajích vláken vodičů v drážce a h'_l vzdálenost krajního vodiče od kraje drážky.

Rozptylová reaktance:

$$\begin{aligned}
 X_{\sigma} &= \frac{(4 \cdot \pi)^2 \cdot f \cdot N_s^2}{p \cdot q} \cdot l_e \cdot \left[\left(\frac{h'_2}{3 \cdot b_d} + \frac{h'_1}{b_d} \right) + \frac{l_{\zeta}}{l_e} \cdot q \left(0,187 + 0,166 \cdot \frac{t_p}{l_{\zeta}} \cdot \beta \right) \right. \\
 &\quad \left. + \ln \left(1 + \frac{\pi \cdot z_1}{2 \cdot b_d} \right) \right] \cdot 10^{-7} \\
 &= \frac{(4 \cdot \pi)^2 \cdot 50 \cdot 90^2}{5,4,5} \cdot 0,68 \cdot \left[\left(\frac{0,05836}{3,0,018} + \frac{0,00782}{0,018} \right) \right. \\
 &\quad \left. + \frac{0,760}{0,68} \cdot 4,5 \left(0,187 + 0,166 \cdot \frac{0,53}{0,760} \cdot 0,83 \right) \right. \\
 &\quad \left. + \ln \left(1 + \frac{\pi \cdot 0,02246}{2,0,018} \right) \right] \cdot 10^{-7} = 0,78 \quad (\Omega)
 \end{aligned} \tag{1.62}$$

Procentní hodnota úbytku napětí na rozptylové reaktanci:

$$x_{\sigma} = \frac{X_{\sigma} \cdot I_1}{U_f} \cdot 100 = \frac{0,78 \cdot 596}{3637} \cdot 100 = 12,78 \quad (\%) \tag{1.63}$$

1.6 Návrh magnetického obvodu

Jako magnetický obvod je nazývána ta část elektrického stroje, kterou se uzavírá žádoucí magnetický tok. Tvoří ho železo a vzduchová mezera. V návrhu magnetického obvodu budou určeny rozměry magnetického obvodu. Dále pak magnetometrické napětí budícího vinutí F_{b0} , které je nutné k vytvoření magnetického toku stroje ϕ při chodu naprázdno. Tento magnetický tok vyvolá při otáčení rotoru ve statorovém vinutí indukované napětí. [1] [3]

Magnetický tok:

Velikost magnetického toku stroje je vypočtena dvěma způsoby. Zprv z rovnice pro indukované napětí a zadruhé z rozměrů stroje a magnetické indukce ve vzduchové mezeře.

$$\phi = \frac{U_f}{4,44 \cdot f \cdot N_s \cdot k_{v1}} = \frac{3637}{4,44 \cdot 50 \cdot 90 \cdot 0,92} = 0,1973 \quad (Vs) \tag{1.64}$$

Kontrola magnetického toku:

$$\begin{aligned} \phi &= \left(\frac{2}{\pi}\right) \cdot t_p \cdot l_e \cdot B_\delta = \left(\frac{2}{\pi}\right) \cdot 0,53 \cdot 0,68 \cdot 0,85 \\ &= 0,1972 \quad (Vs) \end{aligned} \quad (1.65)$$

Dále je počítáno s hodnotou $\phi = 0,1973 \text{ Vs}$.

Vzduchová mezera:

Velikost vzduchové mezery velmi podstatně ovlivňuje technicko-ekonomické ukazatele stroje. Její velikost má vliv na rozměry pólů, budícího vinutí, dále pak na velikost ztrát v budícím vinutí a přídatných ztrát na povrchu pólových nástavců. [1]

$$\begin{aligned} \delta &= k \cdot \frac{A \cdot t_p}{B_\delta} \cdot \frac{10^{-6}}{x_d - x_\sigma} = 45 \cdot \frac{60229 \cdot 0,53}{0,85} \cdot \frac{10^{-6}}{127 - 12,78} \\ &= 0,015 \quad (m) \end{aligned} \quad (1.66)$$

kde:

k – je voleno v rozsahu 40 až 50 v závislosti na Carterově činiteli a tvaru pólového nástavce

x_d – procentní hodnota nesyčené synchronní reaktance zvolena dle tabulky č. 1.5

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

Tab. 1.5 Nesycená synchronní reaktance [5]

1.6.1 Magnetické napětí reakce kotvy

Amplituda základní harmonické reakce kotvy:

$$\begin{aligned} F_a &= \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{1}{C_1} \cdot A \cdot t_p \cdot k_{v1} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{1}{1,05} \cdot 60229 \cdot 0,53 \cdot 0,92 \\ &= 12722 \quad (A) \end{aligned} \quad (1.67)$$

kde:

C₁ – činitel základní harmonické magnetické indukce viz příloha H

Amplituda základní harmonické napětí v podélném směru:

$$F_{d1} = C_{d1} \cdot F_a = 0,87 \cdot 12722 = 11194 \quad (A) \quad (1.68)$$

kde:

$$C_{d1} = e \cdot f = 0,82 \cdot 1,08 = 0,88 \quad (-) \quad (1.69)$$

Koeficienty e a f jsou odečteny z přílohy I.

Amplituda základní harmonické napětí v příčném směru:

$$F_{q1} = C_{q1} \cdot F_a = 0,43 \cdot 12722 = 5495 \quad (A) \quad (1.70)$$

kde:

$$C_{q1} = g \cdot h = 1,44 \cdot 0,3 = 0,43 \quad (-) \quad (1.71)$$

Koeficienty g a h jsou odečteny z přílohy I.

Výše uvedené vztahy jsou vypočítané pro:

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

$$\frac{\delta}{t_p} = \frac{0,015}{0,530} = 0,03 \quad (-)$$

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

1.6.2 Dimenzování magnetického obvodu**Výška pólu:**

$$h_p = 0,3 \cdot t_p = 0,3 \cdot 0,530 = 0,160 \quad (m) \quad (1.72)$$

Výška nástavce:

$$h_n = 0,1 \cdot t_p = 0,1 \cdot 0,53 = 0,053 \quad (m) \quad (1.73)$$

Šířka pólu:

$$b_p = \frac{(1 + \nu) \cdot \phi}{B_p \cdot L_p} = \frac{(1 + 0,15) \cdot 0,1973}{1,45 \cdot 0,81} = 0,193 \quad (m) \quad (1.74)$$

kde:

ν – je předpokládaná procentní hodnota rozptylového toku volená v rozsahu 10 – 20%

Šířka pólového nástavce:

$$b_n = \alpha \cdot t_p = 0,65 \cdot 0,53 = 0,347 \quad (m) \quad (1.75)$$

Výška jhu rotoru:

$$h_{jr} = \frac{(1 + \nu) \cdot \phi}{2 \cdot B_{jr} \cdot L_r} = \frac{(1 + 0,15) \cdot 0,1973}{2,1 \cdot 1,1} = 0,100 \quad (m) \quad (1.76)$$

kde:

B_{jr} – indukce ve jhu rotoru 0,9 až 1,2T

L_{jr} – Délka jhu rotoru zvětšená o polovinu až celou šířku budící cívky

Výška jádra induktu:

$$h_{js} = \frac{\phi}{2 \cdot B_{js} \cdot k_{Fe} \cdot l_e} = \frac{0,1973}{2,1 \cdot 3,0 \cdot 92 \cdot 0,68} = 0,120 \quad (m) \quad (1.77)$$

kde:

B_{js} – indukce ve jhu statoru 1,2 až 1,4T

1.6.3 Délka středních siločar jednotlivých částí magnetického obvodu

Pól:

$$l_p = h_p + h_n = 0,160 + 0,053 = 0,213 \quad (m) \quad (1.78)$$

Jho rotoru:

$$\begin{aligned} l_r &= \frac{\pi \cdot [D_1 - 2 \cdot (\delta + h_p + h_n)]}{4 \cdot p} \\ &= \frac{\pi \cdot [1,7 - 2 \cdot (0,015 + 0,160 + 0,053)]}{4,5} \\ &= 0,195 \quad (m) \end{aligned} \quad (1.79)$$

Jádro kotvy:

$$\begin{aligned} l_s &= \frac{\pi \cdot [D_1 - 2 \cdot (h_d + h_{js})]}{4 \cdot p} = \frac{\pi \cdot [1,7 - 2 \cdot (0,092 + 0,120)]}{4,5} \\ &= 0,334 \quad (m) \end{aligned} \quad (1.80)$$

1.6.4 Charakteristika naprázdno

Carterův činitel respektující vliv drážkování induktu:

Činitel je odečten z grafu viz příloha G.

$$\begin{aligned} k_{cd} &= 1,09 \quad (-) \\ \frac{b_0}{z_1} &= \frac{18}{22,46} = 0,8 \quad (-) \\ \frac{b_0}{\delta} &= \frac{18}{15} = 1,2 \quad (-) \end{aligned}$$

Carterův činitel respektující vliv radiálních ventilačních kanálů:

$$k_{ck} = \frac{1}{1 + \frac{\delta}{2 + \delta} \cdot \frac{\check{s}_k \cdot i}{l_e}} = \frac{1}{1 + \frac{15}{2 + 15} \cdot \frac{10,14}{680}} = 0,85 \quad (-) \quad (1.81)$$

Výsledný Carterův činitel:

$$k_c = k_{cd} \cdot k_{ck} = 1,09 \cdot 0,85 = 0,93 \quad (-) \quad (1.82)$$

Magnetické napětí ve vzduchové mezeře:

$$\begin{aligned} F_\delta &= 0,8 \cdot k_c \cdot \delta \cdot B_\delta \cdot 10^6 = 0,8 \cdot 0,93 \cdot 0,015 \cdot 0,85 \cdot 10^6 \\ &= 9450 \quad (A) \end{aligned} \quad (1.83)$$

Charakteristika zubové vrstvy:

Tabulka je vypočtena s pomocí B – H charakteristiky v přílohách D, E. Skutečná magnetická indukce v zubech induktu je určena pomocí nomogramu v příloze F.

$$\begin{aligned} i &= 1,2,3 \\ t_{di} &= \frac{\pi \cdot D_1}{Q} \\ z_i &= t_{di} - b_d \\ k_{zi} &= \frac{t_{di}}{z_i \cdot k_{Fe}} - 1 \\ B'_{zi} &= \frac{B_\delta \cdot t_{di}}{z_i \cdot k_{Fe}} \\ H_{zstř} &= \frac{(H_{z1} + 4H_{z2} + H_{z3})}{6} \\ F_z &= H_{zstř} \cdot h_d \end{aligned}$$

D_1	D_1	1700	t_{d1}	40,46	z_1	22,46	k_{z1}	0,96	B'_{z1}	1,66	B_{z1}	1,63	H_{z1}	4000	$H_{ztř}$	3267	F_z	301
$D_2=D_1±h_d$	D_2	1792	t_{d2}	42,65	z_2	24,65	k_{z2}	0,88	B'_{z2}	1,60	B_{z2}	1,58	H_{z2}	3400				
$D_3=D_1±2h_d$	D_3	1884	t_{d3}	44,84	z_3	26,84	k_{z3}	0,82	B'_{z3}	1,54	B_{z3}	1,53	H_{z3}	2000				
$k_1 = 1,15$								$k_1 \cdot \phi$	B'_{z1}	1,91	B_{z1}	1,84	H_{z1}	14500	$H_{ztř}$	11083	F_z	1020
									B'_{z2}	1,84	B_{z2}	1,79	H_{z2}	11000				
									B'_{z3}	1,78	B_{z3}	1,73	H_{z3}	8000				
$k_2 = 1,3$								$k_2 \cdot \phi$	B'_{z1}	2,16	B_{z1}	2,02	H_{z1}	32000	$H_{ztř}$	28167	F_z	2591
									B'_{z2}	2,08	B_{z2}	1,97	H_{z2}	29000				
									B'_{z3}	2,01	B_{z3}	1,93	H_{z3}	21000				

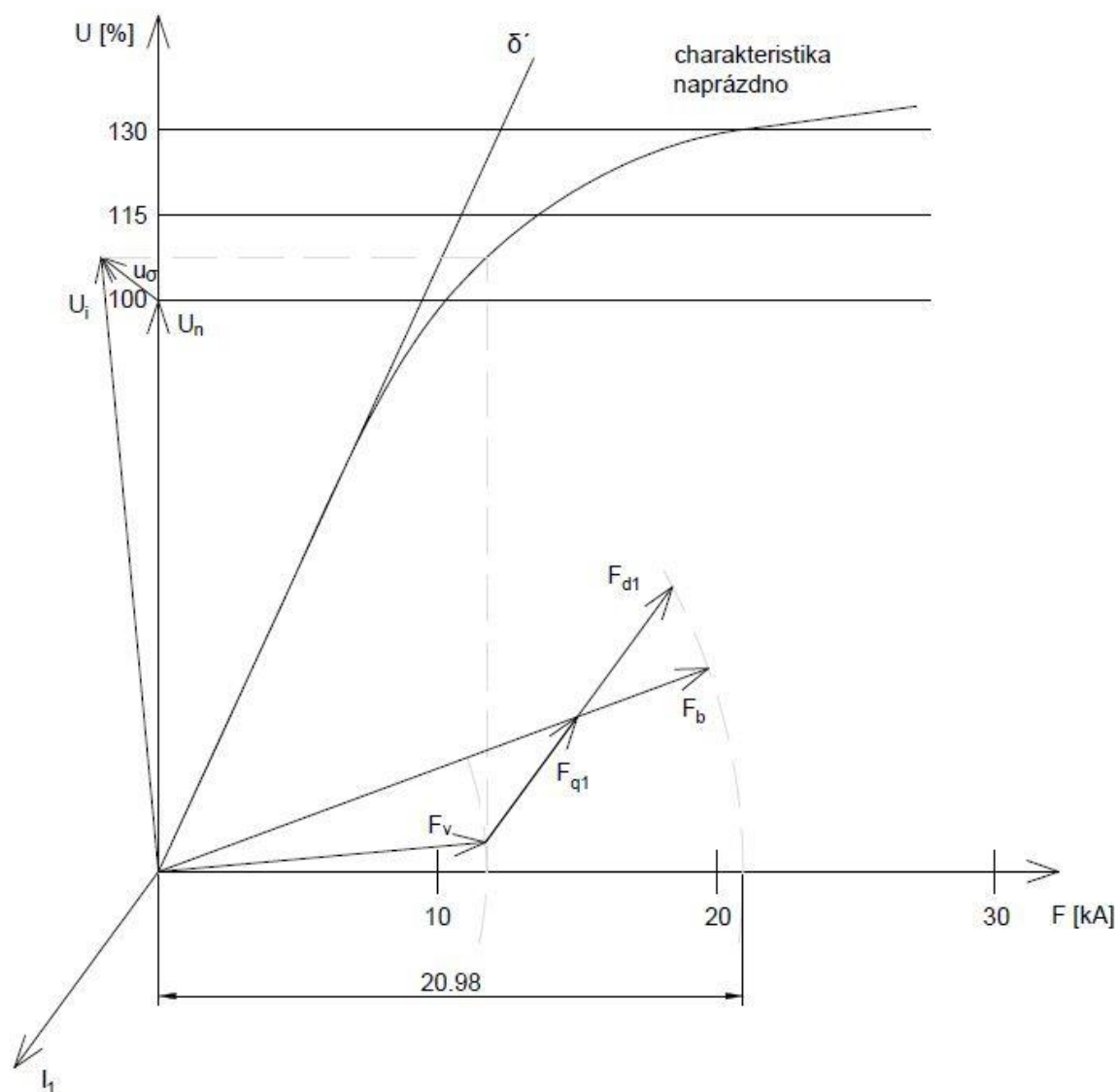
Tab. 1.6 Charakteristika zubové vrstvy

Charakteristika výsledná:

				ϕ			$k_1 \cdot \phi$			$k_2 \cdot \phi$			
				B	H	F	B	H	F	B	H	F	
Vzd. mezera		$\delta = 0,015 \text{ m}$		0,85		9450			10868			12285	
Zubová vrstva	Hlava	$k_{z1} = 0,96$	B'_{z1}	1,66	4000		1,91	14500		2,16	32000		
			B_{z1}	1,63			1,84			2,02			
	Střed	$k_{z2} = 0,88$	B'_{z2}	1,60	3400		1,84	11000		2,08	29000		
			B_{z2}	1,58			1,79			1,97			
Pata	$k_{z3} = 0,82$	B'_{z3}	1,54	2000		1,78	8000		2,01	21000			
		B_{z3}	1,53			1,73			1,93				
Střední hodnota		h_z		0,092		3267	301		11083	1020		28167	2591
Jádro statoru		l_s		0,334	1,3	650	217	1,50	1600	534	1,69	6000	2004
$\Sigma F = F_\delta + F_z + F_s = F\sigma$							9968			12421			16880
Pól		l_p		0,214	1,45	1200	256	1,67	5000	1068	1,89	18000	3845
Jho rotoru		l_r		0,195	1,1	360	70	1,27	600	117	1,43	1150	224
$\Sigma F = F_p + F_r$							327			1185			4069
$\Sigma F = F_\delta + F_z + F_s + F_p + F_r$							10294			13607			20950

Tab. 1.7 Charakteristika výsledná

Pro sestavení charakteristiky naprázdno je třeba znát charakteristiku vzduchové mezery. Charakteristika vzduchové mezery je přímková procházející počátkem. Tato charakteristika je tečnou k charakteristice naprázdno. K sestavení charakteristiky naprázdno je nutné znát 3, respektive 4 body magnetického napětí pro 100%, 115%, 130%, respektive 80% indukovaného napětí. Výpočet těchto bodů je v tabulce 1.7.



Obr. 1.5 Charakteristika naprázdno pro $\alpha = 0,65$

Budící magnetické napětí

Z charakteristiky naprázdno je grafickou metodou určeno magnetické napětí

$$F_b = 20\,980 \quad (A) \quad (1.84)$$

1.7 Návrh budícího vinutí:

V návrhu budícího vinutí je vypočten průřez vodiče a počet závitů budící cívky. S ohledem na tvar a rozměry pólu jsou navrženy rozměry budící cívky včetně kostříčky. V budících vinutích se navrhují buď jednopólové, nebo vícepólové cívky. Jednopólové mají větší spolehlivost a lépe se chladí. Z tohoto důvodu u nich může být volena větší proudová hustota. [1] [3]

1.7.1 Budící cívka

Přesahující část pólového nástavce:

$$a = \frac{b_n - b_p}{2} = \frac{0,347 - 0,193}{2} = 0,077 \quad (m) \quad (1.85)$$

Střední délka závitů cívky:

$$\begin{aligned} l_{bs} &= 2 \cdot (L_p + b_p + 2 \cdot a) = 2 \cdot (0,81 + 0,193 + 2 \cdot 0,077) \\ &= 2,16 \quad (m) \end{aligned} \quad (1.86)$$

Průřez vodiče budící cívky:

$$\begin{aligned} S'_{cub} &= \frac{\rho_{Cu} \cdot l_{bs} \cdot 2p \cdot F_b}{0,9U_b} = \frac{1}{56} \cdot \frac{2,16 \cdot 10 \cdot 20980}{0,9 \cdot 400} \\ &= 22,46 \quad (mm^2) \end{aligned} \quad (1.87)$$

Budící napětí U_b bylo zvoleno s ohledem na rozměry pásových vodičů.

Zvolen rozměr holého ($b_v \times h_v$)/izolovaného ($b_{vi} \times h_{vi}$) vodiče 12x2/12,5x2,5 mm.

Skutečný průřez vodiče budící cívky:

$$S_{cub} = 23,4 \quad (mm^2) \quad (1.88)$$

Odečteno viz příloha C.

Předběžně zvolená proudová hustota

$$\sigma_{Cub} = 2,2 \text{ A/mm}^2 \quad (1.89)$$

Budící proud:

$$I_b = \sigma_{Cub} \cdot S_{Cub} = 2,2 \cdot 23,4 = 51 \quad (\text{A}) \quad (1.90)$$

Počet závitů budící cívky:

$$N_b = \frac{F_b}{I_b} = \frac{20980}{51} = 408 \quad (-) \quad (1.91)$$

Počet poloh cívky:

$$n'_p = \frac{a - t_k}{h_{vi}} = \frac{0,077 - 2}{12,5} = 6 \quad (-) \quad (1.92)$$

Tloušťka kostřičky t_k je zvolena s ohledem na chlazení budící cívky.

Tloušťka cívky:

$$b_c = h_{vi} \cdot n'_p = 12,5 \cdot 6 = 75 \quad (-) \quad (1.93)$$

Počet závitů v jedné poloze:

$$N'_{p1} = \frac{N_b}{n'_p} = \frac{408}{6} = 68 \quad (-) \quad (1.94)$$

Výška cívky:

$$h_c = N'_{p1} \cdot (b_v + t_i) = 68 \cdot (2 + 0,5) = 170 \quad (\text{mm}) \quad (1.95)$$

kde:

t_i – tloušťka izolace

Výška pólu:

$$h_p = h_c + 2 \cdot t_k = 150 + 2 \cdot 2 = 174 \quad (mm) \quad (1.96)$$

Výška pólu vyšla vyšší než při prvotním odhadu (160 mm). Tuto skutečnost je možné, ale nyní zanedbat.

1.7.2 Orientační výpočet oteplení budící cívky

Vnější obvod budící cívky:

$$\begin{aligned} l_{be} &= 2 \cdot (L_p + b_p + 4 \cdot a) = 2 \cdot (0,81 + 0,193 + 4 \cdot 0,077) \\ &= 2,62 \quad (m) \end{aligned} \quad (1.97)$$

Střední obvod budící cívky:

$$\begin{aligned} l_{bs} &= 2 \cdot \left[L_p + b_p + 4 \cdot \left(t_k + \frac{b_c}{2} \right) \right] \\ &= 2 \cdot \left[0,81 + 0,193 + 4 \cdot \left(0,002 + \frac{75}{2} \right) \right] \\ &= 2,32 \quad (m) \end{aligned} \quad (1.98)$$

Ochlazovací povrch všech cívek:

$$Q_{2pc} = h_c \cdot l_{bs} \cdot 2p = 0,17 \cdot 2,32 \cdot 10 = 3,95 \quad (m^2) \quad (1.99)$$

Odpor všech cívek budícího vinutí:

$$\begin{aligned} R_{Cub} &= 1,22 \cdot \rho \cdot \frac{l_{bs} \cdot N_b \cdot 2p}{S_{Cub}} = 1,22 \cdot \frac{1}{56} \cdot \frac{2,32 \cdot 408 \cdot 10}{23,4} \\ &= 8,81 \quad (\Omega) \end{aligned} \quad (1.100)$$

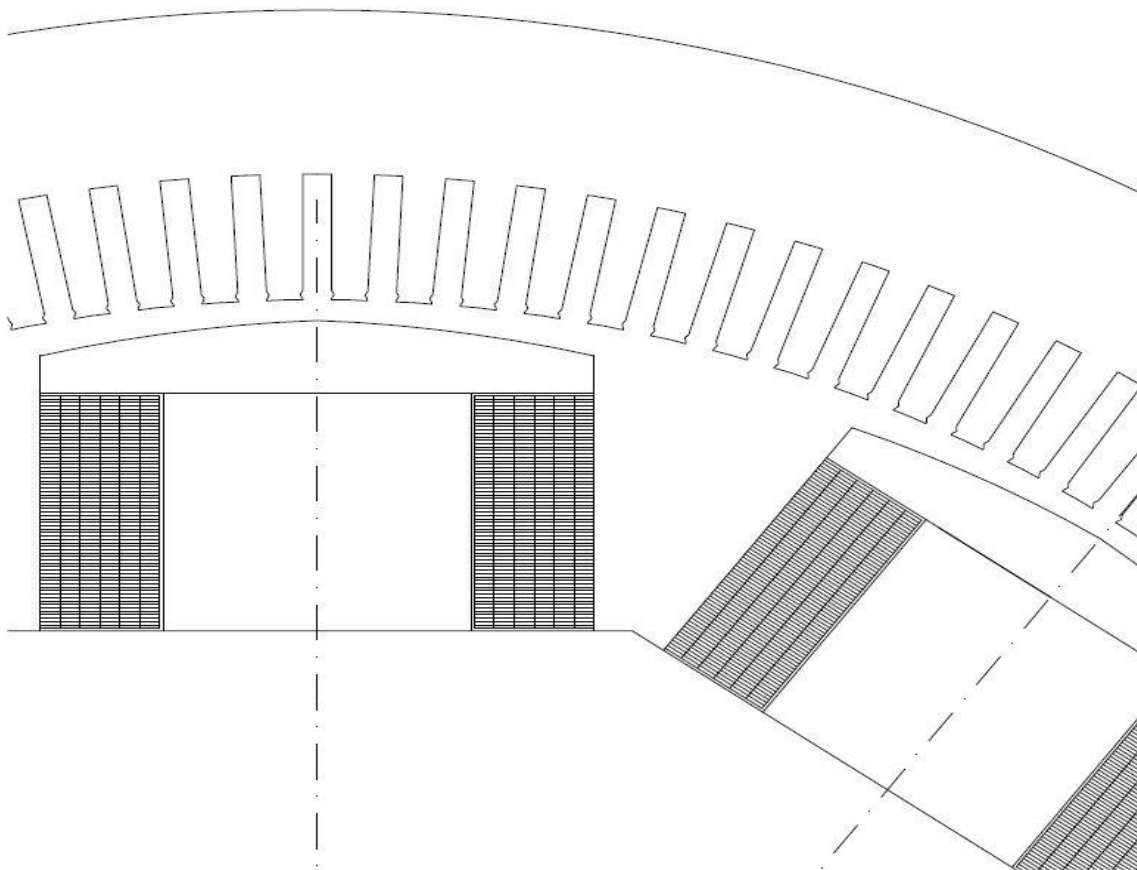
Ztráty v budícím vinutí:

$$\Delta P_{Cub} = R_{b/75} \cdot I_b^2 = 8,81 \cdot 51^2 = 23336 \quad (W) \quad (1.101)$$

Oteplení cívky:

$$\Delta\vartheta_{Cub} = \frac{1,18 \cdot \Delta P_{Cub}}{\alpha \cdot Q_{2pc}} = \frac{1,18 \cdot 23336}{85,3,95} = 82 \quad (^\circ\text{C}) \quad (1.102)$$

Vyhovuje pro použití izolace třídy B.



Obr. 1.6 Pólový nástavec s budící cívkou pro $\alpha = 0,65$

1.8 Tlumič

Tlumič se skládá z měděných či mosazných tyčí kruhového průřezu, které jsou na konci vodivě spojeny kruhy. Tyče jsou umístěny u povrchu pólových nástavců stroje. Počet tyčí u běžných strojů je 5 až 10. Tlumič slouží u synchronních alternátorů ke zmenšení zpětné točivé složky pole při nesouměrném zatížení, k tlumení kývání rotoru, k zamezení dynamických přetížení při nesouměrném zkratu a ke zvětšení dynamické stability stroje. Pokud se jedná o synchronní motor, tlumič tam slouží pro asynchronní rozběh nakrátko. [1] [3]

Rozteč tyčí:

$$t'_t = 0,9 \cdot t_{d1} = 0,9 \cdot 40,46 = 36,41 \quad (mm) \quad (1.103)$$

Rozteč tyčí se volí buď jako 0,8 až 0,9 násobek t_{d1} nebo 1,1 až 1,2 násobek t_{d1} .

Počet tyčí v pólovém nástavci

$$Q_{tn} = \frac{b_n}{t'_t} = \frac{347}{36,41} = 9,53 \quad (-) \quad (1.104)$$

Zvoleno $Q_{tn} = 10$.

Průřez všech tyčí:

$$\begin{aligned} \sum S_t &= 0,15 \cdot n_d \cdot Q \cdot S_{Cu1} = 0,15 \cdot 4 \cdot 132 \cdot 136,4 \\ &= 10803 \quad (mm^2) \end{aligned} \quad (1.105)$$

Průřez jedné tyče:

$$S_t = \frac{\sum S_t}{2 \cdot p \cdot Q_{tn}} = \frac{10803}{2 \cdot 5 \cdot 10} = 108 \quad (mm^2) \quad (1.106)$$

Průměr tyče:

$$d_t = \sqrt{\frac{4 \cdot S_t}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 108}{\pi}} = 12 \quad (\text{mm}) \quad (1.107)$$

Průřez kruhu:

$$S_k = 0,45 \cdot S_t \cdot Q_{tn} = 0,45 \cdot 98 \cdot 10803 = 486 \quad (\text{mm}^2) \quad (1.108)$$

1.9 Kartáče

Kartáče slouží k přívodu nebo odvodu proudu z rotoru elektrického stroje. Jsou přiloženy ke sběracím kroužkům. Kartáč musí přenášet předepsaný tlak. Tento tlak umožňuje přenos proudu do dalších částí sběracího ústrojí. V návrhu jsou zvoleny elektrografitové kartáče s označením EK24, jejichž parametry jsou obsaženy v *tabulce 1.8*.

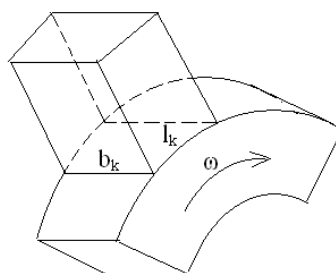
[1]

Přechodové napětí	$u_{př}$ (V)	2,1	Měrný tlak	p_k (kPa)	18
Maximální proudové zatížení	σ_k (A/cm ²)	10	Součinitel tření	μ (-)	0,15
Maximální obvodová rychlost	v_o (m/s)	40			

Tab. 1.8 Parametry elektrografitových kartáčů EK24 [5]

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

Tab. 1.9 Doporučené rozměry kartáčů [5]



Obr. 1.7 Označení rozměrů kartáčů [5]

Celkový průřez kartáčů:

$$S_k = \frac{I_b}{\sigma_k} = \frac{51}{10} = 5,1 \quad (cm^2) \quad (1.109)$$

Dle doporučených hodnot z tabulky 1.9 jsou zvoleny kartáče rozměrů $b_k \times l_k = 25 \times 20$ mm, kde b_k je rozměr ve směru osy, a tím je dán rozměr kroužku a l_k je rozměr v obvodovém směru.

Průřez jednoho kartáče:

$$S_{k1} = 25 \cdot 20 = 5 \quad (cm^2) \quad (1.110)$$

Počet kartáčů jedné polarity:

$$i_k = \frac{S_k}{S_{k1}} = \frac{5,1}{5} = 1 \quad (-) \quad (1.111)$$

Stroj bude mít jeden kartáč každé polarity, tedy celkový počet kartáčů na stroji bude 2. $i_k = 2$.

Průměr hřídele v místě přívodu mechanické energie:

$$d_H = 0,135 \cdot \sqrt[3]{\frac{P_{kW}}{n}} = 0,135 \cdot \sqrt[3]{\frac{5200}{600}} = 0,03 \quad (m) \quad (1.112)$$

Vnější průměr kroužků:

$$D_k = 1,3 \cdot d_H = 1,3 \cdot 0,03 = 0,04 \quad (m) \quad (1.113)$$

Obvodová rychlost kroužků:

$$v_k = \frac{\pi \cdot D_k \cdot 1,5 \cdot n}{60} = \frac{\pi \cdot 0,04 \cdot 1,5 \cdot 600}{60} = 1,36 \quad (m/s) \quad (1.114)$$

Maximální obvodová rychlost je pro kartáče EK24 40m/s. Kartáče tedy vyhovují.

Rozteč kartáče:

$$t_k = \frac{\pi \cdot D_k}{i_k} = \frac{\pi \cdot 0,04}{1} = 0,11 \quad (m) \quad (1.115)$$

Rozteč kartáče je několikanásobně menší než rozměr kartáče v obvodovém směru l_k . Kartáče z tohoto hlediska tedy vyhovují.

1.10 Připevnění pólů

Připevnění pólů ke jhu rotoru je závislé na obvodové rychlosti rotoru, se kterou souvisí odstředivá síla, která na póly a budící vinutí působí. Póly lze připevnit pomocí šroubů, kladiv nebo rybin. Připevnění pomocí pólů je použito u pomaloběžných strojů, kde odstředivá síla není tak velká. Pokud se jedná o póly listinné, je nutné vyztužit jádro pólu pomocí traverzy z tvárného materiálu, ve kterém je vytvořen závit. U rychloběžných strojů se póly k rotorovému jhu připevňují pomocí rybin nebo kladiv. Kladivo má tvar písmene T a rybina má tvar lichoběžníku. Pro přenos stejně velké zatěžující síly má rybina menší výšku než kladivo. Z technologického hlediska je však připevnění pólů pomocí rybin složitější. Rybiny nebo kladiva se uklínují dvěma protiběžnými klíny. Při velkých odstředivých silách lze pól připevnit pomocí dvou kladiv, respektive rybin. [1] [3]

1.10.1 Hmotnost pólů

Hmotnost pólů:

$$\begin{aligned} m_p &= \rho_{Fe} \cdot h_p \cdot b_p \cdot L_p = 7800 \cdot 0,174 \cdot 0,193 \cdot 0,81 \\ &= 212 \quad (kg) \end{aligned} \quad (1.116)$$

Hmotnost pólového nástavce:

$$\begin{aligned} m_n &= \rho_{Fe} \cdot h'_n \cdot b_n \cdot L_n = 7800 \cdot 0,043 \cdot 0,347 \cdot 0,96 \\ &= 112 \quad (kg) \end{aligned} \quad (1.117)$$

kde:

Náhradní výška pólového nástavce:

$$h'_n = 0,043 \quad (m) \quad (1.118)$$

Výška je rovna výšce obdélníka o šířce a ploše pólového nástavce.

Délka pólového nástavce:

$$\begin{aligned} L_n &= L_p + (b_n - b_p) = 0,81 + (0,347 - 0,193) \\ &= 0,96 \quad (m) \end{aligned} \quad (1.119)$$

Hmotnost cívk:

$$\begin{aligned} m_{Cub} &= \rho_{Cu} \cdot S_{Cub} \cdot l_{bs} \cdot N_b = 8900 \cdot 23,4 \cdot 10^{-6} \cdot 2,32 \cdot 408 \\ &= 197 \quad (kg) \end{aligned} \quad (1.120)$$

Poloměr těžiště pólu:

$$\begin{aligned}
 r_p &= \frac{1}{2} \cdot (D_1 - 2\delta - 2h_n - h_p) \\
 &= \frac{1}{2} \cdot (1,7 - 2,0,015 - 2,0,053 - 0,174) \\
 &= 0,69 \quad (m)
 \end{aligned} \tag{1.121}$$

Poloměr těžiště cívkvy:

$$r_c = r_p \tag{1.122}$$

Poloměr těžiště pólového nástavce:

$$\begin{aligned}
 r_n &= \frac{1}{2} \cdot (D_1 - 2\delta - h_n) = \frac{1}{2} \cdot (1,7 - 2,0,015 - 0,053) \\
 &= 0,81 \quad (m)
 \end{aligned} \tag{1.123}$$

Úhlová rychlost:

$$\omega_s = \frac{\pi \cdot 1,2 \cdot n}{30} = \frac{\pi \cdot 1,2 \cdot 600}{30} = 75,4 \quad (m/s) \tag{1.124}$$

Odstředivá síla pólu s cívkou:

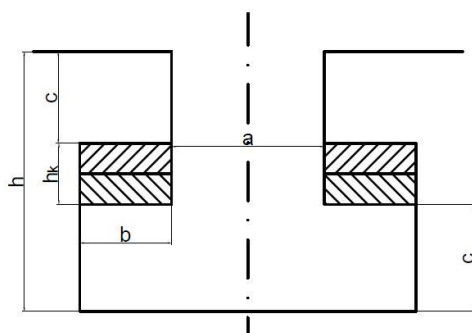
$$\begin{aligned}
 F_p &= \omega^2 [(m_p + m_{Cub}) \cdot r_p + m_n \cdot r_n] \\
 &= 75,4^2 [(212 + 197) \cdot 0,69 + 112 \cdot 0,81] \\
 &= 2,13 \cdot 10^6 \quad \{N\}
 \end{aligned} \tag{1.125}$$

Síla na jednotku délky pólu:

$$F_{p1} = \frac{F_p}{L_p} = \frac{2,13 \cdot 10^6}{0,81} = 2,64 \cdot 10^6 \quad [N/m] \quad (1.126)$$

Tato síla je větší než $2,5 \cdot 10^6$ N/m. Póly tedy budou připevněny pomocí kladiv nebo rybin.

1.10.2 Výpočet kladiva



Obr. 1.8 Rozměry kladiva

Rozměry kladiva:

$$a = \frac{F_{p1}}{\sigma_{dov}} = \frac{2,65 \cdot 10^6}{130 \cdot 10^6} = 0,02 \quad [m] \quad (1.127)$$

kde:

σ_{dov} – dovolené namáhání kladiva

Krček kladiva zvolen $a = 0,025$ m.

$$b \sim \frac{a}{2} = \frac{0,025}{2} = 0,013 \quad [m] \quad (1.128)$$

Zvoleno:

$$c = 0,03 \quad [m]$$

$$h_k = 0,02 \quad [m]$$

Celková výška kladiva:

$$h = 2c + h_k = 2,0,03 + 0,02 = 0,08 \quad [m] \quad (1.129)$$

Maximální dovolené namáhání:

$$\begin{aligned} \sigma_{cmax} &= \frac{F_{p1}}{c} \cdot \left[\frac{3b}{4c} + \left(\sqrt{1 + \left(\frac{3b}{4c} \right)^2} \right) \right] \\ &= \frac{2,64 \cdot 10^6}{0,03} \cdot \left[\frac{3,0,013}{4,0,03} + \left(\sqrt{1 + \left(\frac{3,0,013}{4,0,03} \right)^2} \right) \right] \\ &= 119,5 \quad [MPa] \end{aligned} \quad (1.130)$$

Vypočtené maximální dovolené namáhání je menší než předpokládané. Kladivo je tedy navrženo vhodně.

1.10.3 Mezipólové rozpěrky

Vzdálenost těžiště cívký od osy pólu:

$$\begin{aligned} e &= \frac{1}{2}(b_p + b_c) + t_k = \frac{1}{2}(0,193 + 0,075) + 0,002 \\ &= 0,174 \quad [m] \end{aligned} \quad (1.131)$$

Rozteč mezipólových rozpěrek:

$$\begin{aligned} t &= \frac{1}{\omega_s} \cdot \sqrt{\frac{2\sigma_{dov} \cdot b_v}{\rho \cdot e}} = \frac{1}{75,4} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 130 \cdot 10^6 \cdot 0,012}{8900 \cdot 0,174}} \\ &= 0,608 \quad [m] \end{aligned} \quad (1.132)$$

Počet mezipólových rozpěrek:

$$i = \frac{L_p}{t} - 1 = \frac{0,81}{0,608} - 1 = 0,33 \quad [-] \quad (1.133)$$

Budící vinutí není nutné zajišťovat mezipólovými rozpěrkami.

1.11 Ztráty a účinnost

Výpočet celkových ztrát stroje je důležitý z hlediska stanovení účinnosti celého stroje. V synchronním stroji je možné ztráty rozdělit na ztráty hlavní a přídavné. Do ztrát hlavních patří Jouleovy ztráty, ztráty v železe, mechanické ztráty a ztráty povrchové. Přídavné ztráty jsou u synchronních strojů větší se zřetelem na silnější vodiče. Výpočet jednotlivých přídavných ztrát se počítá obvykle jen u strojů velkého výkonu. Zde jsou vypočteny pouze jako určitá procentní část ze zdánlivého výkonu stroje. [1] [2]

1.11.1 Jouleovy ztráty**Ve statorovém vinutí:**

$$\Delta P_{Cu1d} = m \cdot R_{1d/75} \cdot I^2 = 3,0,04 \cdot 596^2 = 40664 \quad (W) \quad (1.134)$$

$$\Delta P_{Cu1č} = m \cdot R_{1č/75} \cdot I^2 = 3,0,02 \cdot 596^2 = 23253 \quad (W) \quad (1.135)$$

$$\begin{aligned} \Delta P_{Cu1} &= \Delta P_{Cu1d} + \Delta P_{Cu1č} = 40664 + 23253 \\ &= 63917 \quad (W) \end{aligned} \quad (1.136)$$

V budícím vinutí:

$$\Delta P_{Cub} = R_{Cub} \cdot I_b^2 = 8,81 \cdot 51^2 = 23336 \quad (W) \quad (1.137)$$

1.11.2 Ztráty v železe**Ve statorovém jádře:**

$$\begin{aligned}\Delta P_{Fej} &= 1,8 \cdot \Delta p_{Fe} \cdot B_{js}^2 \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} \cdot m_{Fej} \\ &= 1,8 \cdot 1,8 \cdot 1,3^2 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1,3} \cdot 3729 = 20418 \quad (W)\end{aligned}\quad (1.138)$$

kde:

Ztrátové číslo elektrotechnických plechů:

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

Vnější průměr statoru stroje:

$$D_{je} = D_1 + 2 \cdot (h_d + h_{js}) = 1,7 + 2 \cdot (0,092 + 0,12) = 2,13 \quad (m) \quad (1.139)$$

Hmotnost jádra statoru:

$$\begin{aligned}m_{Fej} &= \frac{\pi}{4} \cdot (D_{je}^2 - D_1^2) \cdot l_e \cdot k_{Fe} \cdot \rho_{Fe} \\ &= \frac{\pi}{4} \cdot (2,13^2 - 1,7^2) \cdot 0,68 \cdot 0,92 \cdot 7800 \\ &= 3729 \quad (kg)\end{aligned}\quad (1.140)$$

V zubech statoru:

$$\begin{aligned}\Delta P_{Fez} &= 2 \cdot \Delta p_{Fe} \cdot B_{z2}^2 \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} \cdot m_{Fez} = 2 \cdot 1,8 \cdot 1,3^2 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1,3} \cdot 1465 \\ &= 13174 \quad (W)\end{aligned}\quad (1.141)$$

kde:

Hmotnost zubů statoru:

$$\begin{aligned} m_{Fez} &= Q \cdot z_2 \cdot h_d \cdot l_e \cdot k_{Fe} \cdot \rho_{Fe} = 132.0,02465.0,092.0,92.7800 \\ &= 1465 \quad (kg) \end{aligned} \quad (1.142)$$

1.11.3 Povrchové ztráty

$$\begin{aligned} \Delta P_p &= \frac{\pi}{2} \cdot D_1 \cdot \alpha \cdot L_p \cdot k_0 \cdot \left(\frac{Q \cdot n}{10000} \right) \cdot (t_{d1} \cdot \beta \cdot 1000 \cdot B_\delta \cdot k_{cd})^2 \\ &= \frac{\pi}{2} \cdot 1,7.0,65.0,8.2,8 \cdot \left(\frac{132.600}{10000} \right) \cdot (0,04046.0,06.1000.0,85.1,09)^2 \\ &= 443 \quad (W) \end{aligned} \quad (1.143)$$

kde:

k_0, β – činitelé povrchových ztrát v pólovém nastavci viz příloha J

1.11.4 Mechanické ztráty

$$\begin{aligned} \Delta P_m &= v^{2.5} \cdot D_1 \cdot \sqrt{l_e} = 53,41^{2.5} \cdot 1,7 \cdot \sqrt{0,68} \\ &= 29273 \quad (W) \end{aligned} \quad (1.144)$$

kde:

Obvodová rychlost rotoru:

$$v = \frac{\pi \cdot D_1 \cdot n}{60} = \frac{\pi \cdot 1,7.600}{60} = 53,41 \quad (m/s) \quad (1.145)$$

1.11.5 Přídavné ztráty

$$\Delta P_{př} = 0,003 \cdot S = 0,003.6500.10^3 = 19500 \quad (W) \quad (1.146)$$

1.11.6 Celkové ztráty

$$\begin{aligned} \Delta P &= \Delta P_{Cu1} + \Delta P_{Cub} + \Delta P_{Fej} + \Delta P_{Fez} + \Delta P_p + \Delta P_m + \Delta P_{př} \\ &= 63917 + 23336 + 20418 + 13174 + 443 \\ &\quad + 29273 + 19500 = 170082 \quad (W) \end{aligned} \quad (1.147)$$

1.11.7 Účinnost

$$\begin{aligned}\eta &= \left(\frac{P}{P + \Delta P} \right) \cdot 100 = \left(\frac{5200 \cdot 10^3}{5200 \cdot 10^3 + 170082} \right) \cdot 100 && (1.148) \\ &= 96,83 \quad (\%) \end{aligned}$$

2. Elektromagnetický návrh synchronního generátoru s $\alpha=0,75$

Základní výpočty, návrh vinutí induktu, návrh drážky, odpor a rozptylová reaktance statorového vinutí jsou shodné jako u prvního stroje s činitelem pólového krytí $\alpha = 0,65$.

2.1 Zadané parametry

Zdánlivý výkon: $S = 6\,500$ (kVA)

Sdružené napětí: $U_S = 6\,300$ (V)

Počet pólů: $2p = 10$ (-)

Počet fází: $m = 3$ (-)

Frekvence: $f = 50$ (Hz)

Účinník: $\cos \varphi = 0,8$ (-)

Činitel pólového krytí: $a \alpha = 0,75$ (-)

2.2 Návrh magnetického obvodu

Magnetický tok:

$$\phi = \frac{U_f}{4,44 \cdot f \cdot N_s \cdot k_{v1}} = \frac{3637}{4,44 \cdot 50 \cdot 90 \cdot 0,92} = 0,1973 \quad (Vs) \quad (2.1)$$

Kontrola magnetického toku:

$$\begin{aligned} \phi &= \left(\frac{2}{\pi}\right) \cdot t_p \cdot l_e \cdot B_\delta = \left(\frac{2}{\pi}\right) \cdot 0,53 \cdot 0,68 \cdot 0,85 \\ &= 0,1972 \quad (Vs) \end{aligned} \quad (2.2)$$

Dále je počítáno s hodnotou $\phi = 0,1973$ Vs.

Vzduchová mezera:

$$\begin{aligned} \delta &= k \cdot \frac{A \cdot t_p}{B_\delta} \cdot \frac{10^{-6}}{x_d - x_\sigma} = 45 \cdot \frac{60229 \cdot 0,53}{0,85} \cdot \frac{10^{-6}}{127 - 12,78} \\ &= 0,015 \quad (m) \end{aligned} \quad (2.3)$$

2.2.1 Magnetické napětí reakce kotvy

Amplituda základní harmonické reakce kotvy:

$$F_a = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{1}{C_1} \cdot A \cdot t_p \cdot k_{v1} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{1}{1,01} \cdot 60229,0,53,0,92$$

$$= 12199 \quad (A) \quad (2.4)$$

Amplituda základní harmonické napětí v podélném směru:

$$F_{d1} = C_{d1} \cdot F_a = 0,92 \cdot 12199 = 11223 \quad (A) \quad (2.5)$$

kde:

$$C_{d1} = e \cdot f = 0,82 \cdot 1,12 = 0,92 \quad (-) \quad (2.6)$$

Koeficienty e a f jsou odečteny z přílohy I.

Amplituda základní harmonické napětí v příčném směru:

$$F_{q1} = C_{q1} \cdot F_a = 0,53 \cdot 12199 = 6465 \quad (A) \quad (2.7)$$

kde:

$$C_{q1} = g \cdot h = 1,75 \cdot 0,3 = 0,53 \quad (-) \quad (2.8)$$

Koeficienty g a h jsou odečteny z přílohy I

Výše uvedené vztahy jsou vypočítané pro:

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

$$\frac{\delta}{t_p} = \frac{0,015}{0,530} = 0,03 \quad (-)$$

$$\alpha = 0,75 \quad (-)$$

2.2.2 Dimenzování magnetického obvodu

Výška pólu:

$$h_p = 0,3 \cdot t_p = 0,3 \cdot 0,530 = 0,160 \quad (m) \quad (2.9)$$

Výška nástavce:

$$h_n = 0,1 \cdot t_p = 0,1 \cdot 0,53 = 0,053 \quad (m) \quad (2.10)$$

Šířka pólu:

$$b_p = \frac{(1 + \nu) \cdot \phi}{B_p \cdot L_p} = \frac{(1 + 0,15) \cdot 0,1973}{1,45 \cdot 0,81} = 0,193 \quad (m) \quad (2.11)$$

Šířka pólového nástavce:

$$b_n = \alpha \cdot t_p = 0,75 \cdot 0,53 = 0,403 \quad (m) \quad (2.12)$$

Výška jha rotoru:

$$h_{jr} = \frac{(1 + \nu) \cdot \phi}{2 \cdot B_{jr} \cdot L_r} = \frac{(1 + 0,15) \cdot 0,1973}{2 \cdot 1,1 \cdot 1} = 0,100 \quad (m) \quad (2.13)$$

Výška jádra induktu:

$$h_{js} = \frac{\phi}{2 \cdot B_{js} \cdot k_{Fe} \cdot l_e} = \frac{0,1973}{2 \cdot 1,3 \cdot 0,92 \cdot 0,68} = 0,120 \quad (m) \quad (2.14)$$

2.2.3 Délka středních siločar jednotlivých částí magnetického obvodu

Pól:

$$l_p = h_p + h_n = 0,160 + 0,053 = 0,213 \quad (m) \quad (2.15)$$

Jho rotoru:

$$\begin{aligned} l_r &= \frac{\pi \cdot [D_1 - 2 \cdot (\delta + h_p + h_n)]}{4 \cdot p} \\ &= \frac{\pi \cdot [1,7 - 2 \cdot (0,015 + 0,160 + 0,053)]}{4,5} \\ &= 0,195 \quad (m) \end{aligned} \quad (2.16)$$

Jádro kotvy:

$$\begin{aligned} l_s &= \frac{\pi \cdot [D_1 - 2 \cdot (h_d + h_{js})]}{4 \cdot p} = \frac{\pi \cdot [1,7 - 2 \cdot (0,092 + 0,120)]}{4,5} \\ &= 0,334 \quad (m) \end{aligned} \quad (2.17)$$

2.2.4 Charakteristika naprázdno

Carterův činitel respektující vliv drážkování induktu:

Činitel je odečten z grafu viz příloha G.

$$\begin{aligned} k_{cd} &= 1,09 \quad (-) \\ \frac{b_0}{z_1} &= \frac{18}{22,46} = 0,8 \quad (-) \\ \frac{b_0}{\delta} &= \frac{18}{15} = 1,2 \quad (-) \end{aligned}$$

Carterův činitel respektující vliv radiálních ventilačních kanálů:

$$k_{ck} = \frac{1}{1 + \frac{\delta}{2 + \delta} \cdot \frac{\check{s}_k \cdot i}{l_e}} = \frac{1}{1 + \frac{15}{2 + 15} \cdot \frac{10.14}{680}} \quad (2.18)$$

$$= 0,85 \quad (-)$$

Výsledný Carterův činitel:

$$k_c = k_{cd} \cdot k_{ck} = 1,09 \cdot 0,85 = 0,93 \quad (-) \quad (2.19)$$

Magnetické napětí ve vzduchové mezeře:

$$F_\delta = 0,8 \cdot k_c \cdot \delta \cdot B_\delta \cdot 10^6 = 0,8 \cdot 0,93 \cdot 0,015 \cdot 0,85 \cdot 10^6 \quad (2.20)$$

$$= 9450 \quad (A)$$

Charakteristika zubové vrstvy:

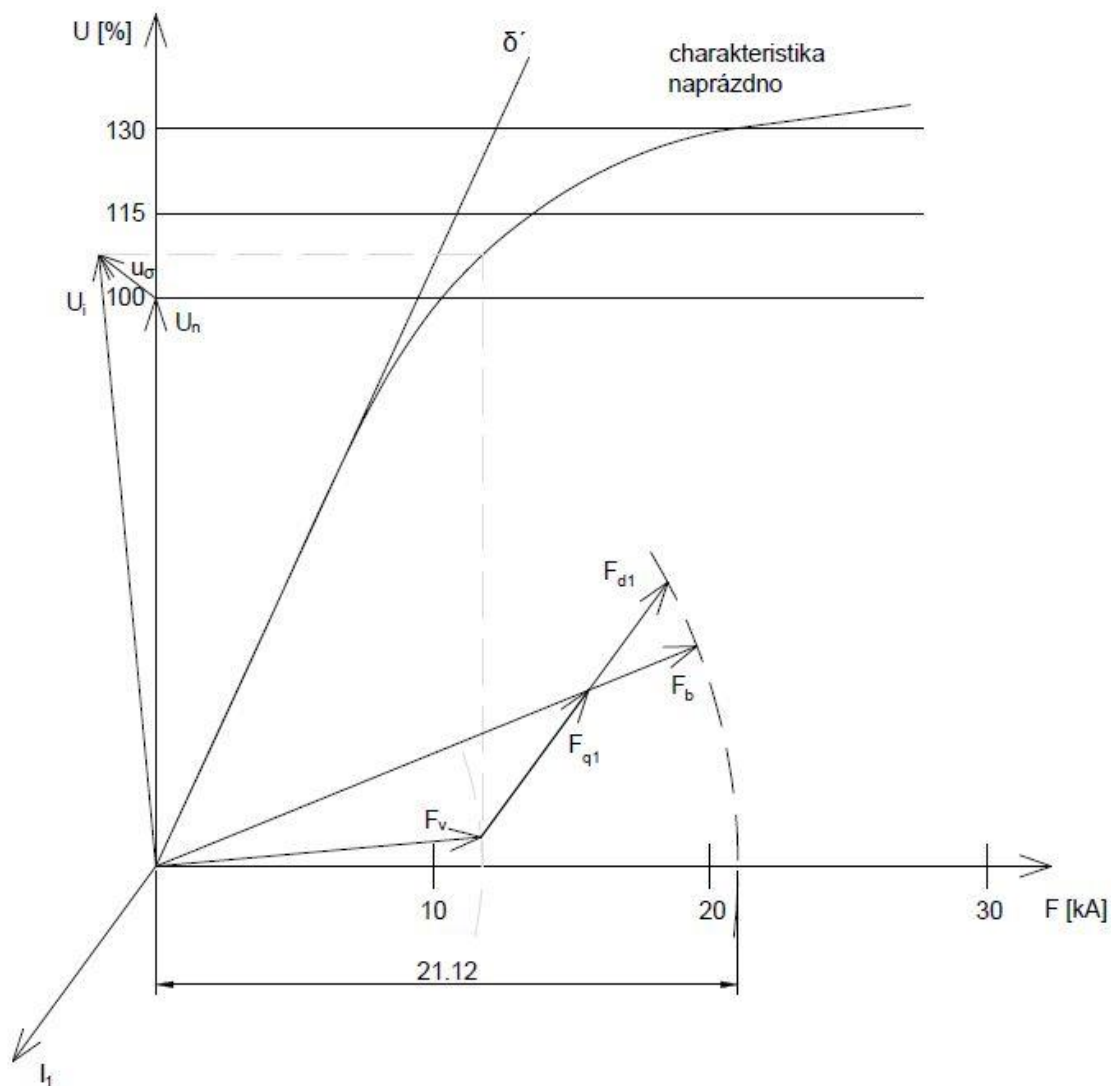
D ₁	D ₁	1700	t _{d1}	40,46	z ₁	22,46	k _{z1}	0,96	B' _{z1}	1,66	B _{z1}	1,63	H _{z1}	4000	H _{ztr}	3267	F _z	301	
D ₂ =D ₁ ±h _d	D ₂	1792	t _{d2}	42,65	z ₂	24,65	k _{z2}	0,88	B' _{z2}	1,60	B _{z2}	1,58	H _{z2}	3400					
D ₃ =D ₁ ±2h _d	D ₃	1884	t _{d3}	44,84	z ₃	26,84	k _{z3}	0,82	B' _{z3}	1,54	B _{z3}	1,53	H _{z3}	2000					
k ₁ = 1,15									k ₁ · φ	B' _{z1}	1,91	B _{z1}	1,84	H _{z1}	14500	H _{ztr}	11083	F _z	1020
										B' _{z2}	1,84	B _{z2}	1,79	H _{z2}	11000				
										B' _{z3}	1,78	B _{z3}	1,73	H _{z3}	8000				
k ₂ = 1,3									k ₂ · φ	B' _{z1}	2,16	B _{z1}	2,02	H _{z1}	32000	H _{ztr}	28167	F _z	2591
										B' _{z2}	2,08	B _{z2}	1,97	H _{z2}	29000				
										B' _{z3}	2,01	B _{z3}	1,93	H _{z3}	21000				

Tab. 2.1 Charakteristika zubové vrstvy

Charakteristika výsledná:

			φ			k ₁ · φ			k ₂ · φ				
			B	H	F	B	H	F	B	H	F		
Vzd. mezera		δ=0,016 m	0,85		9450			10868			12285		
Zubová vrstva	Hlava	k _{z1} = 0,96	B' _{z1}	1,66	4000		1,91	14500		2,16	32000		
			B _{z1}	1,63			1,84			2,02			
	Střed	k _{z2} = 0,88	B' _{z2}	1,60	3400		1,84	11000		2,08	29000		
			B _{z2}	1,58			1,79			1,97			
	Pata	k _{z3} = 0,82	B' _{z3}	1,54	2000		1,78	8000		2,01	21000		
			B _{z3}	1,53			1,73			1,93			
	Střední hodnota		h _z	0,092		3267	301		11083	1020		28167	2591
	Jádro statoru		l _s	0,334	1,3	650	217	1,50	1600	534	1,69	6000	2004
ΣF = F _δ + F _z + F _s = Fσ						9968			12421			16880	
Pól		l _p	0,214	1,45	1200	256	1,67	5000	1068	1,89	18000	3845	
Jho rotoru		l _r	0,195	1,1	360	70	1,27	600	117	1,43	1150	224	
ΣF = F _p + F _r						327			1185			4069	
ΣF = F _δ + F _z + F _s + F _p + F _r						10294			13607			20950	

Tab. 2.2 Charakteristika výsledná



Obr. 2.1 Charakteristika naprázdno pro $\alpha = 0,75$

Budící magnetické napětí

Z charakteristiky naprázdno je grafickou metodou určeno magnetické napětí

$$F_b = 21\,120 \quad (A) \quad (2.21)$$

2.3 Návrh budícího vinutí:

2.3.1 Budící cívka

Přesahující část pólového nástavce:

$$a = \frac{b_n - b_p}{2} = \frac{0,401 - 0,193}{2} = 0,104 \quad (m) \quad (2.22)$$

Střední délka závitů cívk:

$$l_{bs} = 2 \cdot (L_p + b_p + 2 \cdot a) = 2 \cdot (0,81 + 0,193 + 2,0,104) = 2,21 \quad (m) \quad (2.23)$$

Průřez vodiče budící cívk:

$$S'_{cub} = \frac{\rho_{Cu} \cdot l_{bs} \cdot 2p \cdot F_b}{0,9U_b} = \frac{1}{56} \cdot \frac{2,21 \cdot 10 \cdot 21120}{0,9 \cdot 400} = 23,17 \quad (mm^2) \quad (2.24)$$

Zvolen rozměr holého ($b_v \times h_v$)/izolovaného ($b_{vi} \times h_{vi}$) vodiče 12x2/12,5x2,5 mm.

Skutečný průřez vodiče budící cívk:

$$S_{Cub} = 23,4 \quad (mm^2) \quad (2.25)$$

Odečteno viz příloha C

Předběžné volíme proudovou hustotu

$$\sigma_{Cub} = 1,9 \text{ A/mm}^2 \quad (2.26)$$

Budící proud:

$$I_b = \sigma_{Cub} \cdot S_{Cub} = 1,9 \cdot 23,4 = 44 \quad (A) \quad (2.27)$$

Počet závitů budící cívk:

$$N_b = \frac{F_b}{I_b} = \frac{21120}{44} = 475 \quad (-) \quad (2.28)$$

Počet poloh cívk:

$$n'_p = \frac{a - t_k}{h_{vi}} = \frac{0,104 - 2}{12,5} = 8 \quad (-) \quad (2.29)$$

Tloušťka cívkvy:

$$b_c = h_{vi} \cdot n'_p = 12,5 \cdot 8 = 100 \quad (-) \quad (2.30)$$

Počet závitů v jedné poloze:

$$N'_{p1} = \frac{N_b}{n'_p} = \frac{475}{8} = 59 \quad (-) \quad (2.31)$$

Výška cívkvy:

$$h_c = N'_{p1} \cdot (b_v + t_i) = 59 \cdot (2 + 0,5) = 147,5 \quad (mm) \quad (2.32)$$

Výška pólu:

$$h_p = h_c + 2 \cdot t_k = 147,5 + 2 \cdot 2 = 151,5 \quad (mm) \quad (2.33)$$

Výška pólu vyšla nižší než při prvotním odhadu (160 mm).

2.3.2 Orientační výpočet oteplení budící cívkvy

Vnější obvod budící cívkvy:

$$\begin{aligned} l_{be} &= 2 \cdot (L_p + b_p + 4 \cdot a) = 2 \cdot (0,81 + 0,193 + 4 \cdot 0,104) \\ &= 2,83 \quad (m) \end{aligned} \quad (2.34)$$

Střední obvod budící cívkvy:

$$\begin{aligned} l_{bs} &= 2 \cdot \left[L_p + b_p + 4 \cdot \left(t_k + \frac{b_c}{2} \right) \right] \\ &= 2 \cdot \left[0,81 + 0,193 + 4 \cdot \left(0,002 + \frac{100}{2} \right) \right] \\ &= 2,42 \quad (m) \end{aligned} \quad (2.35)$$

Ochlazovací povrch všech cívek:

$$Q_{2pc} = h_c \cdot l_{bs} \cdot 2p = 0,147 \cdot 2,42 \cdot 10 = 3,57 \quad (m^2) \quad (2.36)$$

Odpor všech cívek budícího vinutí:

$$R_{Cub} = 1,22 \cdot \rho \cdot \frac{l_{bs} \cdot N_b \cdot 2p}{S_{Cub}} = 1,22 \cdot \frac{1}{56} \cdot \frac{2,42 \cdot 475 \cdot 10}{23,4} = 10,71 \quad (\Omega) \quad (2.37)$$

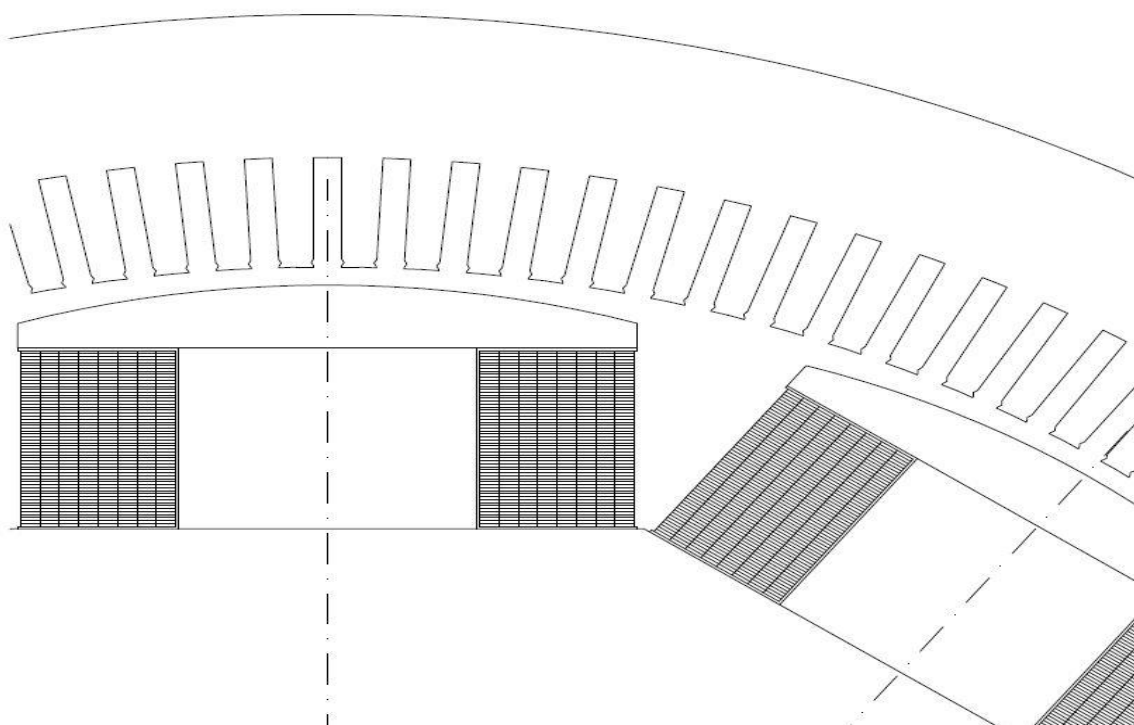
Ztráty v budícím vinutí:

$$\Delta P_{Cub} = R_{b/75} \cdot I_b^2 = 10,71 \cdot 44^2 = 21162 \quad (W) \quad (2.38)$$

Oteplení cívk:

$$\Delta \vartheta_{Cub} = \frac{1,18 \cdot \Delta P_{Cub}}{\alpha \cdot Q_{2pc}} = \frac{1,18 \cdot 21162}{85 \cdot 3,57} = 82 \quad (^\circ C) \quad (2.39)$$

Vyhovuje pro použití izolace třídy B.



Obr. 2.2 Pólový nástavec s budící cívkou pro $\alpha = 0,75$

2.4 Tlumič

Rozteč tyčí:

$$t'_t = 1,1 \cdot t_{d1} = 1,1 \cdot 40,46 = 44,51 \quad (\text{mm}) \quad (2.40)$$

Počet tyčí v pólovém nastavci

$$Q_{tn} = \frac{b_n}{t'_t} = \frac{407}{44,51} = 9 \quad (-) \quad (2.41)$$

Zvoleno $Q_{tn} = 9$

Průřez všech tyčí:

$$\begin{aligned} \sum S_t &= 0,15 \cdot n_d \cdot Q \cdot S_{Cu1} = 0,15 \cdot 4 \cdot 132 \cdot 136,4 \\ &= 10803 \quad (\text{mm}^2) \end{aligned} \quad (2.42)$$

Průřez jedné tyče:

$$S_t = \frac{\sum S_t}{2 \cdot p \cdot Q_{tn}} = \frac{10803}{2 \cdot 5 \cdot 9} = 120 \quad (\text{mm}^2) \quad (2.43)$$

Průměr tyče:

$$d_t = \sqrt{\frac{4 \cdot S_t}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 120}{\pi}} = 12 \quad (\text{mm}) \quad (2.44)$$

Průřez kruhu:

$$S_k = 0,45 \cdot S_t \cdot Q_{tn} = 0,45 \cdot 98 \cdot 10803 = 486 \quad (\text{mm}^2) \quad (2.45)$$

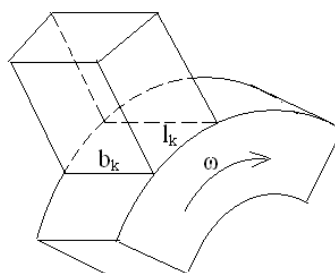
2.5 Kartáče

Přechodové napětí	$u_{př}$ (V)	2,1	Měrný tlak	p_k (kPa)	18
Maximální proudové zatížení	σ_k (A/cm ²)	10	Součinitel tření	μ (-)	0,15
Maximální obvodová rychlost	v_o (m/s)	40			

Tab. 2.3 Parametry elektografitových kartáčů EK24 [5]

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

Tab. 2.4 Doporučení rozměry kartáčů [5]



Obr. 2.3 Označení rozměrů kartáčů [5]

Celkový průřez kartáčů:

$$S_k = \frac{l_b}{\sigma_k} = \frac{44}{10} = 4,4 \quad (\text{cm}^2) \quad (2.46)$$

Zvoleny rozměry kartáčů $b_k \times l_k = 25 \times 20$ mm

Průřez jednoho kartáče:

$$S_{k1} = 25.20 = 5 \quad (\text{cm}^2) \quad (2.47)$$

Počet kartáčů jedné polaroty:

$$i_k = \frac{S_k}{S_{k1}} = \frac{4,4}{5} = 1 \quad (-) \quad (2.48)$$

Průměr hřídele v místě přívodu mechanické energie:

$$d_H = 0,135 \cdot \sqrt[3]{\frac{P_{kW}}{n}} = 0,135 \cdot \sqrt[3]{\frac{5200}{600}} = 0,03 \quad (\text{m}) \quad (2.49)$$

Vnější průměr kroužků:

$$D_k = 1,3 \cdot d_H = 1,3 \cdot 0,03 = 0,04 \quad (\text{m}) \quad (2.50)$$

Obvodová rychlost kroužků:

$$v_k = \frac{\pi \cdot D_k \cdot 1,5 \cdot n}{60} = \frac{\pi \cdot 0,04 \cdot 1,5 \cdot 600}{60} = 1,36 \quad (\text{m/s}) \quad (2.51)$$

Rozteč kartáče:

$$t_k = \frac{\pi \cdot D_k}{i_k} = \frac{\pi \cdot 0,04}{1} = 0,11 \quad (\text{m}) \quad (2.52)$$

2.6 Připevnění pólů a hmotnost pólů

2.6.1 Hmotnost pólů

Hmotnost pólů:

$$\begin{aligned} m_p &= \rho_{Fe} \cdot h_p \cdot b_p \cdot L_p = 7800 \cdot 0,152 \cdot 0,193 \cdot 0,81 \\ &= 185 \quad (kg) \end{aligned} \quad (2.53)$$

Hmotnost pólového nástavce:

$$\begin{aligned} m_n &= \rho_{Fe} \cdot h'_n \cdot b_n \cdot L_n = 7800 \cdot 0,042 \cdot 0,401 \cdot 1,02 \\ &= 135 \quad (kg) \end{aligned} \quad (2.54)$$

kde:

Náhradní výška pólového nástavce:

$$h'_n = 0,042 \quad (m) \quad (2.55)$$

Délka pólového nástavce:

$$\begin{aligned} L_n &= L_p + (b_n - b_p) = 0,81 + (0,401 - 0,193) \\ &= 1,02 \quad (m) \end{aligned} \quad (2.56)$$

Hmotnost cívk:

$$\begin{aligned} m_{Cub} &= \rho_{Cu} \cdot S_{Cub} \cdot l_{bs} \cdot N_b = 8900 \cdot 23,4 \cdot 10^{-6} \cdot 2,42 \cdot 475 \\ &= 239 \quad (kg) \end{aligned} \quad (2.57)$$

Poloměr těžiště pólu:

$$\begin{aligned}
 r_p &= \frac{1}{2} \cdot (D_1 - 2\delta - 2h_n - h_p) \\
 &= \frac{1}{2} \cdot (1,7 - 2,0,015 - 2,0,053 - 0,152) \\
 &= 0,71 \quad (m)
 \end{aligned}
 \tag{2.58}$$

Poloměr těžiště cívkvy:

$$r_c = r_p \tag{2.59}$$

Poloměr těžiště pólového nástavce:

$$\begin{aligned}
 r_n &= \frac{1}{2} \cdot (D_1 - 2\delta - h_n) = \frac{1}{2} \cdot (1,7 - 2,0,015 - 0,053) \\
 &= 0,81 \quad (m)
 \end{aligned}
 \tag{2.60}$$

Úhlová rychlost:

$$\omega_s = \frac{\pi \cdot 1,2 \cdot n}{30} = \frac{\pi \cdot 1,2 \cdot 600}{30} = 75,4 \quad (m/s) \tag{2.61}$$

Odstředivá síla pólu s cívkou:

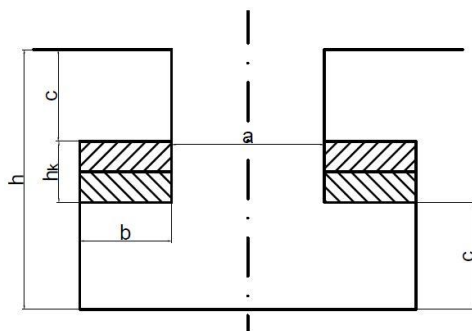
$$\begin{aligned}
 F_p &= \omega^2 [(m_p + m_{Cub}) \cdot r_p + m_n \cdot r_n] \\
 &= 75,4^2 [(185 + 239) \cdot 0,71 + 135 \cdot 0,81] \\
 &= 2,32 \cdot 10^6 \quad \{N\}
 \end{aligned}
 \tag{2.62}$$

Síla na jednotku délky pólu:

$$F_{p1} = \frac{F_p}{L_p} = \frac{2,32 \cdot 10^6}{0,81} = 2,87 \cdot 10^6 \quad [N/m] \quad (2.63)$$

Tato síla je větší než $2,5 \cdot 10^6$ N/m. Póly tedy budou připevněny pomocí kladiv nebo rybin.

2.6.2 Výpočet kladiva



Obr. 2.4 Rozměry kladiva

Rozměry kladiva:

$$a = \frac{F_{p1}}{\sigma_{dov}} = \frac{2,87 \cdot 10^6}{130 \cdot 10^6} = 0,022 \quad [m] \quad (2.64)$$

Krček kladiva zvolen $a = 0,025$ m.

$$b \sim \frac{a}{2} = \frac{0,025}{2} = 0,013 \quad [m] \quad (2.65)$$

Zvoleno:

$$c = 0,03 \quad [m]$$

$$h_{kl} = 0,02 \quad [m]$$

Celková výška kladiva:

$$h = 2c + h_k = 2 \cdot 0,03 + 0,02 = 0,08 \quad [m] \quad (2.66)$$

Maximální dovolené namáhání:

$$\begin{aligned}\sigma_{cmax} &= \frac{F_{p1}}{c} \cdot \left[\frac{3b}{4c} + \left(\sqrt{1 + \left(\frac{3b}{4c} \right)^2} \right) \right] \\ &= \frac{2,87 \cdot 10^6}{0,03} \cdot \left[\frac{3,0,013}{4,0,03} + \left(\sqrt{1 + \left(\frac{3,0,013}{4,0,03} \right)^2} \right) \right] \\ &= 130 \quad [MPa]\end{aligned}\tag{2.67}$$

Vypočtené maximální dovolené namáhání je shodné jako předpokládané. Kladivo je tedy navrženo vhodně.

2.6.3 Mezipólové rozpěrky

Vzdálenost těžiště cívky od osy pólu:

$$\begin{aligned}e &= \frac{1}{2}(b_p + b_c) + t_k = \frac{1}{2}(0,193 + 0,100) + 0,002 \\ &= 0,199 \quad [m]\end{aligned}\tag{2.68}$$

Rozteč mezipólových rozpěrek:

$$\begin{aligned}t &= \frac{1}{\omega_s} \cdot \sqrt{\frac{2\sigma_{dov} \cdot b_v}{\rho \cdot e}} = \frac{1}{75,4} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 130 \cdot 10^6 \cdot 0,012}{8900 \cdot 0,1}} \\ &= 0,569 \quad [m]\end{aligned}\tag{2.69}$$

Počet mezipólových rozpěrek:

$$i = \frac{L_p}{t} - 1 = \frac{0,81}{0,569} - 1 = 0,44 \quad [-]\tag{2.70}$$

Budící vinutí není nutné zajišťovat mezipólovými rozpěrkami.

2.7 Ztráty a účinnost

2.7.1 Jouleovy ztráty

Ve statorovém vinutí:

$$\Delta P_{Cu1d} = m \cdot R_{1d/75} \cdot I^2 = 3,0,04 \cdot 596^2 = 40664 \quad (W) \quad (2.71)$$

$$\Delta P_{Cu1č} = m \cdot R_{1č/75} \cdot I^2 = 3,0,02 \cdot 596^2 = 23253 \quad (W) \quad (2.72)$$

$$\begin{aligned} \Delta P_{Cu1} &= \Delta P_{Cu1d} + \Delta P_{Cu1č} = 40664 + 52253 \\ &= 63917 \quad (W) \end{aligned} \quad (2.73)$$

V budícím vinutí:

$$\Delta P_{Cub} = R_{Cub} \cdot I_b^2 = 10,71 \cdot 44^2 = 21163 \quad (W) \quad (2.74)$$

2.7.2 Ztráty v železe

Ve statorovém jádře:

$$\begin{aligned} \Delta P_{Fej} &= 1,8 \cdot \Delta p_{Fe} \cdot B_{js}^2 \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} \cdot m_{Fej} \\ &= 1,8 \cdot 1,8 \cdot 1,3^2 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1,3} \cdot 3729 = 20418 \quad (W) \end{aligned} \quad (2.75)$$

kde:

Ztrátové číslo elektrotechnických plechů:

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

Vnější průměr statoru stroje:

$$D_{je} = D_1 + 2 \cdot (h_d + h_{js}) = 1,7 + 2 \cdot (0,092 + 0,12) = 2,13 \quad (m) \quad (2.76)$$

Hmotnost jádra statoru:

$$\begin{aligned}
 m_{Fej} &= \frac{\pi}{4} \cdot (D_{je}^2 - D_1^2) \cdot l_e \cdot k_{Fe} \cdot \rho_{Fe} \\
 &= \frac{\pi}{4} \cdot (2,13^2 - 1,7^2) \cdot 0,68 \cdot 0,92 \cdot 7800 \\
 &= 3729 \quad (kg)
 \end{aligned}
 \tag{2.77}$$

V zubech statoru:

$$\begin{aligned}
 \Delta P_{Fez} &= 2 \cdot \Delta p_{Fe} \cdot B_{z2}^2 \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} \cdot m_{Fez} = 2 \cdot 1,8 \cdot 1,3^2 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1,3} \cdot 1465 \\
 &= 13174 \quad (W)
 \end{aligned}
 \tag{2.78}$$

kde:

Hmotnost zubů statoru:

$$\begin{aligned}
 m_{Fez} &= Q \cdot z_2 \cdot h_d \cdot l_e \cdot k_{Fe} \cdot \rho_{Fe} = 132 \cdot 0,02465 \cdot 0,092 \cdot 0,92 \cdot 7800 \\
 &= 1465 \quad (kg)
 \end{aligned}
 \tag{2.79}$$

2.7.3 Povrchové ztráty

$$\begin{aligned}
 \Delta P_p &= \frac{\pi}{2} \cdot D_1 \cdot \alpha \cdot L_p \cdot k_0 \cdot \left(\frac{Q \cdot n}{10000}\right) \cdot (t_{d1} \cdot \beta \cdot 1000 \cdot B_\delta \cdot k_{cd})^2 \\
 &= \frac{\pi}{2} \cdot 1,7 \cdot 0,75 \cdot 0,8 \cdot 2,8 \cdot \left(\frac{132 \cdot 600}{10000}\right) \cdot (0,04046 \cdot 0,06 \cdot 1000 \cdot 0,85 \cdot 1,09)^2 \\
 &= 511 \quad (W)
 \end{aligned}
 \tag{2.80}$$

2.7.4 Mechanické ztráty

$$\begin{aligned}
 \Delta P_m &= v^{2,5} \cdot D_1 \cdot \sqrt{l_e} = 53,41^{2,5} \cdot 1,7 \cdot \sqrt{0,68} \\
 &= 29273 \quad (W)
 \end{aligned}
 \tag{2.81}$$

kde:

Obvodová rychlost rotoru:

$$v = \frac{\pi \cdot D_1 \cdot n}{60} = \frac{\pi \cdot 1,7.600}{60} = 53,41 \quad (m/s) \quad (2.82)$$

2.7.5 Přídavné ztráty

$$\Delta P_{př} = 0,003 \cdot S = 0,003 \cdot 6500 \cdot 10^3 = 19500 \quad (W) \quad (2.83)$$

2.7.6 Celkové ztráty

$$\begin{aligned} \Delta P &= \Delta P_{Cu1} + \Delta P_{Cub} + \Delta P_{Fej} + \Delta P_{Fez} + \Delta P_p + \Delta P_m + \Delta P_{př} \\ &= 63917 + 21162 + 20418 + 13174 + 511 \\ &\quad + 29273 + 19500 = 167958 \quad (W) \end{aligned} \quad (2.84)$$

2.7.7 Účinnost

$$\begin{aligned} \eta &= \left(\frac{P}{P + \Delta P} \right) \cdot 100 = \left(\frac{5200 \cdot 10^3}{5200 \cdot 10^3 + 167958} \right) \cdot 100 \\ &= 96,87 \quad (\%) \end{aligned} \quad (2.85)$$

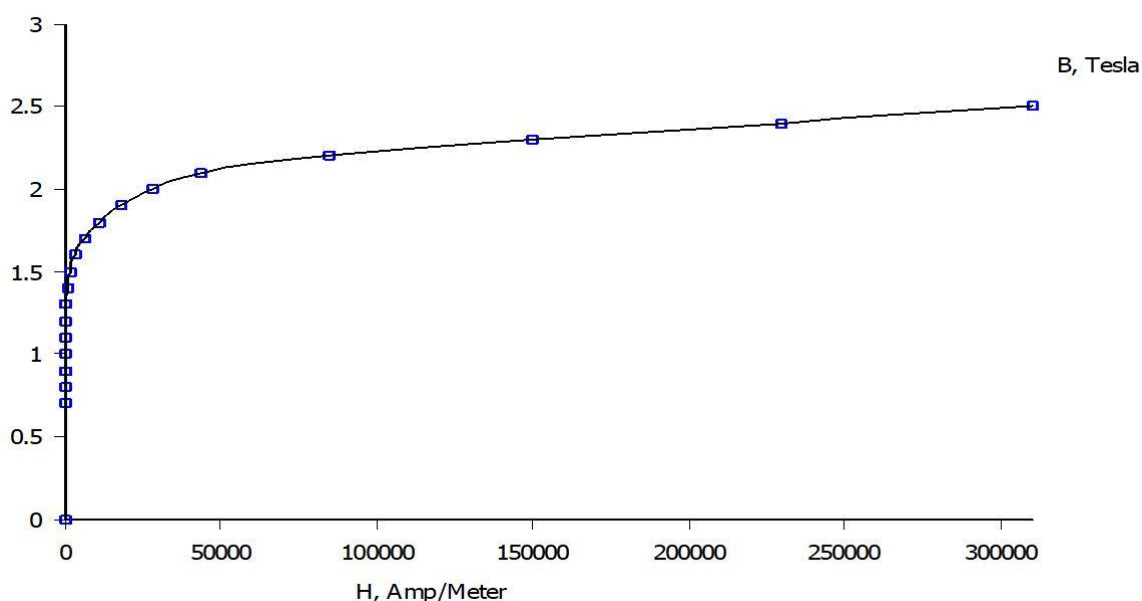
3. Analýza magnetického pole pomocí metody konečných prvků

3.1 Metoda konečných prvků

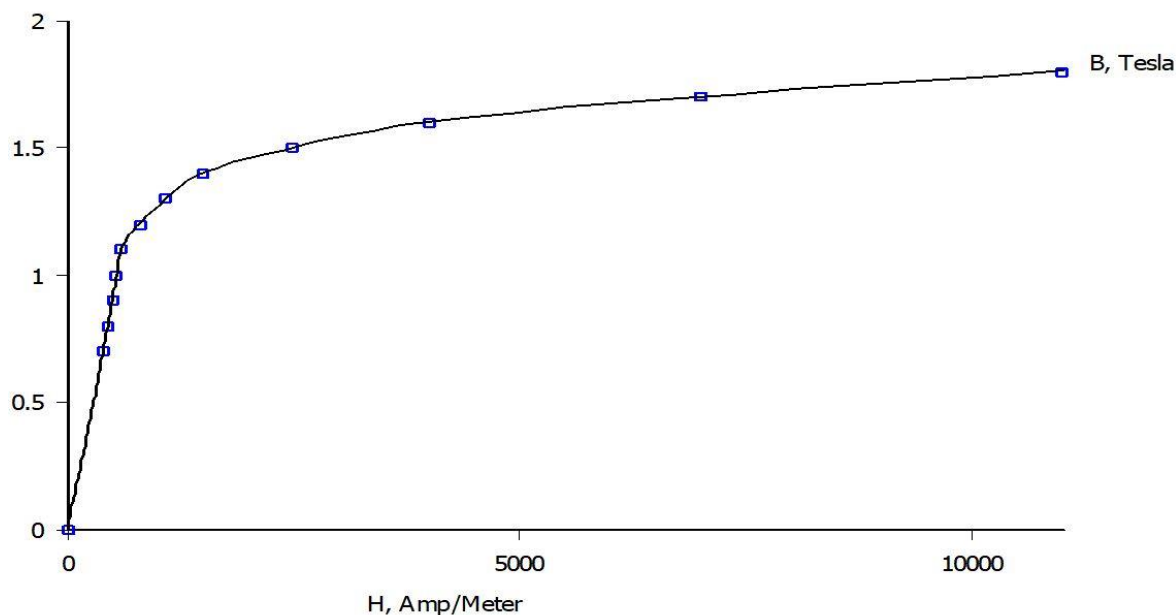
Metoda konečných prvků (MKP), v anglickém jazyce nazývaná Finite Element Method (FEM), je přibližná metoda k řešení problémů, které jsou popsány diferenciálními rovnicemi. Její počátky lze najít ve 40. letech 20. století v práci Alexandra Hrennikoffa (1941) a Richarda Couranta (1942), kdy Hrennikoff rozděluje zkoumanou oblast pomocí mřížky a Courant na trojúhelníkové elementy. Princip metody tedy spočívá v tom, že řešená oblast je rozdělena na konečný počet malých prvků. Tyto prvky vytváří síť, která pokrývá celou oblast a v uzlech této sítě jsou hledány neznáme parametry. [6] [7] [8]

3.2 Definice problému

Nejprve byla v programu QCAD vytvořena geometrie dle výpočtu z předchozího elektromagnetického návrhu. Díky možnosti použít symetrii stroje byla použita geometrie desetiny stroje. Následně byl tento náčrtek ve formátu dxf. importován do programu FEMM ver. 4.2, ve kterém probíhala samotná analýza magnetického pole. Program umožňuje i kreslení stroje přímo v programu, avšak to je dosti náročné. Poté bylo nutné definovat všechny materiálové oblasti a okrajové podmínky. Materiálové oblasti byly definovány pomocí lineární B-H charakteristiky u mědi a vzduchu a nelineární B-H charakteristikou u kontrakční oceli a elektrotechnických plechů.



Obr. 3.1. B-H charakteristika elektrotechnických plechů [4]



Obr. 3.2 B-H charakteristika konstrukční oceli [4]

Budící proud při zatížení vypočtený v rovnici (1.90) respektive (2.27) bylo nutné přepočíst na budící proud naprázdno.

pro $\alpha = 0,65$



$$I_{b0} = \frac{F_{b0}}{F_b} \cdot I_b = \frac{10294}{20980} \cdot 51 = 25,02 \quad (A) \quad (3.1)$$

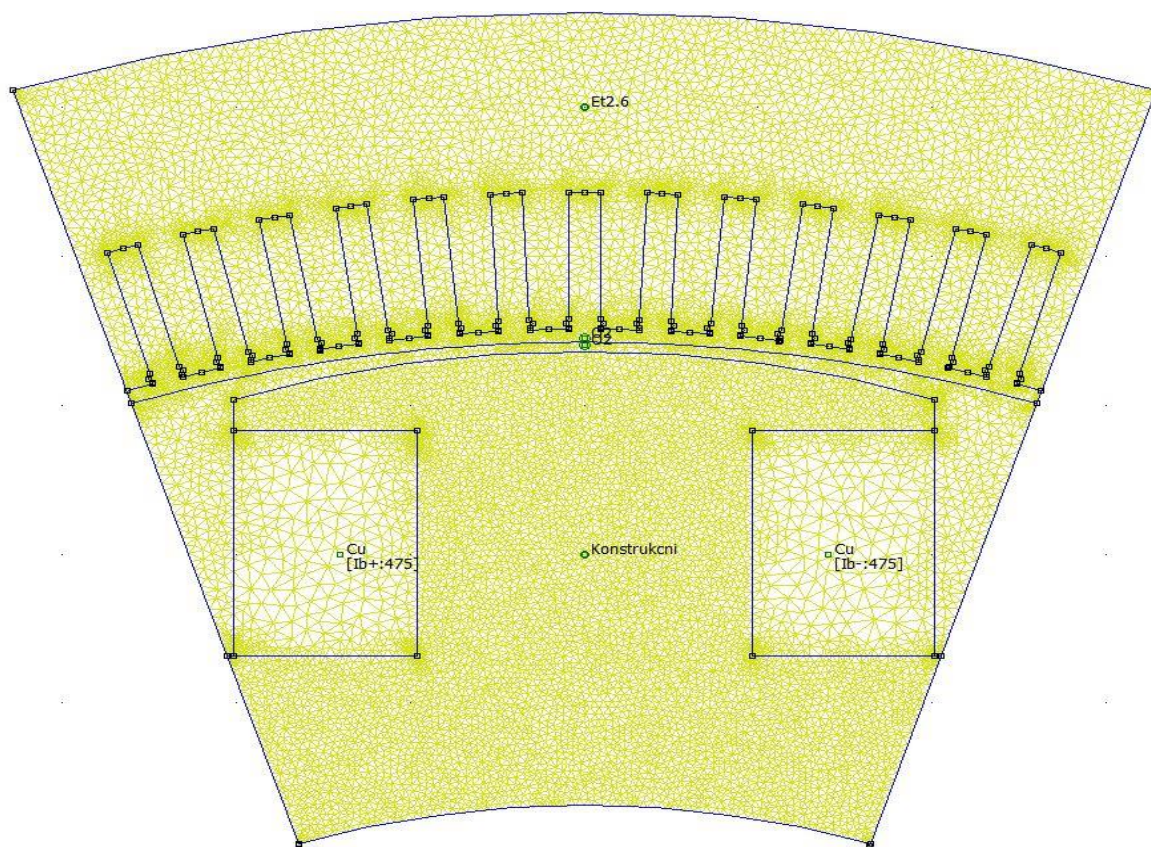
pro $\alpha = 0,75$

$$I_{b0} = \frac{F_{b0}}{F_b} = \frac{10294}{21120} \cdot I_b = 0,48.44 = 21,43 \quad (A) \quad (3.2)$$

kde:


F_{b0} – je hodnota ΣF při 100% ϕ z výsledné magnetické charakteristiky (obr. 1.6 a 2.2)

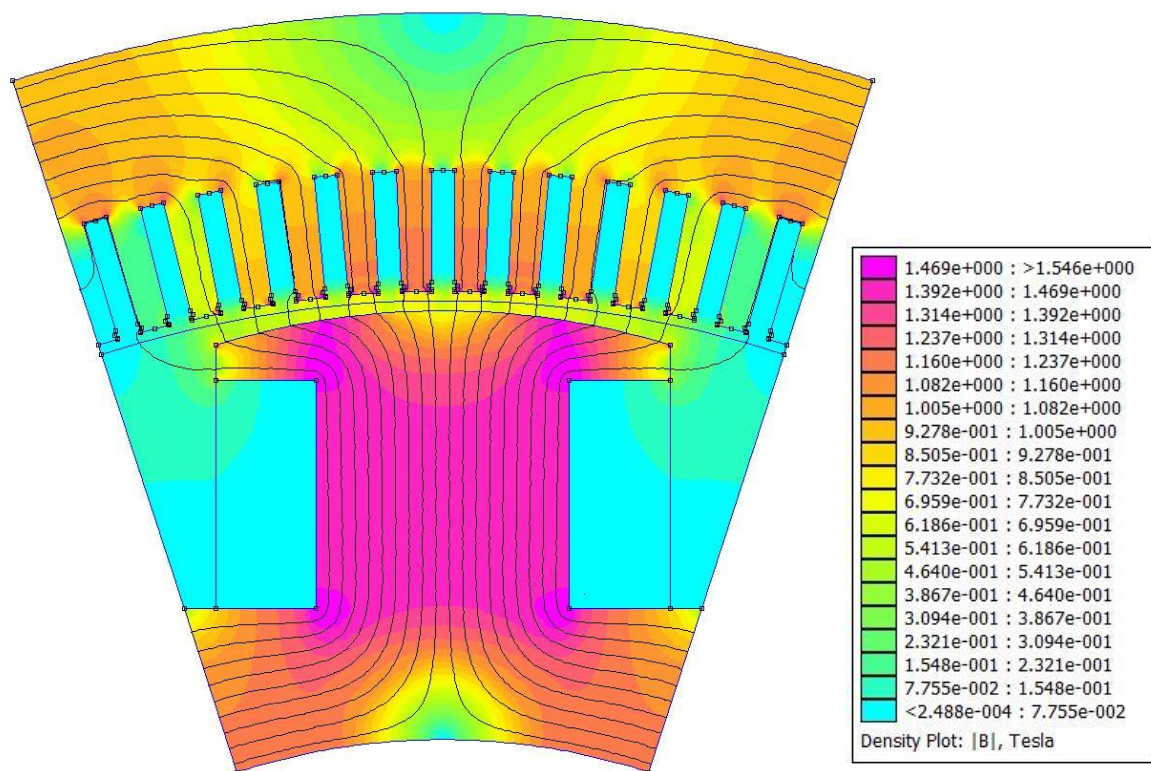
Po stisknutí ikony , byla v nákresu vytvořena síť konečných prvků. Tato síť nebyla pro výpočet dostatečně hustá a bylo nutné povést její zhuštění. Samotný výpočet je spuštěn stisknutím ikony .



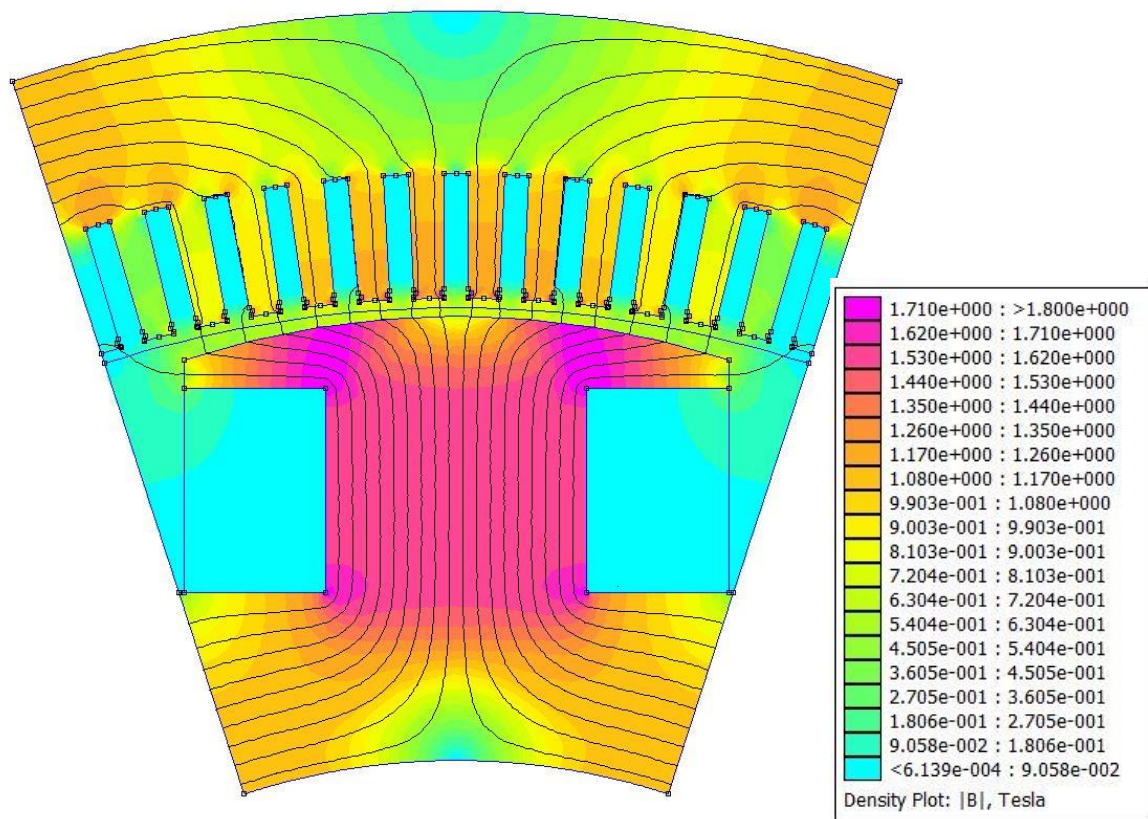
Obr. 3.3 Nákres stroje s vytvořenou sítí

3.3 Výsledky výpočtu

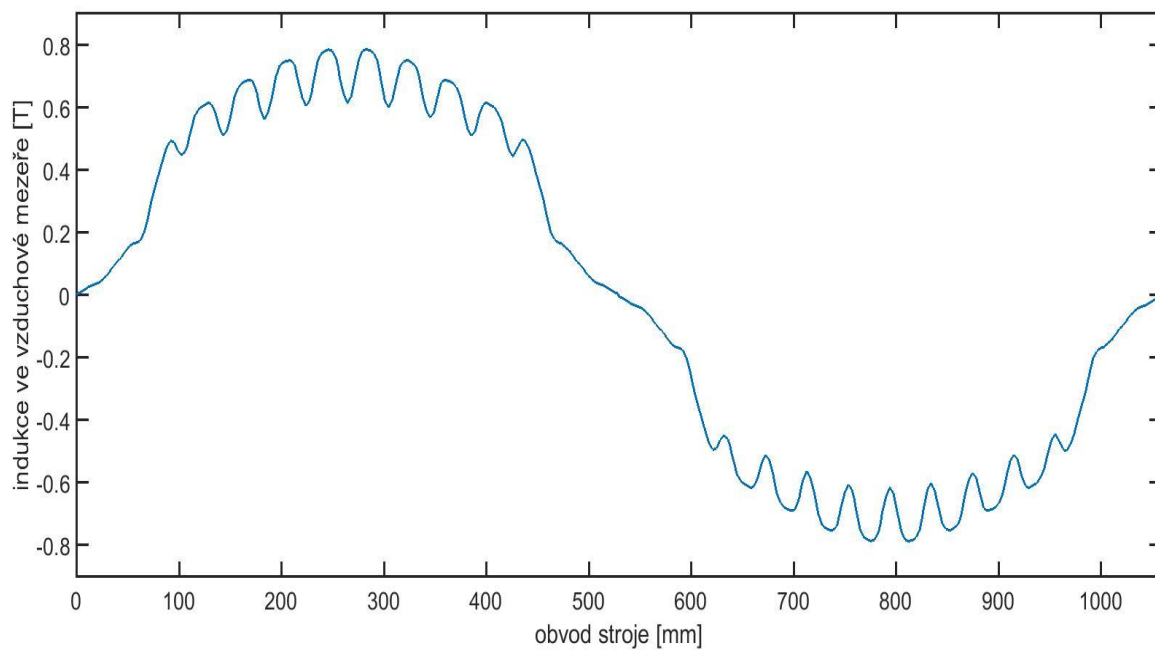
Výsledky výpočtu je možné prohlížet pomocí ikony . V nastavení lze pak zvolit parametry a veličiny, které budou zobrazeny, jako např. magnetický vektorový potenciál, magnetická indukce nebo intenzita magnetického pole. Zde byla zobrazena magnetická indukce v konstrukčních částech stroje a velikost magnetické indukce ve vzduchové mezeře na jedné pólové rozteči. Křivky magnetické indukce ve vzduchové mezeře se svým průběhem blíží sinusovému průběhu. Zvlnění průběhu je způsobené drážkováním statoru stroje.



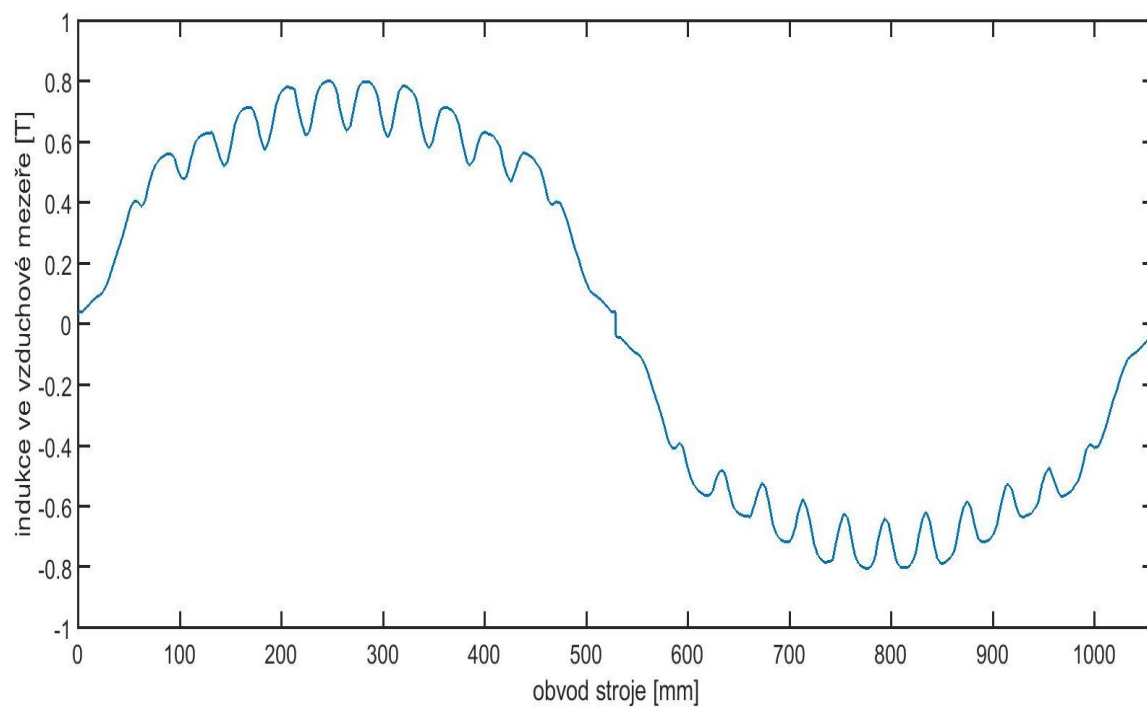
Obr. 3.4 Rozložení magnetické indukce ve stroji s $\alpha = 0,65$



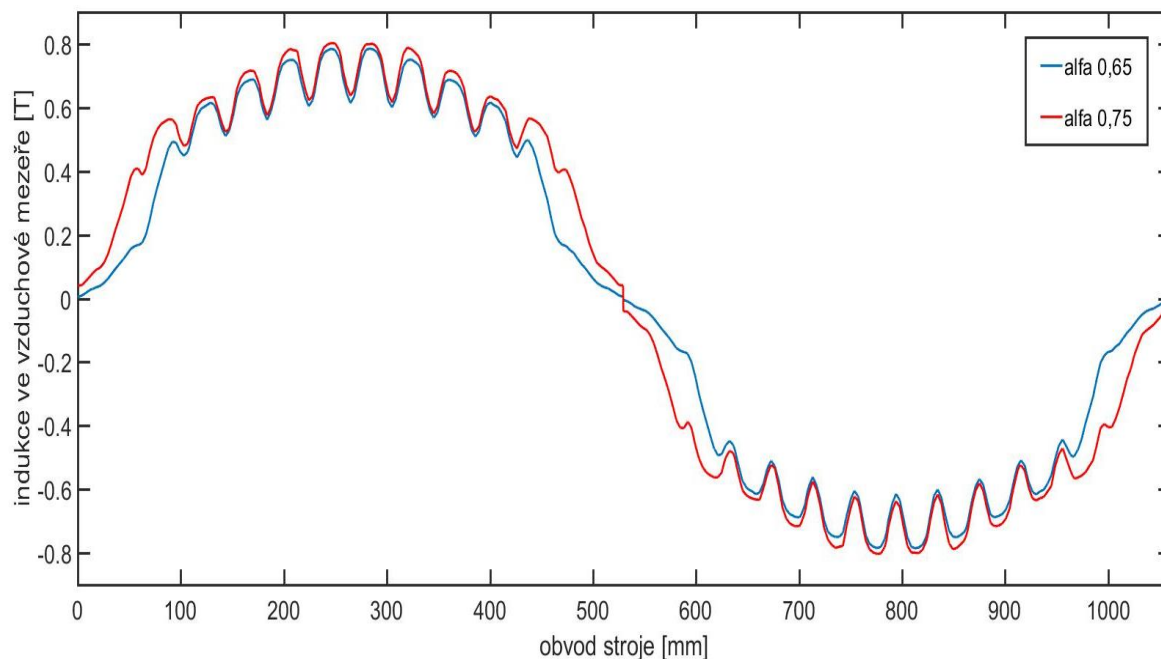
Obr. 3.5 Rozložení magnetické indukce ve stroji s $\alpha = 0,75$



Obr. 3.6 Indukce ve vzduchové mezeře $\alpha = 0,65$



Obr. 3.7 Indukce ve vzduchové mezeře $\alpha = 0,75$



Obr. 3.8 Porovnání průběhů indukce ve vzduchové mezeře

3.4 Analýza výsledků

Pro analýzu výsledků bylo nutné vypočtená data z programu FEMM exportovat. Data byla exportována do textového souboru .txt. Aby se s daty mohlo lépe pracovat, byl počet bodů popisující křivku magnetické indukce ve vzduchové mezeře zvolen jako 2^n , kde za n bylo zvoleno číslo 12, aby počet bodů byl dostatečný pro popis křivky, ale zároveň analýza dat dostatečně nenáročná na výkon PC. Analýza dat byla provedena v programu Matlab, kam byla data importována z textového souboru a křivka byla rozložena pomocí Fourierovy transformace na jednotlivé harmonické složky. Dále byla vypočtena střední hodnota magnetické indukce, činitel kvality napětí a velikost magnetického toku stroje.

a) Stroj s $\alpha = 0,65$

Amplituda 1. harmonické indukce ve vzduchové mezeře:

$$B_{\delta 0,65} = 0,7496 \quad (T)$$

Střední hodnota indukce ve vzduchové mezeře:

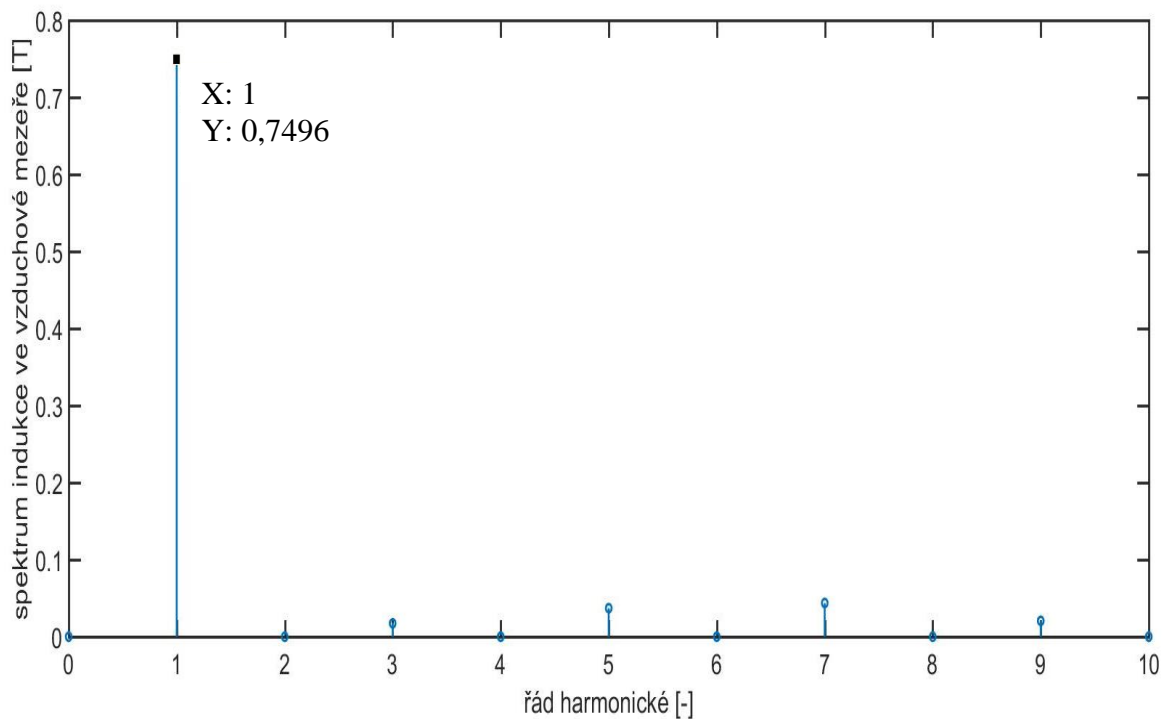
$$B_{\delta 0,65stř} = 0,4717 \quad (T)$$

Činitel pólového krytí:

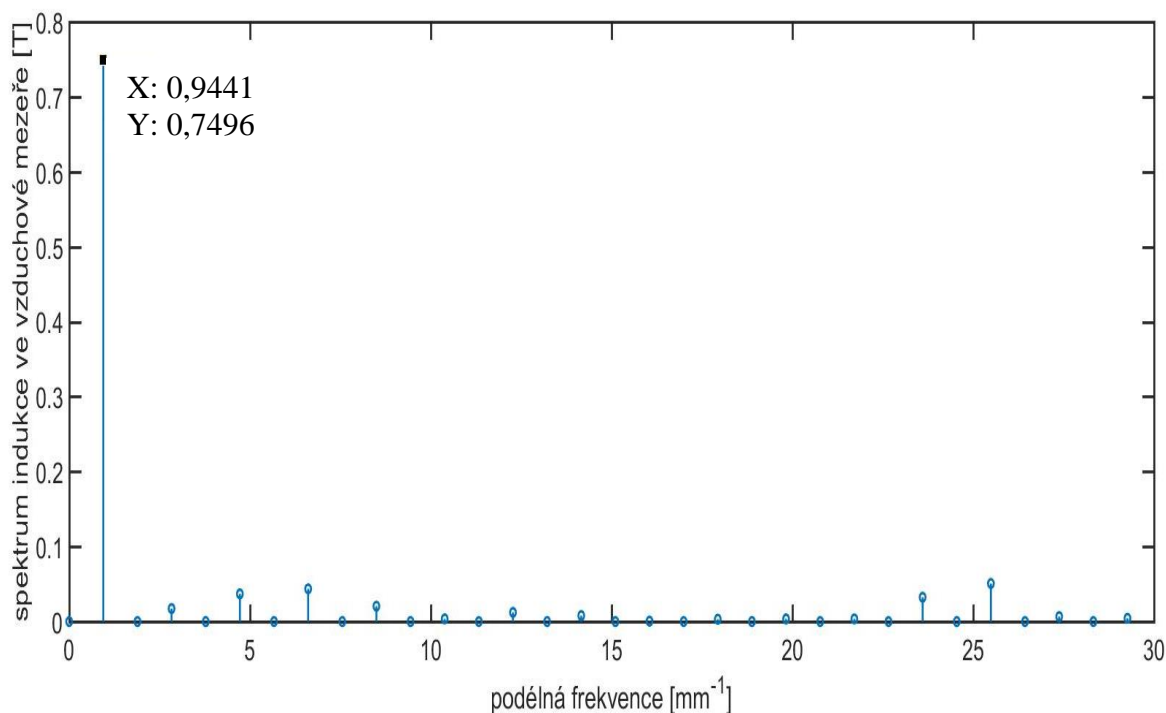
$$\alpha_{\delta 0,65} = \frac{B_{\delta 0,65stř}}{B_{\delta 0,65}} = \frac{0,4717}{0,7496} = 0,6293 \quad (3.3)$$

Magnetický tok:

$$\phi_{0,65} = \int_0^{t_p} B \cdot ds = 0,2498 \quad (Wb) \quad (3.4)$$



Obr. 3.9 Velikost jednotlivých harmonických indukcí ve vzduchové mezeře $\alpha = 0,65$



Obr. 3.10 Spektrum indukce ve vzduchové mezeře $\alpha = 0,65$

b) Stroj s $\alpha = 0,75$

Amplituda 1. harmonické indukce ve vzduchové mezeře:

$$B_{\delta 0,75} = 0,8013 \quad (T)$$

Střední hodnota indukce ve vzduchové mezeře:

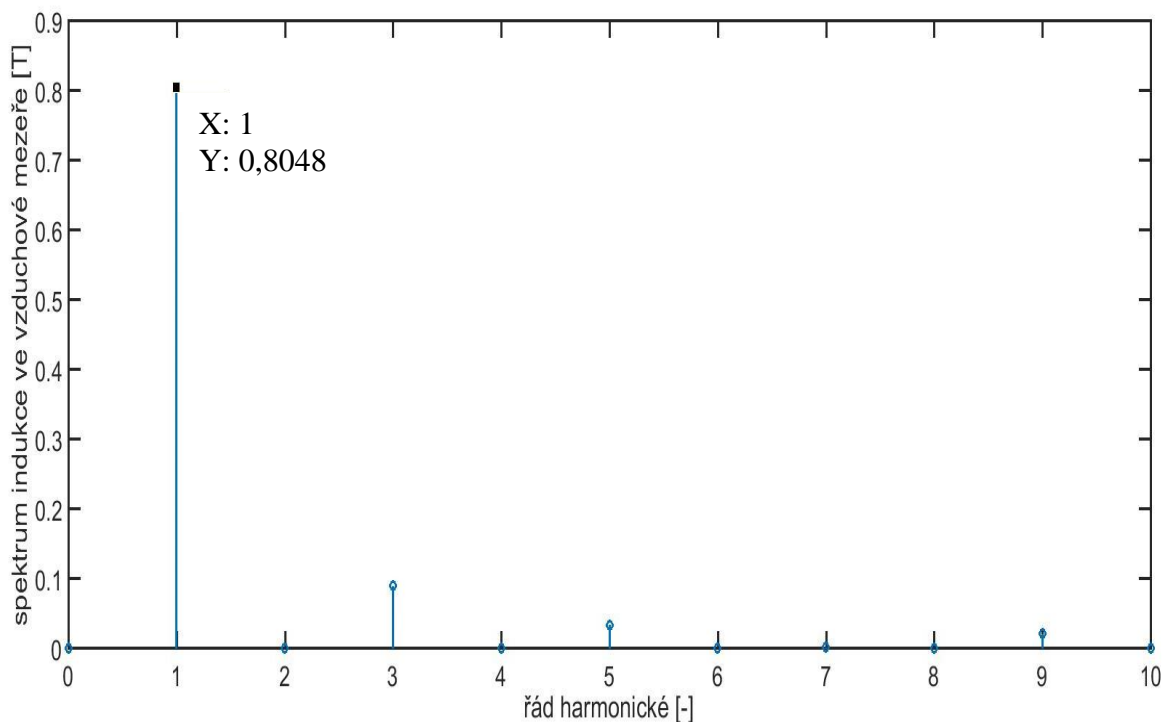
$$B_{\delta 0,75stř} = 0,5284 \quad (T)$$

Činitel pólového krytí:

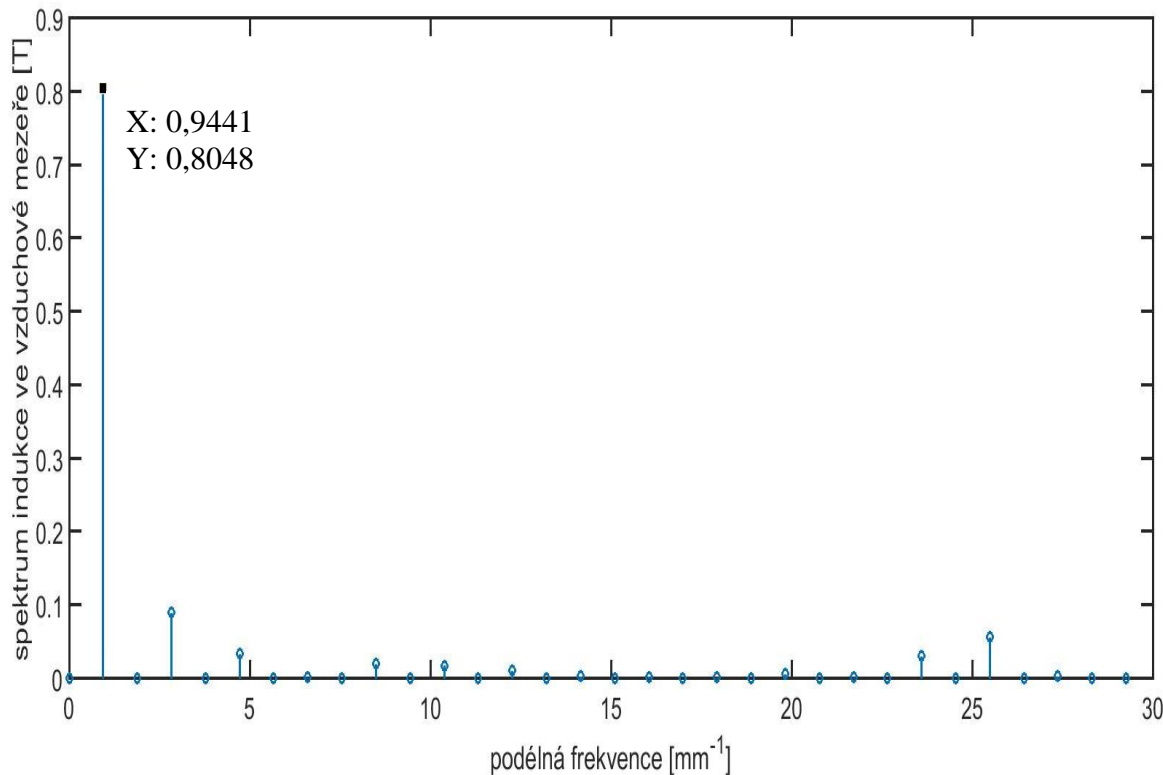
$$\alpha_{\delta 0,75} = \frac{B_{\delta 0,75stř}}{B_{\delta 0,75}} = \frac{0,5284}{0,8013} = 0,6594 \quad (3.5)$$

Magnetický tok:

$$\phi_{0,75} = \int_0^{t_p} B \cdot ds = 0,2797 \quad (Wb) \quad (3.6)$$



Obr. 3.11 Velikost jednotlivých harmonických indukcí ve vzduchové mezeře $\alpha = 0,75$



Obr. 3.12 Spektrum indukce ve vzduchové mezeře $\alpha = 0,75$

4. Stroj s $\alpha = 0,65$ se skutečným magnetickým tokem

Magnetický tok získaný ze simulace je vztažen na jednotku délky 1m. Proto je nutné ho vynásobit efektivní délkou stroje, abychom získali skutečný magnetický tok ve stroji. Indukce ve vzduchové mezeře je amplituda průběhu indukce získaného ze simulace.

Skutečný magnetický tok:

$$\phi = \phi_{0,65} \cdot l_e = 0,25 \cdot 0,68 = 0,17 \quad Wb \quad (4.1)$$

Počet závitů jedné fáze v sérii:

$$N_s = \frac{U}{4,44 \cdot \phi \cdot f \cdot k v_1} = \frac{3736}{4,44 \cdot 0,1750 \cdot 0,92} = 104,56 \quad (4.2)$$

Počet vodičů v drážce:

$$n_d = \frac{a_{stř} \cdot N_s}{p \cdot q} = \frac{2,71,1}{5 \cdot \frac{22}{5}} = 4,65 \quad (4.3)$$

Zvoleno $a_{stř} = 2$ (sériové vinutí) a $nd = 4$

Skutečný počet závitů jedné fáze v sérii:

$$N_s = \frac{n_d \cdot p \cdot q}{a_{stř}} = \frac{4 \cdot 5 \cdot \frac{22}{5}}{1} = 90 \quad (4.4)$$

Skutečná obvodová proudová hustota:

$$A = \frac{2 \cdot m \cdot I_1}{\pi \cdot D_1} N_s = \frac{2 \cdot 3 \cdot 596}{\pi \cdot 1,7} \cdot 90 = 60229 \quad (A/m) \quad (4.5)$$

4.1.1 Essonův činitel

Essonův činitel elektromagnetického využití stroje:

$$C = \frac{\pi^2}{60 \cdot \sqrt{2}} \cdot A \cdot B_{\delta} \cdot kv1 = \frac{\pi^2}{60 \cdot \sqrt{2}} \cdot 60229,079,092$$

$$= 5,11 \quad \left(\frac{kVA}{m^3 \cdot \frac{ot}{min}} \right) \quad (4.6)$$

Efektivní délka stroje:

$$l_e = \frac{S}{CD_1^2 n} = \frac{6\,500}{5,11 \cdot 1,7^2 \cdot 600} = 0,73 \quad (m) \quad (4.7)$$

Celková délka induktu (včetně radiálních kanálů):

$$L = l_e + \check{s}_k \cdot i_k = 1,03 + 0,01 \cdot 15 = 1,07 \quad (4.8)$$

4.2 Odpor a rozptylová reaktance statorového vinutí

Celkový odpor:

$$R_{1/75} = R_{1d/75} + R_{1\check{c}/75} = 0,04 + 0,02 = 0,06 \quad (\Omega) \quad (4.9)$$

Procentní hodnota úbytku napětí na ohmickém odporu:

$$u_R = \frac{R_{1/75} \cdot I_1}{U_f} \cdot 100 = \frac{0,06 \cdot 596}{3637} \cdot 100 = 1,03 \quad (\%) \quad (4.10)$$

Rozptylová reaktance:

$$\begin{aligned}
 X_{\sigma} &= \frac{(4 \cdot \pi)^2 \cdot f \cdot N_s^2}{p \cdot q} \cdot l_e \cdot \left[\left(\frac{h'_2}{3 \cdot b_d} + \frac{h'_1}{b_d} \right) + \frac{l_{\zeta}}{l_e} \cdot q \left(0,187 + 0,166 \cdot \frac{t_p}{l_{\zeta}} \cdot \beta \right) \right. \\
 &\quad \left. + \ln \left(1 + \frac{\pi \cdot z_1}{2 \cdot b_d} \right) \right] \cdot 10^{-7} \\
 &= \frac{(4 \cdot \pi)^2 \cdot 50 \cdot 90^2}{5,4,5} \cdot 0,73 \cdot \left[\left(\frac{0,05836}{3,0,018} + \frac{0,00782}{0,018} \right) \right. \\
 &\quad \left. + \frac{0,76}{0,73} \cdot 4,5 \left(0,187 + 0,166 \cdot \frac{0,53}{0,76} \cdot 0,83 \right) \right. \\
 &\quad \left. + \ln \left(1 + \frac{\pi \cdot 0,02246}{2,0,018} \right) \right] \cdot 10^{-7} = 0,82 \quad (\Omega)
 \end{aligned} \tag{4.11}$$

Procentní hodnota úbytku napětí na rozptylové reaktanci:

$$x_{\sigma} = \frac{X_{\sigma} \cdot I_1}{U_f} \cdot 100 = \frac{0,82 \cdot 596}{3637} \cdot 100 = 13,41 \quad (\%) \tag{4.12}$$

4.3 Návrh magnetického obvodu

Vzduchová mezera:

$$\begin{aligned}
 \delta &= k \cdot \frac{A \cdot t_p}{B_{\delta}} \cdot \frac{10^{-6}}{x_d - x_{\sigma}} = 45 \cdot \frac{60229,053}{0,79} \cdot \frac{10^{-6}}{127 - 13,41} \\
 &= 0,016 \quad (m)
 \end{aligned} \tag{4.13}$$

4.3.1 Magnetické napětí reakce kotvy

Amplituda základní harmonické reakce kotvy:

$$\begin{aligned}
 F_a &= \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{1}{C_1} \cdot A \cdot t_p \cdot k_{v1} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{1}{1,04} \cdot 60229,053 \cdot 0,92 \\
 &= 12844 \quad (A)
 \end{aligned} \tag{4.14}$$

Amplituda základní harmonické napětí v podélném směru:

$$F_{d1} = C_{d1} \cdot F_a = 0,88 \cdot 12844 = 11303 \quad (A) \quad (4.15)$$

kde:

$$C_{d1} = e \cdot f = 0,82 \cdot 1,08 = 0,88 \quad (-) \quad (4.16)$$

Koeficienty e a f jsou odečteny z přílohy I.

Amplituda základní harmonické napětí v příčném směru:

$$F_{q1} = C_{q1} \cdot F_a = 0,43 \cdot 12844 = 5523 \quad (A) \quad (4.17)$$

kde:

$$C_{q1} = g \cdot h = 142 \cdot 0,3 = 0,43 \quad (-) \quad (4.18)$$

Koeficienty g a h jsou odečteny z přílohy I.

Výše uvedené vztahy jsou vypočítané pro:

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

$$\frac{\delta}{t_p} = \frac{0,016}{0,530} = 0,03 \quad (-)$$

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

4.3.2 Dimenzování magnetického obvodu**Výška pólu:**

$$h_p = 0,3 \cdot t_p = 0,3 \cdot 0,530 = 0,160 \quad (m) \quad (4.19)$$

Výška nástavce:

$$h_n = 0,1 \cdot t_p = 0,1 \cdot 0,53 = 0,053 \quad (m) \quad (4.20)$$

Šířka pólu:

$$b_p = \frac{(1 + \nu) \cdot \phi}{B_p \cdot L_p} = \frac{(1 + 0,15) \cdot 0,17}{1,45 \cdot 0,87} = 0,154 \quad (m) \quad (4.21)$$

Šířka pólového nástavce:

$$b_n = \alpha \cdot t_p = 0,65 \cdot 0,53 = 0,347 \quad (m) \quad (4.22)$$

Výška jha rotoru:

$$h_{jr} = \frac{(1 + \nu) \cdot \phi}{2 \cdot B_{jr} \cdot L_r} = \frac{(1 + 0,15) \cdot 0,17}{2 \cdot 1,1 \cdot 0,7} = 0,08 \quad (m) \quad (4.23)$$

Výška jádra induktu:

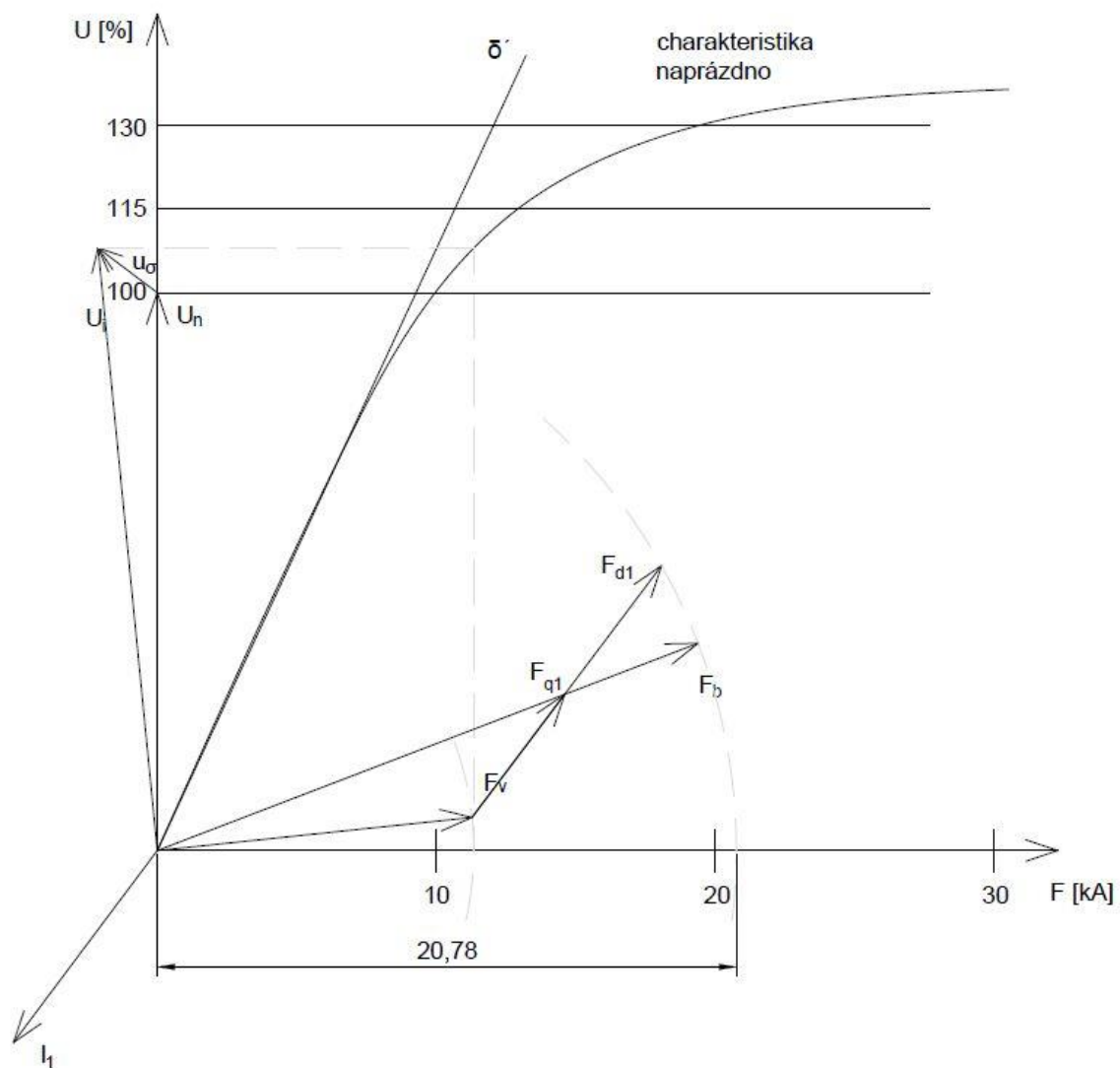
$$h_{js} = \frac{\phi}{2 \cdot B_{js} \cdot k_{Fe} \cdot l_e} = \frac{0,17}{2 \cdot 1,3 \cdot 0,92 \cdot 0,73} = 0,1 \quad (m) \quad (4.24)$$

4.3.3 Charakteristika naprázdno

Charakteristika výsledná:

		Φ			$k_1 \cdot \Phi$			$k_2 \cdot \Phi$				
		B	H	F	B	H	F	B	H	F		
Vzd. mezera	$\delta = 0,016 \text{ m}$	0,79		9283			10675			12068		
Zubová vrstva	Hlava	$k_{z1} = 0,96$	B'_{z1}	1,55	2000		1,78	8000		2,01	21100	
			B_{z1}	1,53			1,73			1,93		
	Střed	$k_{z2} = 0,88$	B'_{z2}	1,49	1650		1,71	6000		1,93	14000	
			B_{z2}	1,48			1,68			1,85		
	Pata	$k_{z3} = 0,82$	B'_{z3}	1,43	1100		1,65	3800		1,86	11050	
			B_{z3}	1,43			1,62			1,80		
	Střední hodnota	h_z	0,092		1617	149		5967	549		14692	1352
	Jádro statoru	l_s	0,326	1,3	650	212	1,50	1600	522	1,69	6000	1958
$\Sigma F = F_\delta + F_z + F_s = F\sigma$					9644			11746			15377	
Pól	l_p	0,214	1,45	1200	256	1,67	5000	1068	1,89	18000	3845	
Jho rotoru	l_r	0,195	1,1	360	70	1,27	600	117	1,43	1150	224	
$\Sigma F = F_p + F_r$					327			1185			4069	
$\Sigma F = F_\delta + F_z + F_s + F_p + F_r$					9970			12932			19447	

Tab. 4.1 Charakteristika výsledná



Obr. 4.1 Charakteristika naprázdno pro $\alpha = 0,65$

Budící magnetické napětí

Z charakteristiky naprázdno je grafickou metodou určeno magnetické napětí

$$F_b = 20\,780 \quad (A) \quad (4.25)$$

4.4 Návrh budícího vinutí:

4.4.1 Budící cívka

Přesahující část pólového nástavce:

$$a = \frac{b_n - b_p}{2} = \frac{0,347 - 0,154}{2} = 0,097 \quad (m) \quad (4.26)$$

Střední délka závitů cívky:

$$\begin{aligned} l_{bs} &= 2 \cdot (L_p + b_p + 2 \cdot a) = 2 \cdot (0,87 + 0,154 + 2 \cdot 0,097) \\ &= 2,25 \quad (m) \end{aligned} \quad (4.27)$$

Průřez vodiče budící cívky:

$$\begin{aligned} S'_{cub} &= \frac{\rho_{Cu} \cdot l_{bs} \cdot 2p \cdot F_b}{0,9U_b} = \frac{\frac{1}{56} \cdot 2,25 \cdot 10 \cdot 20780}{0,9 \cdot 400} \\ &= 23,2 \quad (mm^2) \end{aligned} \quad (4.28)$$

Budící napětí U_b bylo zvoleno s ohledem na rozměry pásových vodičů.

Zvolen rozměr holého ($b_v \times h_v$)/izolovaného ($b_{vi} \times h_{vi}$) vodiče 10x2,5/10,5x3 mm.

Skutečný průřez vodiče budící cívky:

$$S_{Cub} = 24,5 \quad (mm^2) \quad (4.29)$$

Odečteno viz příloha C.

Předběžně zvolená proudová hustota

$$\sigma_{Cub} = 1,9 \text{ A/mm}^2 \quad (4.30)$$

Budící proud:

$$I_b = \sigma_{Cub} \cdot S_{Cub} = 1,9.23,4 = 44 \quad (A) \quad (4.31)$$

Počet závitů budící cívky:

$$N_b = \frac{F_b}{I_b} = \frac{20780}{41} = 467 \quad (-) \quad (4.32)$$

Počet poloh cívky:

$$n'_p = \frac{a - t_k}{h_{vi}} = \frac{0,097 - 2}{12,5} = 8 \quad (-) \quad (4.33)$$

Tloušťka kostřičky t_k je zvolena s ohledem na chlazení budící cívky.

Tloušťka cívky:

$$b_c = h_{vi} \cdot n'_p = 12,5 \cdot 8 = 100 \quad (-) \quad (4.34)$$

Počet závitů v jedné poloze:

$$N'_{p1} = \frac{N_b}{n'_p} = \frac{467}{8} = 58 \quad (-) \quad (4.35)$$

Výška cívky:

$$h_c = N'_{p1} \cdot (b_v + t_i) = 58 \cdot (2 + 0,5) = 145 \quad (mm) \quad (4.36)$$

Výška pólu:

$$h_p = h_c + 2 \cdot t_k = 145 + 2 \cdot 2 = 149 \quad (mm) \quad (4.37)$$

4.4.2 Orientační výpočet oteplení budící cívký

Vnější obvod budící cívký:

$$\begin{aligned} l_{be} &= 2 \cdot (L_p + b_p + 4 \cdot a) = 2 \cdot (0,87 + 0,154 + 4 \cdot 0,097) \\ &= 2,88 \quad (m) \end{aligned} \quad (4.38)$$

Střední obvod budící cívký:

$$\begin{aligned} l_{bs} &= 2 \cdot \left[L_p + b_p + 4 \cdot \left(t_k + \frac{b_c}{2} \right) \right] \\ &= 2 \cdot \left[0,87 + 0,154 + 4 \cdot \left(0,002 + \frac{100}{2} \right) \right] \\ &= 2,47 \quad (m) \end{aligned} \quad (4.39)$$

Ochlazovací povrch všech cívek:

$$Q_{2pc} = h_c \cdot l_{bs} \cdot 2p = 0,145 \cdot 2,47 \cdot 10 = 3,59 \quad (m^2) \quad (4.40)$$

Odpor všech cívek budícího vinutí:

$$\begin{aligned} R_{Cub} &= 1,22 \cdot \rho \cdot \frac{l_{bs} \cdot N_b \cdot 2p}{S_{Cub}} = 1,22 \cdot \frac{1}{56} \cdot \frac{2,47 \cdot 467 \cdot 10}{23,4} \\ &= 10,76 \quad (\Omega) \end{aligned} \quad (4.41)$$

Ztráty v budícím vinutí:

$$\Delta P_{Cub} = R_{b/75} \cdot I_b^2 = 10,76 \cdot 44^2 = 21269 \quad (W) \quad (4.42)$$

Oteplení cívký:

$$\Delta \vartheta_{Cub} = \frac{1,18 \cdot \Delta P_{Cub}}{\alpha \cdot Q_{2pc}} = \frac{1,18 \cdot 21269}{85,359} = 82 \quad (^\circ C) \quad (4.43)$$

Vyhovuje pro použití izolace třídy B.

4.5 Ztráty a účinnost

Povrchové ztráty

$$\begin{aligned} \Delta P_p &= \frac{\pi}{2} \cdot D_1 \cdot \alpha \cdot L_p \cdot k_0 \cdot \left(\frac{Q \cdot n}{10000} \right) \cdot (t_{d1} \cdot \beta \cdot 1000 \cdot B_\delta \cdot k_{cd})^2 \\ &= \frac{\pi}{2} \cdot 1,7 \cdot 0,65 \cdot 0,87 \cdot 2,8 \cdot \left(\frac{132,600}{10000} \right) \cdot (0,04046 \cdot 0,06 \cdot 1000 \cdot 0,79 \cdot 1,08)^2 \\ &= 406 \quad (W) \end{aligned} \quad (4.44)$$

kde:

k_0, β – činitelé povrchových ztrát v pólovém nástavci viz příloha J

Celkové ztráty

$$\begin{aligned} \Delta P &= \Delta P_{Cu1} + \Delta P_{Cub} + \Delta P_{Fej} + \Delta P_{Fez} + \Delta P_p + \Delta P_m + \Delta P_{př} \\ &= 67223 + 21269 + 17363 + 12437 + 406 \\ &\quad + 30365 + 19500 = 168562 \quad (W) \end{aligned} \quad (4.45)$$

Účinnost

$$\begin{aligned} \eta &= \left(\frac{P}{P + \Delta P} \right) \cdot 100 = \left(\frac{5200 \cdot 10^3}{5200 \cdot 10^3 + 168562} \right) \cdot 100 \\ &= 96,86 \quad (\%) \end{aligned} \quad (4.46)$$

4.6 Hmotnost pólů

Hmotnost pólů:

$$\begin{aligned} m_p &= \rho_{Fe} \cdot h_p \cdot b_p \cdot L_p = 7800 \cdot 0,149 \cdot 0,154 \cdot 0,87 \\ &= 157 \quad (kg) \end{aligned} \quad (4.47)$$

Hmotnost pólového nástavce:

$$\begin{aligned} m_n &= \rho_{Fe} \cdot h'_n \cdot b_n \cdot L_n = 7800 \cdot 0,044 \cdot 0,347 \cdot 1,07 \\ &= 127 \quad (kg) \end{aligned} \quad (4.48)$$

Hmotnost cívky:

$$\begin{aligned} m_{Cub} &= \rho_{Cu} \cdot S_{Cub} \cdot l_{bs} \cdot N_b = 8900 \cdot 23,4 \cdot 10^{-6} \cdot 2,47 \cdot 467 \\ &= 241 \quad (kg) \end{aligned} \quad (4.49)$$

5. Stroj s $\alpha = 0,75$ se skutečným magnetickým tokem

Skutečný magnetický tok:

$$\phi = \phi_{0,75} \cdot l_e = 0,28 \cdot 0,68 = 0,19 \quad Wb \quad (5.1)$$

Počet závitů jedné fáze v sérii:

$$N_s = \frac{U}{4,44 \cdot \phi \cdot f \cdot kv_1} = \frac{3736}{4,44 \cdot 0,19 \cdot 50 \cdot 0,92} = 93,38 \quad (5.2)$$

Počet vodičů v drážce:

$$n_d = \frac{a_{stř} \cdot N_s}{p \cdot q} = \frac{1 \cdot 93,38}{5 \cdot \frac{22}{5}} = 4,15 \quad (5.3)$$

Zvoleno $a_{stř} = 1$ (sériové vinutí) a $nd = 4$

Skutečný počet závitů jedné fáze v sérii:

$$N_s = \frac{n_d \cdot p \cdot q}{a_{stř}} = \frac{4 \cdot 5 \cdot \frac{22}{5}}{1} = 90 \quad (5.4)$$

Skutečná obvodová proudová hustota:

$$A = \frac{2 \cdot m \cdot I_1}{\pi \cdot D_1} N_s = \frac{2 \cdot 3 \cdot 596}{\pi \cdot 1,7} \cdot 90 = 60229 \quad (A/m) \quad (5.5)$$

5.1.1 Essonův činitel

Essonův činitel elektromagnetického využití stroje:

$$C = \frac{\pi^2}{60 \cdot \sqrt{2}} \cdot A \cdot B_\delta \cdot kv_1 = \frac{\pi^2}{60 \cdot \sqrt{2}} \cdot 60229 \cdot 0,8 \cdot 0,92$$

$$= 5,18 \quad \left(\frac{kVA}{m^3 \cdot \frac{ot}{min}} \right) \quad (5.6)$$

Efektivní délka stroje:

$$l_e = \frac{S}{CD_1^2 n} = \frac{6\,500}{5,18 \cdot 1,7^2 \cdot 600} = 0,72 \quad (m) \quad (5.7)$$

Celková délka induktu (včetně radiálních kanálů):

$$L = l_e + \check{s}_k \cdot i_k = 0,72 + 0,01 \cdot 13 = 0,86 \quad (5.8)$$

5.2 Odpor a rozptylová reaktance statorového vinutí

Celkový odpor:

$$R_{1/75} = R_{1d/75} + R_{1\check{c}/75} = 0,04 + 0,02 = 0,06 \quad (\Omega) \quad (5.9)$$

Procentní hodnota úbytku napětí na ohmickém odporu:

$$u_R = \frac{R_{1/75} \cdot I_1}{U_f} \cdot 100 = \frac{0,06 \cdot 596}{3637} \cdot 100 = 1,02 \quad (\%) \quad (5.10)$$

5.2.1 Rozptylová reaktance statorového vinutí

Rozptylová reaktance:

$$\begin{aligned} X_\sigma &= \frac{(4 \cdot \pi)^2 \cdot f \cdot N_s^2}{p \cdot q} \cdot l_e \cdot \left[\left(\frac{h'_2}{3 \cdot b_d} + \frac{h'_1}{b_d} \right) + \frac{l_{\check{c}}}{l_e} \cdot q \left(0,187 + 0,166 \cdot \frac{t_p}{l_{\check{c}}} \cdot \beta \right) \right. \\ &\quad \left. + \ln \left(1 + \frac{\pi \cdot z_1}{2 \cdot b_d} \right) \right] \cdot 10^{-7} \\ &= \frac{(4 \cdot \pi)^2 \cdot 50 \cdot 90^2}{5 \cdot 4,5} \cdot 0,72 \cdot \left[\left(\frac{0,05836}{3 \cdot 0,018} + \frac{0,00782}{0,018} \right) \right. \\ &\quad \left. + \frac{0,76}{0,72} \cdot 4,5 \left(0,187 + 0,166 \cdot \frac{0,53}{0,76} \cdot 0,83 \right) \right. \\ &\quad \left. + \ln \left(1 + \frac{\pi \cdot 0,02246}{2 \cdot 0,018} \right) \right] \cdot 10^{-7} = 0,81 \quad (\Omega) \end{aligned} \quad (5.11)$$

Procentní hodnota úbytku napětí na rozptylové reaktanci:

$$x_{\sigma} = \frac{X_{\sigma} \cdot I_1}{U_f} \cdot 100 = \frac{0,81.596}{3637} \cdot 100 = 13,29 \quad (\%) \quad (5.12)$$

5.3 Návrh magnetického obvodu

Vzduchová mezera:

$$\begin{aligned} \delta &= k \cdot \frac{A \cdot t_p}{B_{\delta}} \cdot \frac{10^{-6}}{x_d - x_{\sigma}} = 45 \cdot \frac{60229,0,53}{0,8} \cdot \frac{10^{-6}}{127 - 13,29} \\ &= 0,016 \quad (m) \end{aligned} \quad (5.13)$$

5.3.1 Magnetické napětí reakce kotvy

Amplituda základní harmonické reakce kotvy:

$$\begin{aligned} F_a &= \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{1}{C_1} \cdot A \cdot t_p \cdot k_{v1} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{1}{1,01} \cdot 60229,0,53 \cdot 0,92 \\ &= 12034 \quad (A) \end{aligned} \quad (5.14)$$

Amplituda základní harmonické napětí v podélném směru:

$$F_{d1} = C_{d1} \cdot F_a = 0,91 \cdot 12034 = 10951 \quad (A) \quad (5.15)$$

kde:

$$C_{d1} = e \cdot f = 0,81 \cdot 1,12 = 0,91 \quad (-) \quad (5.16)$$

Koeficienty e a f jsou odečteny z přílohy I.

Amplituda základní harmonické napětí v příčném směru:

$$F_{q1} = C_{q1} \cdot F_a = 0,52 \cdot 12034 = 6258 \quad (A) \quad (5.17)$$

kde:

$$C_{q1} = g \cdot h = 1,74 \cdot 0,3 = 0,52 \quad (-) \quad (5.18)$$

Koeficienty g a h jsou odečteny z přílohy I.

Výše uvedené vztahy jsou vypočítané pro:

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

$$\frac{\delta}{t_p} = \frac{0,016}{0,530} = 0,03 \quad (-)$$

$$\alpha = 0,75 \quad (-)$$

5.3.2 Dimenzování magnetického obvodu

Výška pólu:

$$h_p = 0,3 \cdot t_p = 0,3 \cdot 0,530 = 0,160 \quad (m) \quad (5.19)$$

Výška nástavce:

$$h_n = 0,1 \cdot t_p = 0,1 \cdot 0,53 = 0,053 \quad (m) \quad (5.20)$$

Šířka pólu:

$$b_p = \frac{(1 + \nu) \cdot \phi}{B_p \cdot L_p} = \frac{(1 + 0,15) \cdot 0,19}{1,45 \cdot 0,86} = 0,176 \quad (m) \quad (5.21)$$

Šířka pólového nástavce:

$$b_n = \alpha \cdot t_p = 0,75 \cdot 0,53 = 0,401 \quad (m) \quad (5.22)$$

Výška jha rotoru:

$$h_{jr} = \frac{(1 + \nu) \cdot \phi}{2 \cdot B_{jr} \cdot L_r} = \frac{(1 + 0,15) \cdot 0,19}{2 \cdot 1,1 \cdot 1,06} = 0,09 \quad (m) \quad (5.23)$$

Výška jádra induktu:

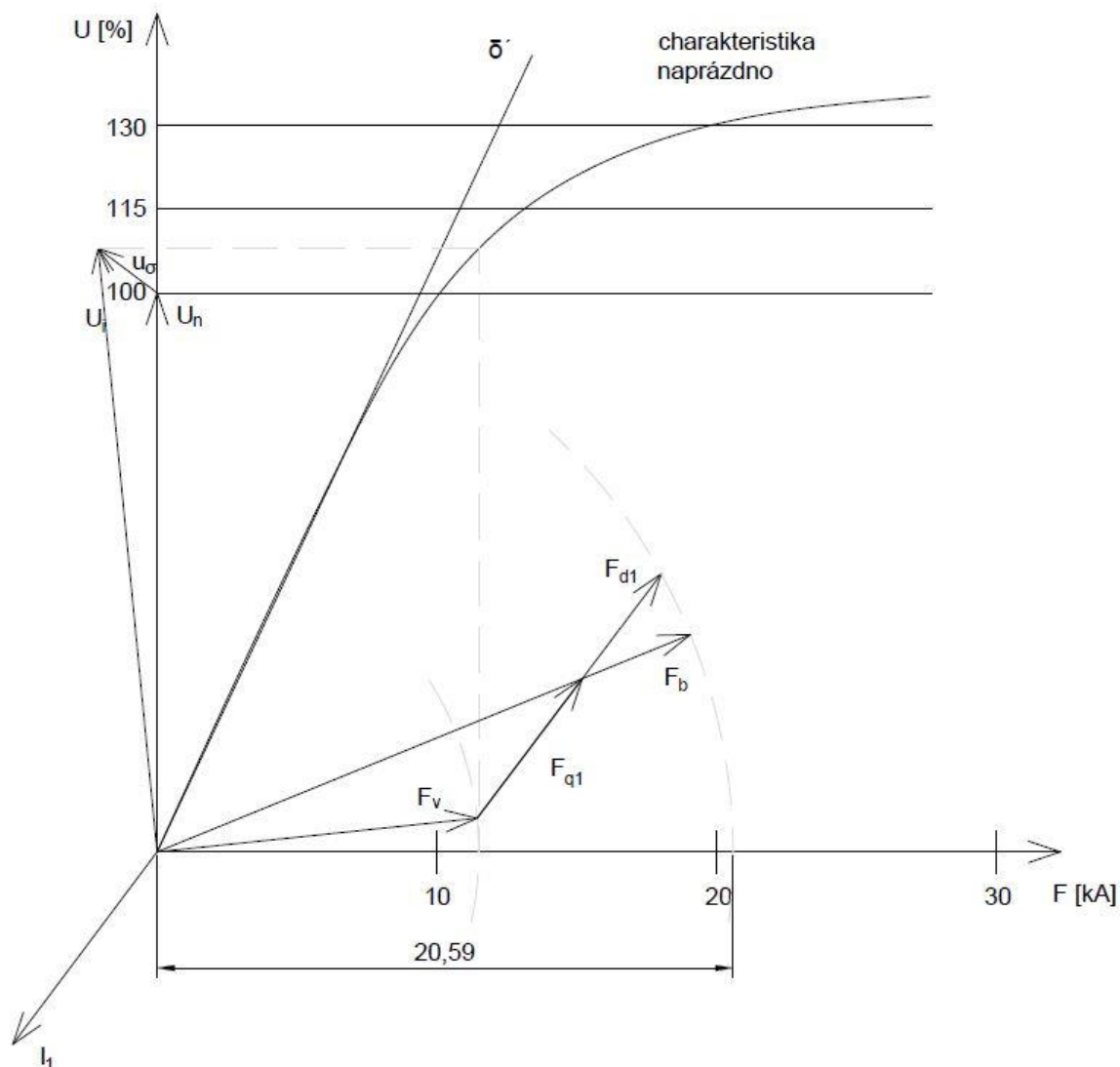
$$h_{js} = \frac{\phi}{2 \cdot B_{js} \cdot k_{Fe} \cdot l_e} = \frac{0,19}{2 \cdot 1,3 \cdot 0,92 \cdot 0,72} = 0,11 \quad (m) \quad (5.24)$$

5.3.3 Charakteristika naprázdno

Charakteristika výsledná:

		Φ			$k_1 \cdot \Phi$			$k_2 \cdot \Phi$				
		B	H	F	B	H	F	B	H	F		
Vzd. mezera	$\delta = 0,016 \text{ m}$	0,80		9416			10828			12241		
Zubová vrstva	Hlava	$k_{z1} = 0,96$	B'_{z1}	1,57	3000		1,80	9000		2,04	22000	
			B_{z1}	1,56			1,75			1,94		
	Střed	$k_{z2} = 0,88$	B'_{z2}	1,51	1600		1,73	6000		1,96	16000	
			B_{z2}	1,50			1,69			1,88		
	Pata	$k_{z3} = 0,82$	B'_{z3}	1,46	1150		1,67	5000		1,89	14000	
			B_{z3}	1,45			1,65			1,83		
	Střední hodnota	h_z	0,092		1758	162		6333	583		16667	1533
	Jádro statoru	l_s	0,330	1,3	650	215	1,50	1600	529	1,69	6000	1983
$\Sigma F = F_\delta + F_z + F_s = F\sigma$				9793			11940			15757		
Pól	l_p	0,214	1,45	1200	256	1,67	5000	1068	1,89	18000	3845	
Jho rotoru	l_r	0,195	1,1	360	70	1,27	600	117	1,43	1150	224	
$\Sigma F = F_p + F_r$				327			1185			4069		
$\Sigma F = F_\delta + F_z + F_s + F_p + F_r$				10119			13125			19826		

Tab. 5.1 Charakteristika výsledná



Obr. 5.1 Charakteristika naprázdno pro $\alpha = 0,75$

Budící magnetické napětí

Z charakteristiky naprázdno je grafickou metodou určeno magnetické napětí

$$F_b = 20590 \quad (A) \quad (5.25)$$

5.4 Návrh budícího vinutí:

5.4.1 Budící cívka

Přesahující část pólového nástavce:

$$a = \frac{b_n - b_p}{2} = \frac{0,401 - 0,176}{2} = 0,112 \quad (m) \quad (5.26)$$

Střední délka závitu cívky:

$$\begin{aligned} l_{bs} &= 2 \cdot (L_p + b_p + 2 \cdot a) = 2 \cdot (0,86 + 0,176 + 2 \cdot 0,114) \\ &= 2,29 \quad (m) \end{aligned} \quad (5.27)$$

Průřez vodiče budící cívky:

$$\begin{aligned} S'_{cub} &= \frac{\rho_{Cu} \cdot l_{bs} \cdot 2p \cdot F_b}{0,9U_b} = \frac{1}{56} \cdot \frac{2,29 \cdot 10 \cdot 20590}{0,9 \cdot 400} \\ &= 23,42 \quad (mm^2) \end{aligned} \quad (5.28)$$

Budící napětí U_b bylo zvoleno s ohledem na rozměry pásových vodičů.

Zvolen rozměr holého ($b_v \times h_v$)/izolovaného ($b_{vi} \times h_{vi}$) vodiče 12x2/12,5x2,5 mm.

Skutečný průřez vodiče budící cívky:

$$S_{Cub} = 23,4 \quad (mm^2) \quad (5.29)$$

Odečteno viz příloha C.

Předběžně zvolená proudová hustota

$$\sigma_{Cub} = 1,9 \text{ A/mm}^2 \quad (5.30)$$

Budící proud:

$$I_b = \sigma_{Cub} \cdot S_{Cub} = 1,9.23,4 = 44 \quad (A) \quad (5.31)$$

Počet závitů budící cívky:

$$N_b = \frac{F_b}{I_b} = \frac{20590}{44} = 463 \quad (-) \quad (5.32)$$

Počet poloh cívky:

$$n'_p = \frac{a - t_k}{h_{vi}} = \frac{0,112 - 2}{12,5} = 8 \quad (-) \quad (5.33)$$

Tloušťka kostřičky t_k je zvolena s ohledem na chlazení budící cívky.

Tloušťka cívky:

$$b_c = h_{vi} \cdot n_p = 12,5 \cdot 8 = 100 \quad (-) \quad (5.34)$$

Počet závitů v jedné poloze:

$$N'_{p1} = \frac{N_b}{n'_p} = \frac{463}{8} = 58 \quad (-) \quad (5.35)$$

Výška cívky:

$$h_c = N'_{p1} \cdot (b_v + t_i) = 58 \cdot (2 + 0,5) = 145 \quad (mm) \quad (5.36)$$

Výška pólu:

$$h_p = h_c + 2 \cdot t_k = 145 + 2 \cdot 2 = 149 \quad (mm) \quad (5.37)$$

5.4.2 Orientační výpočet oteplení budící cívký

Vnější obvod budící cívký:

$$\begin{aligned} l_{be} &= 2 \cdot (L_p + b_p + 4 \cdot a) = 2 \cdot (0,86 + 0,173 + 4 \cdot 0,112) \\ &= 2,88 \quad (m) \end{aligned} \quad (5.38)$$

Střední obvod budící cívký:

$$\begin{aligned} l_{bs} &= 2 \cdot \left[L_p + b_p + 4 \cdot \left(t_k + \frac{b_c}{2} \right) \right] \\ &= 2 \cdot \left[0,86 + 0,173 + 4 \cdot \left(0,002 + \frac{100}{2} \right) \right] \\ &= 2,48 \quad (m) \end{aligned} \quad (5.39)$$

Ochlazovací povrch všech cívek:

$$Q_{2pc} = h_c \cdot l_{bs} \cdot 2p = 0,1 \cdot 2,48 \cdot 10 = 2,48 \quad (m^2) \quad (5.40)$$

Odpor všech cívek budícího vinutí:

$$\begin{aligned} R_{Cub} &= 1,22 \cdot \rho \cdot \frac{l_{bs} \cdot N_b \cdot 2p}{S_{Cub}} = 1,22 \cdot \frac{1}{56} \cdot \frac{2,48 \cdot 463 \cdot 10}{23,4} \\ &= 10,71 \quad (\Omega) \end{aligned} \quad (5.41)$$

Ztráty v budícím vinutí:

$$\Delta P_{Cub} = R_{b/75} \cdot I_b^2 = 10,71 \cdot 44^2 = 21176 \quad (W) \quad (5.42)$$

Oteplení cívký:

$$\Delta \vartheta_{Cub} = \frac{1,18 \cdot \Delta P_{Cub}}{\alpha \cdot Q_{2pc}} = \frac{1,18 \cdot 21176}{85,3,6} = 81 \quad (^\circ C) \quad (5.43)$$

Vyhovuje pro použití izolace třídy B.

5.5 Ztráty a účinnost

Povrchové ztráty

$$\begin{aligned} \Delta P_p &= \frac{\pi}{2} \cdot D_1 \cdot \alpha \cdot L_p \cdot k_0 \cdot \left(\frac{Q \cdot n}{10000} \right) \cdot (t_{d1} \cdot \beta \cdot 1000 \cdot B_\delta \cdot k_{cd})^2 \\ &= \frac{\pi}{2} \cdot 1,7 \cdot 0,75 \cdot 0,86 \cdot 2,8 \cdot \left(\frac{132,600}{10000} \right) \cdot (0,04046 \cdot 0,08 \cdot 1000 \cdot 0,8 \cdot 1,08)^2 \\ &= 740 \quad (W) \end{aligned} \quad (5.44)$$

kde:

k_0, β – činitelé povrchových ztrát v pólovém nástavci viz příloha J

Celkové ztráty

$$\begin{aligned} \Delta P &= \Delta P_{Cu1} + \Delta P_{Cub} + \Delta P_{Fej} + \Delta P_{Fez} + \Delta P_p + \Delta P_m + \Delta P_{př} \\ &= 66440 + 21176 + 19570 + 12595 + 740 \\ &\quad + 30150 + 19500 = 170171 \quad (W) \end{aligned} \quad (5.45)$$

Účinnost

$$\begin{aligned} \eta &= \left(\frac{P}{P + \Delta P} \right) \cdot 100 = \left(\frac{5200 \cdot 10^3}{5200 \cdot 10^3 + 170171} \right) \cdot 100 \\ &= 96,83 \quad (\%) \end{aligned} \quad (5.46)$$

5.6 Hmotnost pólů

Hmotnost pólů:

$$\begin{aligned} m_p &= \rho_{Fe} \cdot h_p \cdot b_p \cdot L_p = 7800 \cdot 0,149 \cdot 0,176 \cdot 0,86 \\ &= 175 \quad (kg) \end{aligned} \quad (5.47)$$

Hmotnost pólového nástavce:

$$\begin{aligned} m_n &= \rho_{Fe} \cdot h'_n \cdot b_n \cdot L_n = 7800 \cdot 0,042 \cdot 0,401 \cdot 1,08 \\ &= 142 \quad (kg) \end{aligned} \quad (5.48)$$

Hmotnost cívky:

$$\begin{aligned} m_{Cub} &= \rho_{Cu} \cdot S_{Cub} \cdot l_{bs} \cdot N_b = 8900 \cdot 23,4 \cdot 10^{-6} \cdot 2,48 \cdot 463 \\ &= 240 \quad (kg) \end{aligned} \quad (5.49)$$

6. Přehled hodnot

Název	Analytický výpočet		Přepočteno ze simulace	
	pro $\alpha = 0,65$	pro $\alpha = 0,75$	pro $\alpha = 0,65$	pro $\alpha = 0,75$
Indukce ve vzduch. mezeře	0,85 T	0,85 T	0,79 T	0,8 T
Essonův činitel	5,49 kVA/(m ³ .ot/min)	5,49 kVA/(m ³ .ot/min)	5,11 kVA/(m ³ .ot/min)	5,18 kVA/(m ³ .ot/min)
Efektivní délka stroje	0,68 m	0,68 m	0,73 m	0,72 m
Celková délka stroje	0,81 m	0,81 m	0,87 m	0,86 m
Magnetický tok	0,19 Wb	0,19 Wb	0,17 Wb	0,19 Wb
Budící magnetické napětí	20 980 A	21 120 A	20 780 A	20 590 A
Přesahující část pólového nástavce	77 mm	104 mm	97 mm	112 mm
Výška těla pólu	174 mm	151,5 mm	149 mm	149 mm
Šířka těla pólu	193 mm	193 mm	154 mm	176 mm
Budící proud	51 A	44 A	44 A	44 A
Počet závitů budící cívky	408	475	467	463
Výška budící cívky	170 mm	147,5 mm	145 mm	145 mm
Šířka budící cívky	75 mm	100 mm	100 mm	100 mm
Ztráty v budícím vinutí	23 336 W	21 162 W	21 269 W	21 176 W
Oteplení cívky	82 °C	83 °C	81 °C	82 °C
Hmotnost pólů	212 kg	185 kg	157 kg	175 kg
Hmotnost pólového nástavce	112 kg	135 kg	127 kg	142 kg
Hmotnost budící cívky	197 kg	239 kg	241 kg	240 kg
Povrchové ztráty	443 W	511 W	406 W	740 W
Celkové ztráty	170 082 W	167 958 W	168 562 W	170 172 W
Účinnost	96,83 %	96,87 %	96,86 %	96,83 %

Tab. 6.1 Porovnání strojů vypočtených analytickým výpočtem a po upřesnění hodnot ze simulace

Závěr

Cílem této diplomové práce bylo provést elektromagnetický návrh dvou strojů s různým činitelem pólového krytí: $\alpha = 0,65$ a $\alpha = 0,75$, analyzovat jejich magnetické pole pomocí metody konečných prvků a porovnat vliv pólového krytí na vlastnosti strojů.

Činitel pólového krytí má vliv na rozměry magnetického obvodu. První část návrhu, a to určení hlavních rozměrů stroje, návrh drážky a návrh statorového vinutí včetně výpočtu odporů a reaktancí, byla tedy pro oba stroje stejná. Stroj má celkovou délku 0,81 m. Na statoru je použito vlnové sériové nekřížené vinutí, které je uloženo ve 132 statorových drážkách. Drážky typu M jsou široké 18 mm a hluboké 92 mm. Procentní úbytek na činném odporu byl vypočten na 0,98 % a procentní úbytek na rozptylové reaktanci 12,78 %.

U návrhu magnetického obvodu jsou již ale hodnoty rozdílné, jak je vidět z *tab. 6.1*. Velikost předpokládaného magnetického toku je 0,19 Wb a vzduchové mezery 15 mm. Tyto hodnoty jsou pro oba stroje stejné. Rozdíl v činiteli pólového krytí je dobře patrný u přesahující části pólového nástavce 77 mm s $\alpha = 0,65$ respektive 104 mm s $\alpha = 0,75$. Stroj s $\alpha = 0,65$ má výrazně větší výšku těla pólu, 174 mm, kdežto stroj s $\alpha = 0,75$ pouze 151,5 mm. Další rozdíl je pak vidět v šířce pólového nástavce 0,347 m respektive 0,401 m. Rozdílné budící magnetické napětí stanovené z charakteristiky naprázdno se projevilo u návrhu budící cívky. Větší budící proud 51 A má stroj s $\alpha = 0,65$ a 44 A pak stroj s $\alpha = 0,75$. Stroj s $\alpha = 0,65$ cívku s 408 závitů a stroj s $\alpha = 0,75$ má závitů 475. Při $\alpha = 0,65$ má stroj sice méně závitů, avšak kvůli počtu poloh budící cívky je výška cívky větší o 22,5 mm než u $\alpha = 0,75$. Stroj s $\alpha = 0,75$ má ale zase budící cívku o 25 mm širší, než stroj s menším činitelem pólového krytí. Velikost budícího proudu má vliv na ztráty v budícím vinutí, kde rozdíl činí více jak 2 kW. Rozdíly v šířkách a výškách pólů, pólových nástavců a budících cívek se projevily na jejich hmotnost. Rozdíly dosahují 30–40 kg, což není zanedbatelná hodnota a tento fakt se projevily v rozdílu velikosti odstředivé síly pólu s cívkou. Rozdíl činil $0,19 \cdot 10^6$ N/m.

Velikost pólového nástavce má vliv na povrchové ztráty stroje. Stroj s $\alpha = 0,65$ má povrchové ztráty 443 W a stroj s $\alpha = 0,75$ pak 511 W. Celkové ztráty se pak liší o více jak 20 kW. Na výslednou účinnost to má ale pouze malý vliv 0,04 %.

Pro analýzu magnetického pole obou strojů metodou konečných prvků byly nakresleny dvourozměrné příčné řezy jedné desetiny stroje. Z analýzy je vidět, že činitel pólového krytí má vliv na průběh magnetické indukce ve vzduchové mezeře. Stroj s větším

činitelem pólového krytí má strmější nárůst i pokles křivky. Z Fourierovy analýzy je stanovena amplituda první harmonické indukce ve vzduchové mezeře. V návrhu je počítáno na základě zkušeností z již vyrobených strojů s hodnotu $B_{\delta} = 0,85T$. Skutečná hodnota je dle analýzy $B_{\delta} = 0,75 T$ pro $\alpha = 0,65$ a $B_{\delta} = 0,8 T$ pro stroj s $\alpha = 0,75$. Magnetický tok stroje s $\alpha = 0,65$ je 0,17 Wb a pro stroj $\alpha = 0,75$ je 0,19 Wb.

Protože magnetický tok získaný ze simulace je trochu jiný než vypočtený analyticky, jsou v kapitole 4 a 5 přepočteny stroje s magnetickým tokem získaným ze simulace. Dochází tedy k iteračnímu výpočtu rozměrů a parametrů. Stroj s $\alpha = 0,65$ má celkovou délku po přepočtení 0,86 m a stroj s $\alpha = 0,75$ pak 0,87 m. Essonův činitel elektromagnetického využití stroje má u stroje s $\alpha = 0,65$ velikost 5,11 kVA/(m³.ot/min) a 5,18 kVA/(m³.ot/min) u stroje s $\alpha = 0,75$. Co se týče magnetického obvodu, tak zde došlo k většímu sjednocení. Největší rozdíl 15 mm nastal u přesahující části pólového nástavce, což je způsobeno rozdílným činitelem pólového krytí. Nepatrný rozdíl je pak ve ztrátách v budícím vinutí o 93 W ve prospěch stroje s $\alpha = 0,75$. Celkové ztráty stroje s $\alpha = 0,65$ jsou 168,5 kW a u stroje s $\alpha = 0,75$ pak 170,2 kW. Podstatný rozdíl nastal opět u hmotnosti pólového nástavce a pólu. Hmotnost pólového nástavce a pólu je u stroje s $\alpha = 0,75$ cca o 20 kg menší.

Rozdíly mezi jednotlivými parametry tedy existují a v některých případech nejsou úplně malé. V některém případě je lepší stroj s větším pólovým krytím, v jiném zase s menším. Avšak podíváme-li se na stroje z celkového hlediska, je možné říci, že rozdíly mezi stroji jsou velmi nepatrné a činitel pólového krytí nemá na vlastnosti stroje žádný výrazný vliv.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] KOPYLOV, Igor Petrovič a kol. autorů. *Stavba elektrických strojů*. Praha: STNL, 1988, 685 s. ISBN 04-532-88.
- [2] CIGÁNEK, Ladislav. *Stavba elektrických strojů*. Praha: STNL, 1958, 714 s.
- [3] ČERVENÝ, Josef. *Stavba elektrických strojů*. Portál ZČU > Courseware [online]. 2016 [cit. 2018-05-08]. Dostupné z:
<https://courseware.zcu.cz/portal/studium/courseware/kev/ses1/prednasky.html>
- [4] ČERVENÝ, Josef. *Synchronní stroje*. Portál ZČU > Courseware [online]. 2016 [cit. 2018-05-08]. Dostupné z:
<https://courseware.zcu.cz/portal/studium/courseware/kev/ses1/cviceni.html>
- [5] ČERVENÝ, Josef. *Postup výpočtu synchronního stroje*. Portál ZČU > Courseware [online]. 2016 [cit. 2018-05-08]. Dostupné z:
<https://courseware.zcu.cz/portal/studium/courseware/kev/ses1/cviceni.html>
- [6] ZEMAN, Jan. *Metoda konečných prvků (MKP)* [online]. In: . FST ČVUT. [cit. 2018-04-20]. Dostupné z:
<http://mech.fsv.cvut.cz/~zemanj/teaching/mk10/prednasky/prednaska1.pdf>
- [7] ZEMEK, Bc. Pavel. *Využití metody konečných prvků pro návrh otočného sloupového jeřábu* [online]. 2011 [cit. 2018-04-20]. Dostupné z:
http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/16782/zemek_2011_dp.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Ing. Milan Žaloudek, Ph.D.
- [8] HORNÍKOVÁ, Bc. Lucie. *NÁVRH SYNCHRONNÍHO MOTORU S PM* [online]. 2015 [cit. 2018-04-20]. Dostupné z:
https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/18731/1/DP_hornikova_final.pdf. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Ing. Roman Pechánek, Ph.D.

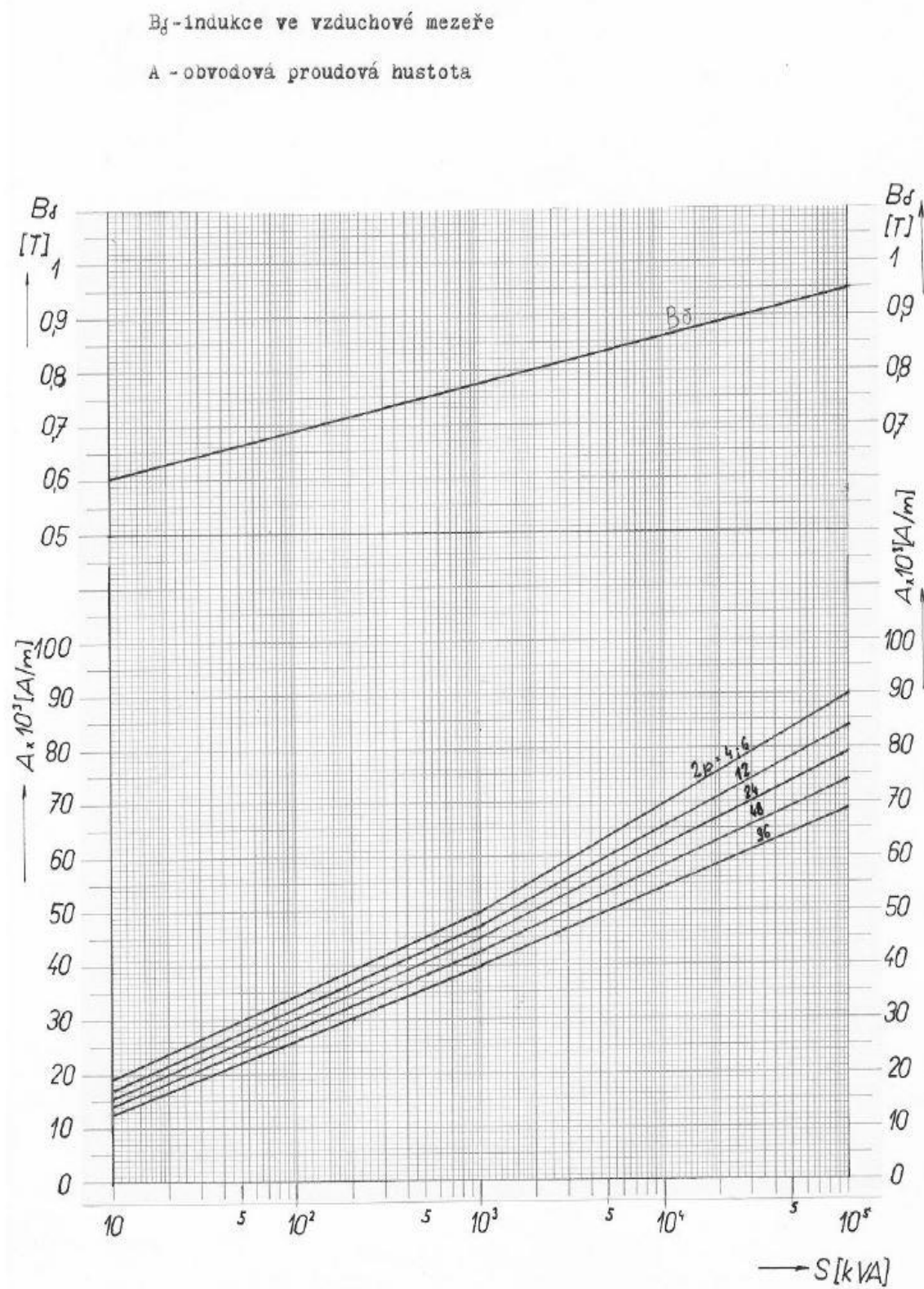
Přílohy

Obsah:

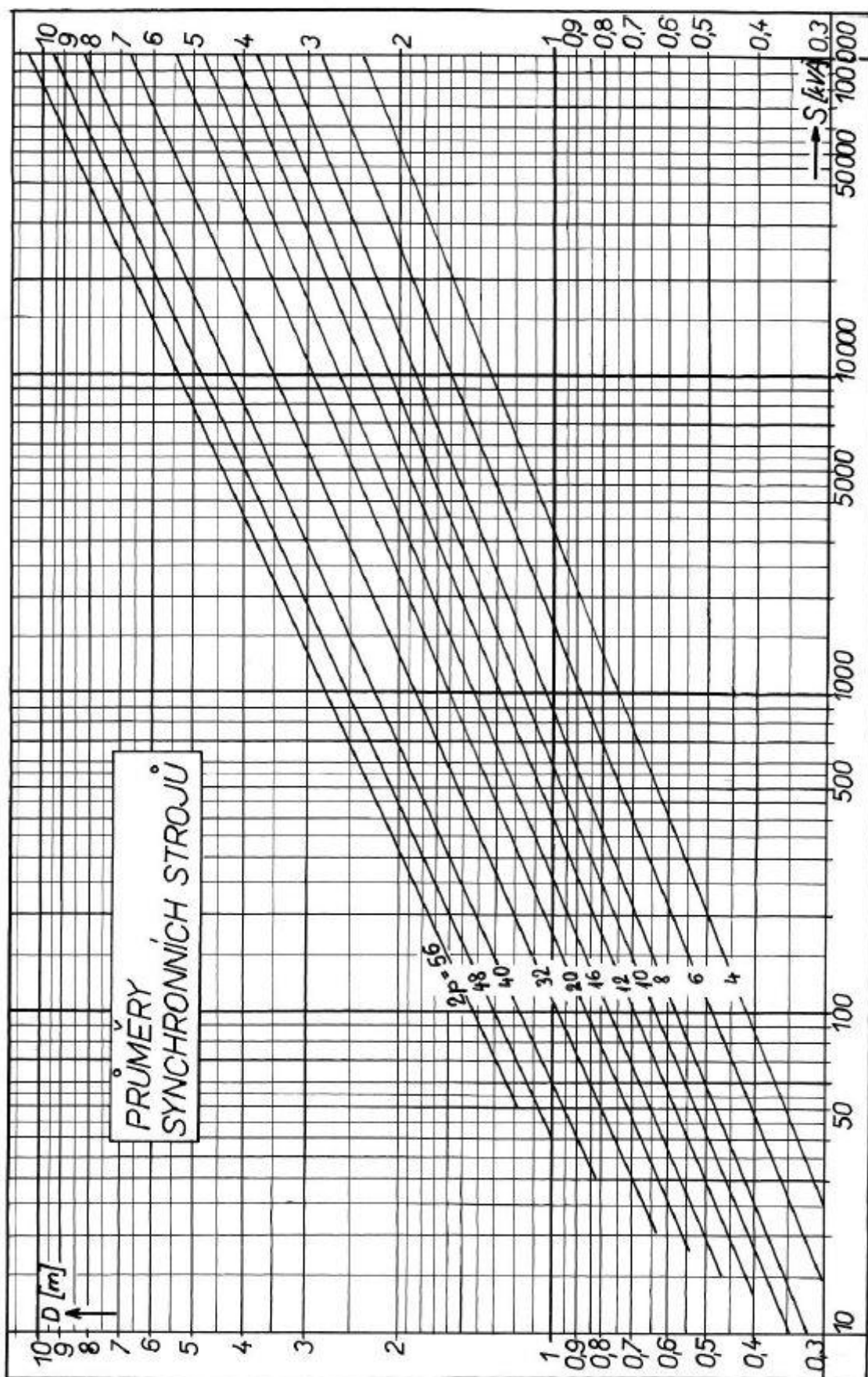
Příloha A – Nomogram k určení indukce ve vzduch. mezeře a obvod. proud. hustoty	2
Příloha B – Nomogram k určení průměru induktu synchronních strojů	3
Příloha C – Normalizované rozměry a průřezy měděných pasů	4
Příloha D – B-H charakteristika konstrukční oceli	5
Příloha E – B-H charakteristika dynamových plechů	6
Příloha F – Normogram k určení skutečné indukce v zubech induktu.....	7
Příloha G - Carterův činitel respektující vliv drážkování induktu	8
Příloha H – Činitel zákl. harmonické mag. indukce a tvaru magnetického toku	9
Příloha I – Deformační činitel magnetického napětí	10
Příloha J – Činitel povrchových ztrát	11

Přílohy A-J [4]

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



Příloha B – Nomogram k určení průměru induktu synchronních strojů



Příloha C – Normalizované rozměry a průřezy měděných pasů

M Ě D Ě N Ě Š T Ě S Y

3,0 (3,2)	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6 (6,5)	7	8	9	10
11,4											
12,9											
14,4		13,5									
15,9		16,6	19,1								
17,4		18,4	21,1								
18,9	19,9	21,0	25,1								
20,4	21,4	23,6	27,1	30,3	33,8						
23,4	24,7	27,1	31,1	34,8	38,8	42,8	46,8				
26,4	27,9	30,6	35,1	39,3	43,8	48,3	52,5				
29,4	31,1	34,1	39,1	43,8	48,8	53,8	58,5				
32,4	34,3	37,6	43,1	48,3	53,8	59,3	64,0				
35,4	37,5	41,1	47,1	52,6	58,8	64,8	70,5		93,8		
38,4	40,7	44,6							101,8		
41,4	43,9	48,1	55,1	61,8	68,8	75,8	82,5		109,8		
44,4	47,1	51,6	59,1	66,3					117,8		147,8
47,4	50,2	55,1	63,1	70,8	78,8	86,8	94,5	102,5	110,5	125,8	157,8
53,4	56,7	62,1	71,1	79,8	88,8	97,8	106,5	115,5	124,5	141,8	159,8
59,4	63,1	69,1	79,1	88,8	98,8	108,8	118,8	128,8	138,5	157,8	197,8
74,4	79,1	86,6	96,1	111,3	123,8	136,2	148,5	161,0	173,5	197,8	247,8
80,4	85,1	104,1	119,1	138,8	148,8	162,8	178,5	193,5	208,5	237,8	297,8

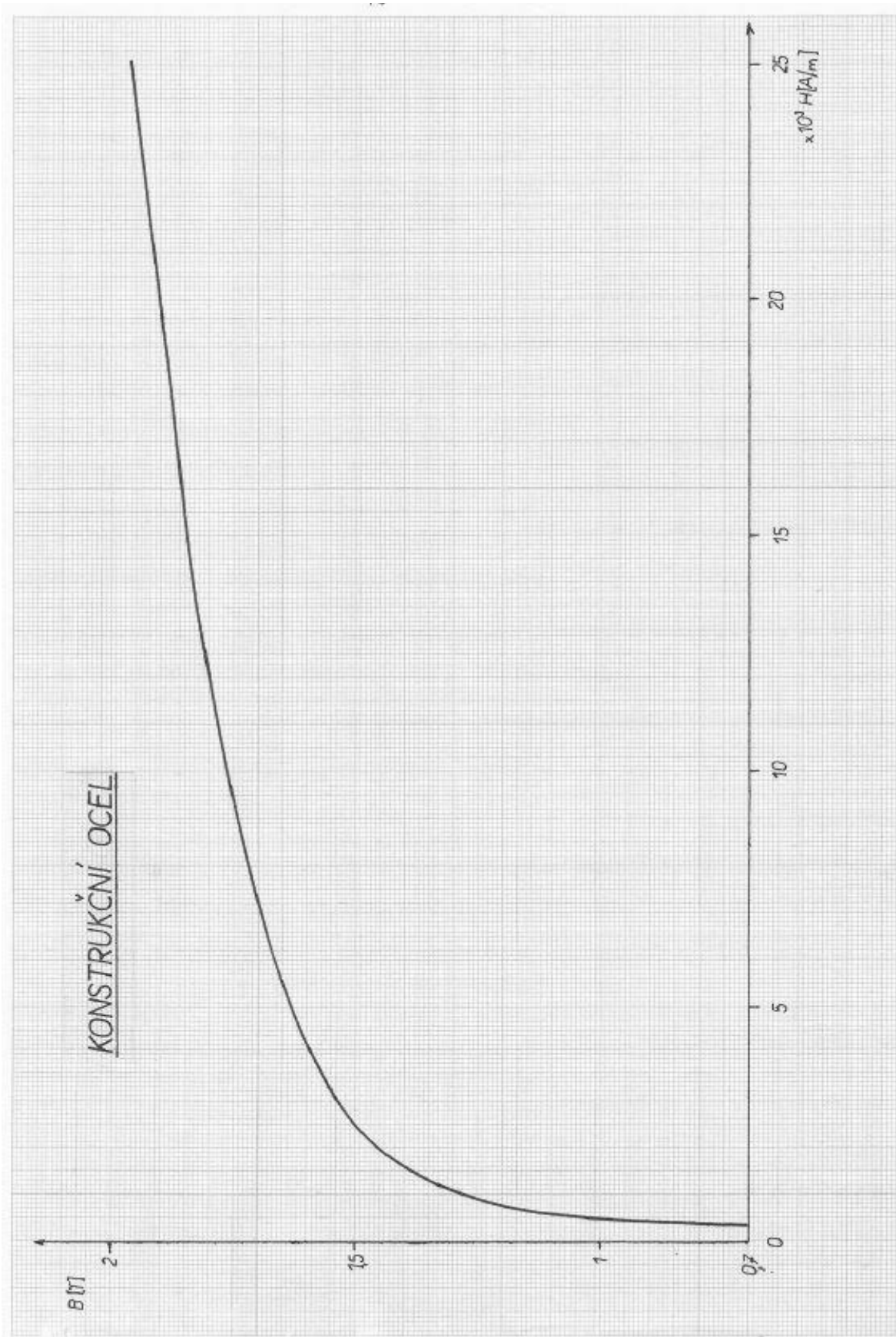
Příklad: pás 4,5 x 6 má průřez 20,1 mm²; rozměry izolovaného pásu jsou 3,9 x 6,4 mm.

Výběr z ČSN 42 8308-1:89 Rozměry měděných pasů

Jmenovitá tloušťka [mm]	0,8	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,8	2,0	2,2	2,5	2,8
0,30	1,8	1,3	1,66										
	2,0	1,46	1,86	2,18	2,33	2,58	2,69	2,89					
	2,2	1,62	2,06	2,42	2,54	2,86	2,99	3,21					
	2,5	1,86	2,36	2,78	3,03	3,28	3,44	3,69	4,19	4,45			
	2,8	2,1	2,69	3,14	3,42	3,70	3,89	4,17	4,73	5,05			
0,35	3,0	2,26	2,86	3,16	3,38	3,68	3,98	4,19	4,49	5,09	5,40	6,06	6,9
	3,5	2,66	3,36	3,71	3,98	4,33	4,68	4,94	5,29	5,99	6,45	7,15	8,2
	4,0	3,06	3,86	4,36	4,58	4,98	5,38	5,69	6,09	6,89	7,45	8,25	9,45
	4,5	3,46	4,36	4,81	5,18	5,63	6,08	6,44	6,89	7,79	8,45	9,35	10,7
	5,0	3,86	4,86	5,36	5,78	6,28	6,78	7,19	7,69	8,69	9,45	10,4	12,0
	5,5	4,26	5,36	5,91	6,38	6,93	7,48	7,94	8,49	9,59	10,4	11,5	13,2
	6,0	4,66	5,86	6,46	6,98	7,58	8,18	8,69	9,29	10,5	11,4	12,6	14,5
0,40	(6,5)	5,06	6,36	7,01	7,58	8,23	8,88	9,44	10,1	11,4	12,4	13,7	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
	8	6,26	7,86	8,66	9,38	10,2	11,0	11,7	12,5	14,1	15,4	17,0	19,6
	9	7,06	8,86	10,6	11,6	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	24,6	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	16,5	17,7	18,9	21,3	23,4	25,8	29,5	33,0
0,50	(13)								23,1	25,4	28,0	32,0	35,8
	14								20,7	22,1	24,9	27,4	30,6
(15)									26,7	29,4	32,4	37,0	41,4
16									28,5	31,4	34,6	39,5	44,2
18									35,4	39,0	44,5	49,8	
20									30,4	33,4	39,5	55,4	
0,65	25											62,0	69,4
	30											74,5	83,4

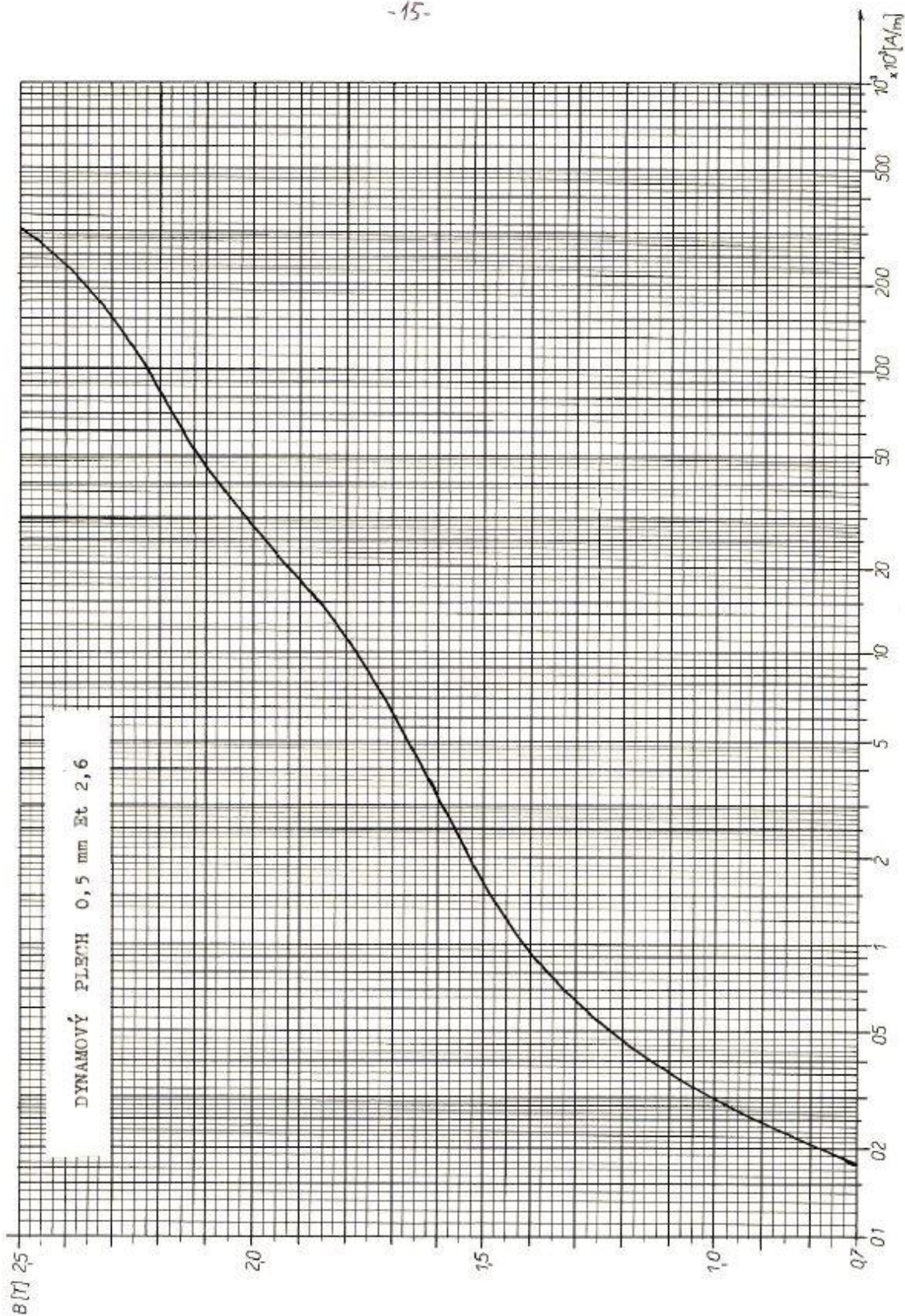
Rozměry v závorkách neplatí pro nové konstrukce.

Příloha D – B-H charakteristika konstrukční oceli



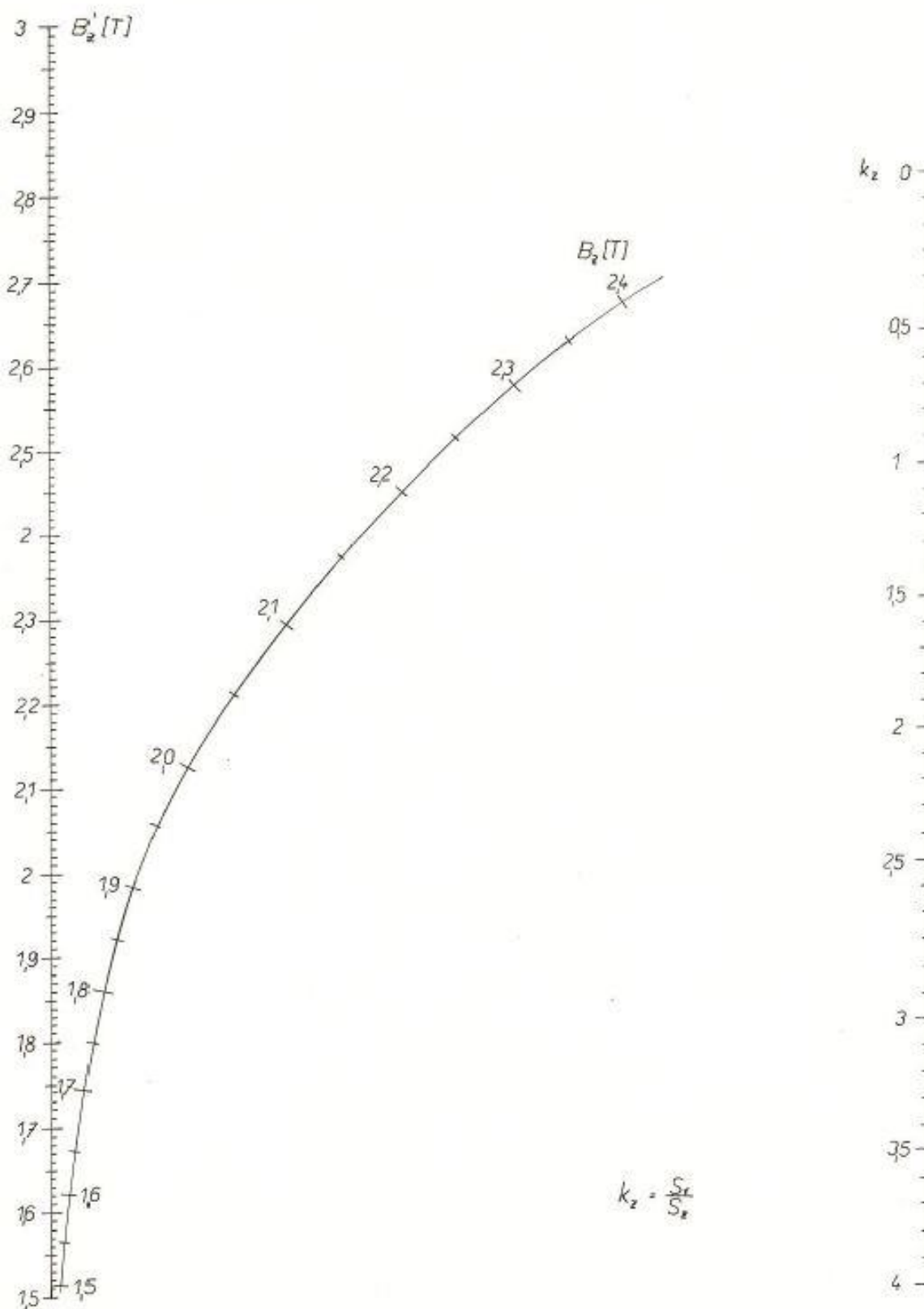
Příloha E – B-H charakteristika dynamových plechů

-15-

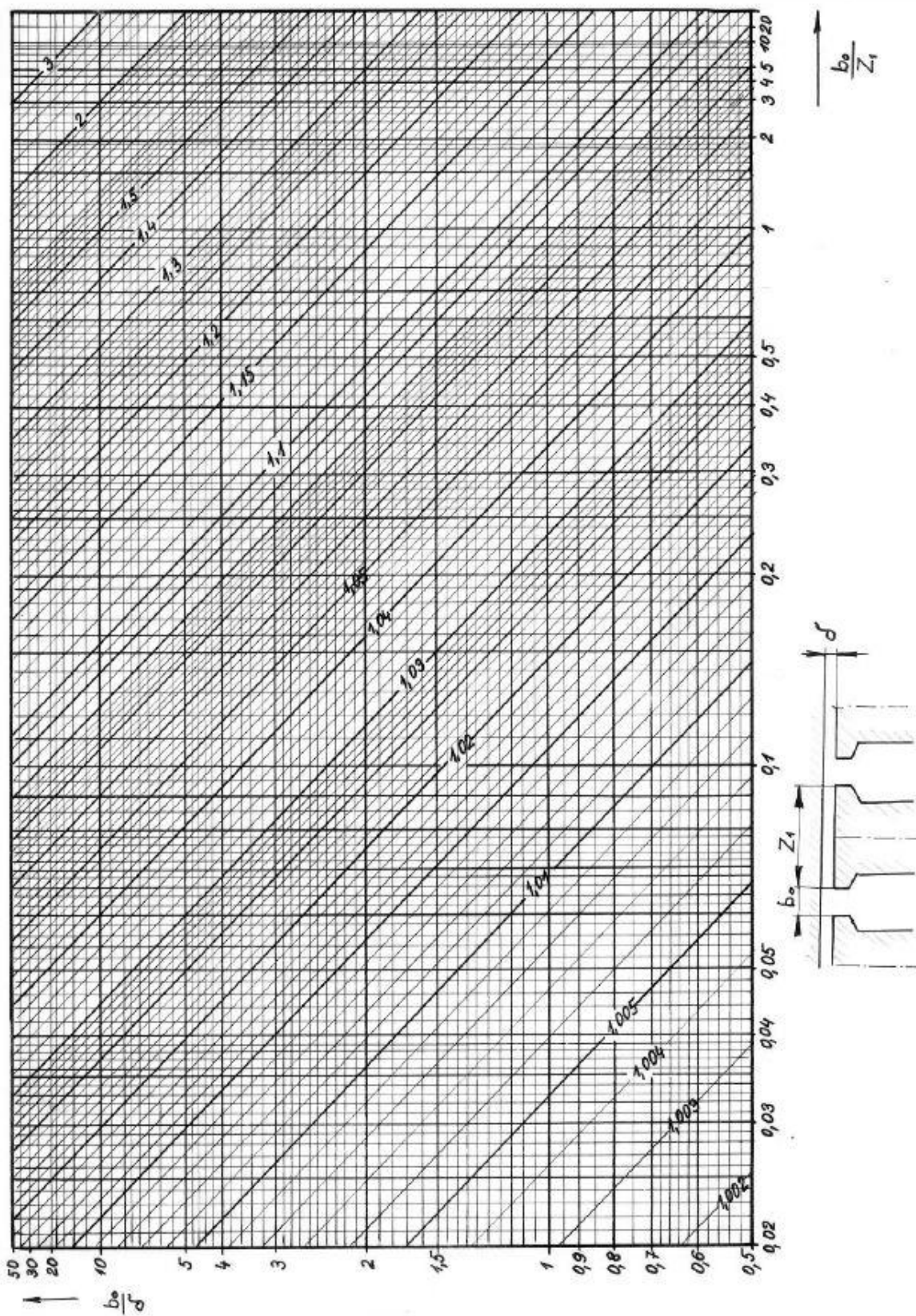


Příloha F – Nomogram k určení skutečné indukce v zubech induktu

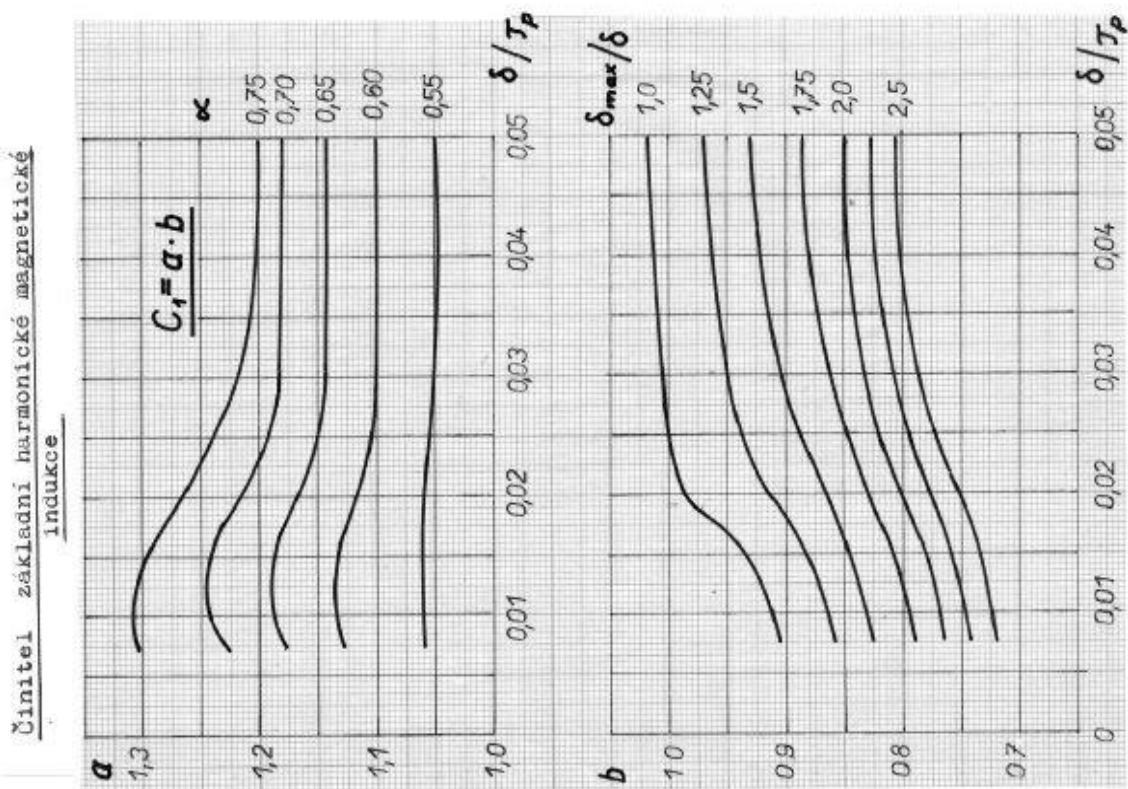
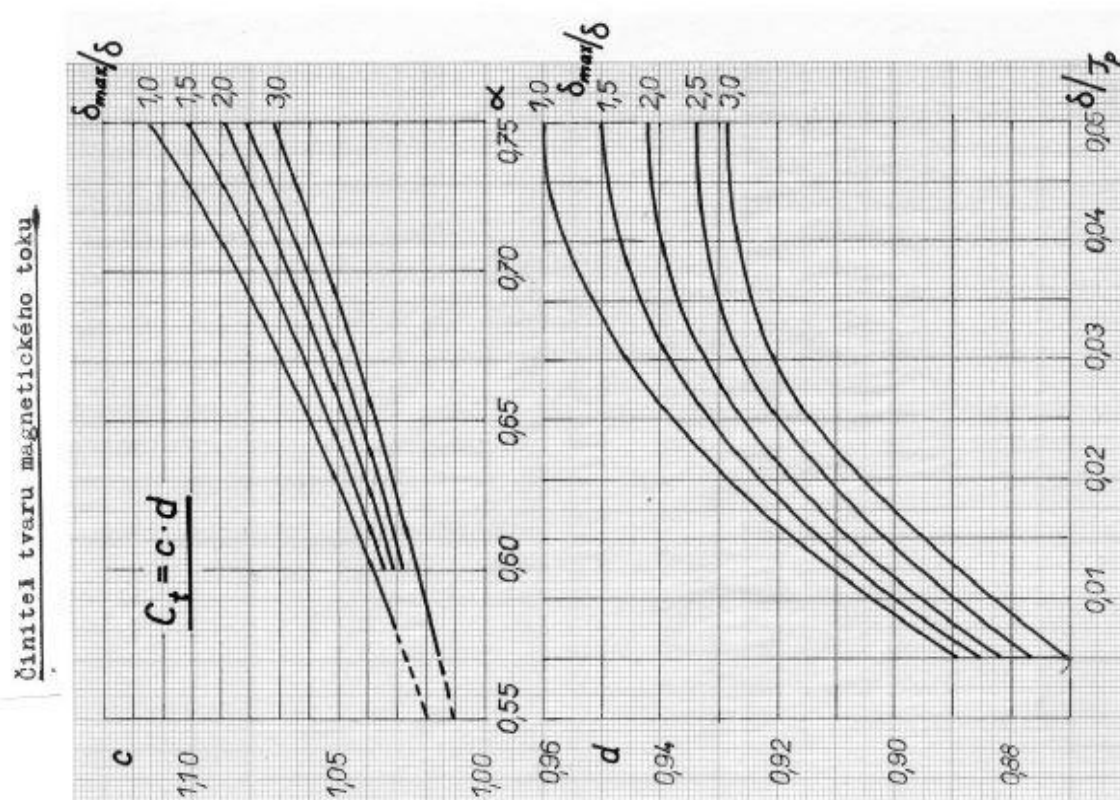
Dynamový plech $t_{l.0,5}$ $\Delta p_{Fe,0} = 1,8$



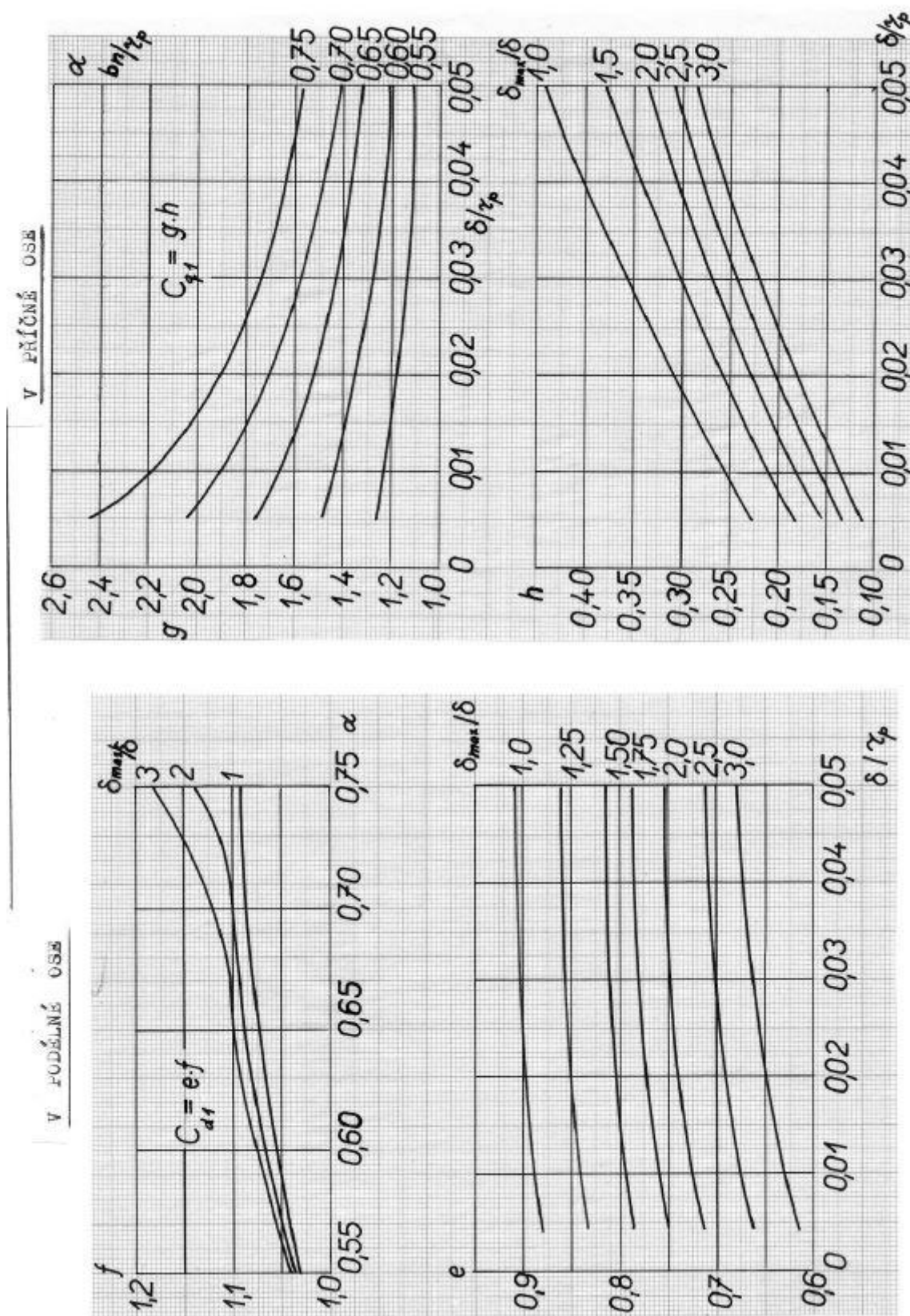
Příloha G – Carterův činitel respektující vliv drážkování induktu



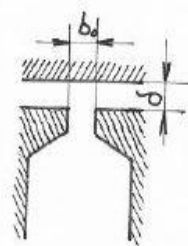
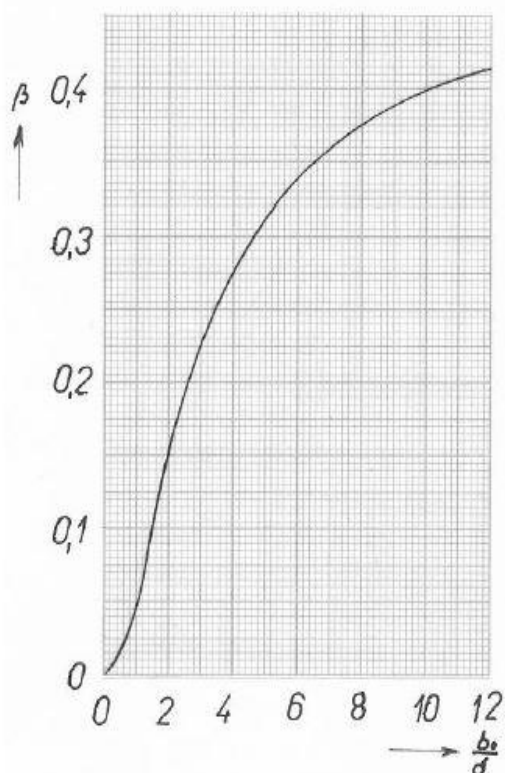
Příloha H – Činitel základní harmonické magnetické indukce a tvaru magnetického toku



Příloha I – Deformační činitel magnetického napětí



Příloha J – Činitel povrchových ztrát



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

k_p, β - činitelé povrchových ztrát v pólovém nástavci

Činitel mechanických ztrát :

$A = 1,1 \div 1,5$ pomalub. alternátor

$0,8 \div 1,1$ rychloběžné alt.

$0,8 \div 1$ turboalternátor