

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Návrh synchronního těžního motoru

Vedoucí práce: Doc. Ing. Josef Červený Csc.

Autor: Bc. Jiří Franc

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jiří FRANC**
Osobní číslo: **E12N0061P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Průmyslová elektronika a elektromechanika**
Název tématu: **Návrh synchronního těžního motoru**
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Provedte elektromagnetický návrh stroje s parametry: $P=1450$ kW, $U=6000$ V, $2p=40$, $m=3$, $f=11,333$ Hz, $\cos \phi=1$ a výsledky porovnejte s výstupy z firemního softwaru.
2. Navrhněte konstrukční uspořádání statoru.
3. Provedte detailní návrh rotoru včetně základních mechanických výpočtů a výkresu sestavení.
4. Vytvořte rozměrový náčrt motoru.



Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

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

Vedoucí diplomové práce:

Doc. Ing. Josef Červený, CSc.


Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání diplomové práce:

14. října 2013

Termín odevzdání diplomové práce:

12. května 2014



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



Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

Čestné prohlášení

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

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

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

Datum: 25. 4. 2014

.....
podpis

Anotace

Diplomová práce se zabývá elektromagnetickým návrhem a návrhem konstrukčního uspořádání synchronního těžního motoru. Do několika podkapitol je rozdělen výpočet hlavních rozměrů, vinutí, magnetického obvodu, ztrát a účinnosti. V neposlední řadě je v práci uvedeno několik orientačních mechanických výpočtů. Výsledkem práce je porovnání vybraných hodnot výpočtu s hodnotami získanými z výpočetního programu, který používá společnost Howden ČKD Compressors s.r.o. a vytvoření výkresové dokumentace.

Klíčová slova

Synchronní motor, synchronní těžní motor, elektromagnetický výpočet, stator, rotor, póly, elektrické vinutí, ztráty, účinnost

Abstract

Masters thesis is dealing with electromagnetic calculation and design of synchronous mining engine. Thesis is divided into several subsections including calculation of main dimensions, winding, magnetic circuit, power losses and efficiency. Last but not least there are some tentative mechanical calculations in this thesis. The main result of the thesis is comparison of chosen quantities of my calculations with the quantities gained from calculation program, which is used in Howden ČKD Compressors s.r.o. and creation of drawings.

Keywords

Synchronous engine, synchronous mining engine, electromagnetic calculation, stator, rotor, poles, electric winding, power losses, efficiency

Obsah

Seznam veličin a zkratk	2
Úvod	9
1 Synchronní těžní motor	10
2 Elektromagnetický výpočet	11
2.1 Základní hodnoty	11
2.2 Návrh vinutí statoru	12
2.3 Výpočet hlavních rozměrů	15
2.4 Návrh drážky	16
2.5 Odpor a rozptylová reaktance statorového vinutí	18
2.6 Návrh magnetického obvodu	21
2.7 Charakteristika naprázdno	24
2.8 Návrh budicího vinutí	25
2.9 Návrh tlumiče	26
2.10 Orientační výpočet oteplení budicí cívky	26
2.11 Výpočet kroužků a kartáčů	28
2.12 Ztráty a účinnost	29
3 Mechanické výpočty	31
3.1 Výpočet sil působících na pól	31
3.2 Výpočet upevnění pólu pomocí šroubů	32
3.3 Výpočet momentového pera	32
4 Porovnání výsledků	33
Závěr	34
Literatura	35
Přílohy	36

Seznam veličin a zkratk

Veličina	Rozměr	Název
A	A/m^2	obvodová proudová hustota
A_σ	–	koeficient rozptylové reaktance
a	–	koeficient pro určení činitele první harmonické mag. indukce ve vzduchové mezeře
a_n	m	přesah pólového nástavce
a_{ss}	–	počet paralelních větví stejnosměrného vinutí
a_{st}	–	počet paralelních větví střídavého vinutí
α	–	činitel pólového krytí
α_c	$^\circ$	úhel sklonu čela vinutí
α_p	$\frac{W}{K \cdot m^2}$	součinitel přestupu tepla
B_{jr}	T	magnetická indukce v jádru rotoru
B_{js}	T	magnetická indukce v jádru statoru
B_P	T	magnetická indukce v těle pólu
B_δ	T	magnetická indukce ve vzduchové mezeře
B_σ	–	koeficient rozptylové reaktance
B'_{z1}	T	magnetická indukce v hlavě zubu
B_{z2}	T	magnetická indukce ve středu zubu
b	–	koeficient pro určení činitele první harmonické mag. indukce ve vzduchové mezeře
b_d	m	šířka drážky
b_k	m	šířka kartáče
b_n	m	šířka pólového nástavce
b_p	m	šířka těla pólu
b_{pe}	m	šířka pera
b_v	m	šířka holého vodiče
b_{bc}	m	šířka budící cívky
b_{bv}	m	šířka vodiče budící cívky
b_{bvi}	m	šířka vodiče budící cívky s izolací
β	–	poměrné zkrácení kroku vinutí
β_p	–	činitel povrchových ztrát
c_{vc}	m	vzdálenost mezi čely

Veličina	Rozměr	Název
c	–	koeficient pro určení činitele první harmonické
C	$\frac{kW}{m^3 \frac{\sigma t}{min}}$	Essonův činitel elektromagnetického využití
C_1	–	činitel první harmonické magnetické indukce ve vzduchové mezeře
C_σ	–	koeficient rozptylové reaktance
C_{d1}	–	činitel podélné složky první harmonické mag. indukce
C_{q1}	–	činitel příčné složky první harmonické mag. indukce
D_{js}	m	výška jádra statoru včetně zubové vrstvy
D_K	m	vnější průměr kroužku
D_i	m	vnitřní průměr stroje
D_3	m	průměr statoru u dna drážky
D_{je}	m	vnější průměr statoru
d_h	m	průměr hřídele v místě přívodu mechanické energie
d_{mk}	m	poloměr jha rotoru
d_s	m	malý průměr šroubu
d_T	m	průměr tyče tlumiče
δ	m	velikost vzduchové mezery
E	m	vyložení čel
e	–	koeficient pro určení činitele podélné složky první harmonické mag. indukce
ϵ	–	koeficient pro volbu vinutí
η	%	účinnost
F'_a	A	amplituda základní harmonické magnetického napětí reakce kotvy
F_b	A	magnetické budící napětí
F_C	N	celková síla působící na pól
F_{d1}	A	podélná složka základní harmonické magnetického napětí reakce kotvy
F_m	N	síla od vlastní hmotnosti pólu
F_P	N	odstředivá síla
F_{q1}	A	příčná složka základní harmonické magnetického napětí reakce kotvy
F_δ	A	magnetické napětí na vzduchové mezeře

Veličina	Rozměr	Název
f	–	koeficient pro určení činitele podélné složky první harmonické mag. indukce
g	–	koeficient pro určení činitele příčné složky první harmonické mag. indukce
h	–	koeficient pro určení činitele příčné složky první harmonické mag. indukce
h_{bc}	m	výška budící cívky
h_{bv}	m	výška vodiče budícího vinutí
h_{bvi}	m	výška vodiče budícího vinutí s izolací
h_c	m	výška cívky
h_d	m	hloubka drážky
h_{jr}	m	výška jádra rotoru
h_{js}	m	výška jádra statoru
h_n	m	výška pólového nástavce
h'_n	m	střední výška pólového nástavce
h_p	m	výška těla pólu
h_{pe}	m	šířka pera
h_v	m	výška holého vodiče
h_0	m	výška krčku drážky
h_1	m	výška drážkového klínu
h'_1	m	vzdálenost krčku drážky od odizolované cívky
h_2	m	hloubka drážky bez klínu
h'_2	m	výška dvou cívek nad sebou po odizolování
I_b	A	budící proud
I_1	A	fázový proud
i	–	počet paketů
i_k	–	počet kartáčů
J_S	MPa	namáhání na střiž
J_{SD}	MPa	maximální dovolené namáhání ve střiž
K	–	počet lamel komutátoru
k	–	překladové číslo
k_c	–	Carterův činitel
k_{cd}	–	Carterův činitel respektující vliv drážkování
k_{ck}	–	Carterův činitel respektující vliv radiálních vent. kanálů

Veličina	Rozměr	Název
k_{Fe}	–	činitel plnění železa
k_{v1}	–	činitel vinutí první harmonické
k_0	–	činitel povrchových ztrát
L_p	m	délka těla pólu
l_c	m	délka čela
l_{be}	m	vnější obvod budící cívky
l_{bs}	m	střední délka závitů budící cívky
l_e	m	efektivní délka stroje
l_k	m	délka kartáče
l_r	m	délka siločáry procházející rotorem
l_v	m	délka vodiče
l_p	m	délka siločáry procházející pólem
L	m	celková délka induktu
L_p	m	délka pólu
L_{pe}	m	délka pera
L_R	m	délka rotoru
M_k	Nm	točivý moment stroje
m	–	počet fází
m'	–	matematický počet fází
m_{FeS}	kg	hmotnost statorového svazku plechů
m_{Fez}	kg	hmotnost zubové vrstvy
m_{Cu}	kg	hmotnost budící cívky
m_n	kg	hmotnost pólového nástavce
m_p	kg	hmotnost těla pólu
m_s	–	počet šroubů
n_d	–	počet vodičů v drážce
n'_d	–	předběžný počet vodičů v drážce
ν	–	koeficient pro výpočet šířky pólu
N_b	–	počet závitů budícího vinutí
N_p	–	počet závitů nad sebou
N_s	–	počet závitů v sérii
N'_s	–	předběžný počet závitů v sérii
n_{max}	$\frac{ot}{min}$	maximální otáčky
n_p	–	počet závitů bud. vinutí vedle sebe

Veličina	Rozměr	Název
n_{sg}	–	počet segmentů
n_s	$\frac{ot}{min}$	synchronní otáčky
O_{2pc}	m^2	ochlazovací povrch všech cívek
ω_{max}	$\frac{rad}{s}$	maximální obvodová rychlost
P	W	činný výkon
p	–	počet pólpárů
p_p	MPa	tlak působící na pero
p_{pd}	MPa	maximální dovolené namáhání na tlak
ΔP_c	W	celkové ztráty
ΔP_{Cub}	W	Ztráty v budícím vinutí
ΔP_{Cu}	W	Jouleovy ztráty statorového vinutí
ΔP_{Fej}	W	ztráty v jádru statoru
Δp_{Fe}	$\frac{W}{kg}$	ztrátové číslo
ΔP_{Fesz}	W	ztráty v zubové vrstvě
ΔP_p	W	povrchové ztráty
ΔP_{Pr}	W	přídavné ztráty
ΔP_{Mech}	W	mechanické ztráty
Φ	Wb	magnetický tok
Q	–	počet drážek na statoru
Q_p	–	počet drážek na pól
Q_{pr}	–	počet drážek na překlad
q	–	počet drážek na pól a fázi
R	m	střední poloměr oka
$R'_{1/20}$	Ω	odpor jedné fáze při průchodu střídavým proudem při 20 °
$R_{b/75}$	Ω	odpor budícího vinutí při 75 °
$R_{1/75}$	Ω	odpor vinutí při 75 °
r	m	vnitřní poloměr oka
r_p	m	střední poloměr pólu
r_n	m	střední poloměr pólového nástavce
r_{Cu}	m	střední poloměr cívky
ρ_{Cu}	$\frac{\omega \cdot mm^2}{m}$	měrný odpor mědi
ρ_C	$\frac{kg}{m^3}$	hustota mědi
ρ_{Fe}	$\frac{kg}{m^3}$	hustota železa
S_{Cub}	m^2	průřez vodiče budící cívky

Veličina	Rozměr	Název
S_{Cubv}	m^2	průřez statorového vinutí na jeden pól
S'_{Cu1}	m^2	průřez vodiče statorového vinutí
S_k	m^2	celková plocha kartáčů
S_{K1}	m^2	plocha jednoho kartáče
S_T	m^2	průřez tyče tlumiče
S_{TL}	m^2	průřez tyčí tlumiče na jeden pól
s_k	m	šířka radiálního kanálu
s_p	m	šířka paketu
σ_{Cub}	A/m^2	proudová hustota ve vodiči budícího vinutí
σ_{Cu1}	A/m^2	proudová hustota vodiče statorového vinutí
σ_D	MPa	maximální dovolené namáhání v tahu
T_t	N	tečná síla
t_{d1}	m	drážková rozteč
t_k	m	kostřička
t_{kr}	m	rozteč kartáčů
t_p	m	pólová rozteč
t_1	m	výška pera namáhaná na otláčení
$\delta\vartheta_{Cub}$	$^{\circ}C$	oteplení budící cívký
U_b	V	budící napětí
U_f	V	fázové napětí
U_s	V	sdílené napětí
u_r	%	procentní hodnota úbytku napětí na činném odporu
u_{σ}	%	procentní úbytek napětí na rozptylové reaktanci
u	–	počet párů paralelních větví
v	m	výběh cívký drážky
v_k	$\frac{m}{s}$	obvodová rychlost kroužků
v_o	$\frac{m}{s}$	obvodová rychlost
V_{vz}	l	množství vzduchu
X_{σ}	Ω	rozptylová reaktance statorového vinutí
x	m	délka výběhu čela
x_1	m	velikost úkosu drážkového klínu
y	m	průmět délky výběhu čela
y_k	–	krok na komutátoru

Veličina	Rozměr	Název
y_{1d}	–	cívkový krok v počtu drážek
y_1	–	přední cívkový krok
y_2	–	zadní cívkový krok
z_1	m	šířka zubu
z_2	m	šířka zubu v polovině jeho délky

Úvod

Moje diplomová práce se z podstatné části zabývá elektromagnetickým návrhem synchronního těžního motoru a okrajově mechanickým návrhem. Téma diplomové práce jsem si vybral hlavně z toho důvodu, že se o danou problematiku velice aktivně zajímám a také proto, že v současné době je otázka synchronních těžních motorů velice aktuální. Je to dáno hlavně tím, že oproti dříve používaným stejnosměrným motorům, mají synchronní motory vyšší účinnost. Proto v posledních letech začala růst poptávka po tomto typu těžního motoru. Díky této skutečnosti, se naskytla možnost spolupráce se společností Howden ČKD Compressors s.r.o., která aktuálně vyvíjí řadu těžních motorů ve třech variantách s nízkým, středním a vysokým výkonem. Já se v mé práci zabývám návrhem právě druhé varianty tzn. strojem se středním výkonem 1450 kW. Celá práce je rozdělena na 4 hlavní kapitoly.

První kapitola se zabývá synchronním těžním strojem jako takovým. To znamená jeho použitím, vlastnostmi a konstrukčním provedením.

Druhá, nejrozsáhlejší kapitola se zabývá elektromagnetickým výpočtem, který zahrnuje určení hlavních rozměrů stroje, výpočet statorového vinutí, dimenzování magnetického obvodu, výpočet rotorového vinutí, kontrolní výpočty oteplení vinutí a výpočet ztrát a účinnosti.

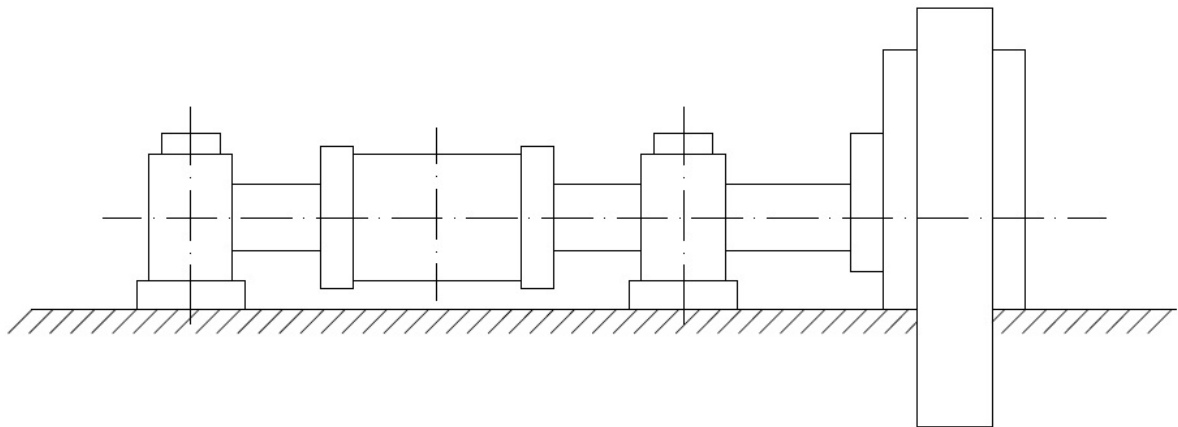
Ve třetí kapitole jsou řešeny mechanické výpočty, týkající se upevnění a zajištění pólů. Do toho spadá výpočet šroubů a výpočet momentového pera.

Poslední, tedy čtvrtá kapitola, je věnována porovnání nejdůležitějších hodnot mého výpočtu s výstupními hodnotami výpočetního programu, používaného ve výpočetním oddělení ČKD.

Nedílnou součástí práce je také výkresová dokumentace, která byla vytvořena ve spolupráci s ČKD. Výkresová dokumentace zahrnuje rozměrový výkres celého stroje, detail lamely pólu (plechu), detail celého pólu a detail rotoru. Pomocný 3D model a výkresová dokumentace byla vytvořena pomocí studentské verze programu Autodesk Inventor 2014 Professional.

1 Synchronní těžní motor

Společnost Howden ČKD Compressors s.r.o. v současné době pracuje na vývoji pomaluběžných synchronních motorů, které jsou napájeny z frekvenčních měničů. Stroj je buzen ze statického cizího budiče. Motor je umístěn ve strojovně, částečně zapuštěný v zemi. Je součástí soustrojí, které se skládá ze dvou ložiskových stojanů, navíjecího bubnu a motoru. Z obrázku 1.1 je zřejmé samotné uspořádání tohoto soustrojí. Navíjecí buben se nachází mezi dvěma ložiskovými stojany a motor je umístěn na převislém konci hřídele za jedním z ložiskových stojanů. Prostředí strojovny je průmyslové nevybušné s okolní teplotou $40^{\circ} C$. Během samotného výpočtu je mimo hlavních bodů zadání, nutno dodržet několik dalších zásad, z důvodu zachování výrobní typové řady. Jedná se například o velikost vzduchové mezery, vnitřní průměr statoru, počet drážek atd. Během výpočtu bude na tyto zásady upozorněno. Relativně velký výkon stroje a malé otáčky zajistí splnění požadavku na vysokou hodnotu momentu. Chladicí vzduch je přiváděn potrubím z nezávislého zdroje v podsklepení a je odváděn do okolního prostoru. Motor bude využit jako pohon pro důlní výtah, který slouží k přepravě materiálu a osob. [7]



Obrázek 1.1: Schéma soustrojí

2 Elektromagnetický výpočet

V následující kapitole bude v několika sekcích proveden elektromagnetický výpočet motoru. Postup výpočtu je inspirován výukovými materiály předmětu KEV/SES1, 2 - Stavba elektrických strojů 1 a 2.[6]

2.1 Základní hodnoty

Fázové napětí:

$$U_f = \frac{U}{\sqrt{3}} = \frac{6000}{\sqrt{3}} = 3464,10 \text{ V} \quad (2.1)$$

Počet pólů:

$$2p = 40 \quad (2.2)$$

Počet pól párů:

$$p = 20 \quad (2.3)$$

Fázový proud:

$$I_1 = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_s} = \frac{1450000}{\sqrt{3} \cdot 6000} = 139,53 \text{ A} \quad (2.4)$$

Z grafu v příloze č. 1 odečteme předběžnou hodnotu proudové hustoty a magnetické indukce:

Proudová hustota: $A = 54000 \text{ A/m}$

Magnetická indukce: $B_\delta = 0,83 \text{ T}$

Mezipólová rozteč:

$$t_p = \frac{\pi \cdot D_i}{2p} = \frac{\pi \cdot 3,46}{40} = 0,271 \text{ m}, \quad (2.5)$$

kde D_1 je zadaný vnitřní průměr statoru.

2.2 Návrh vinutí statoru

Při návrhu vinutí statoru vycházíme ze zadané hodnoty počtu drážek (2.6) a z počtu drážek na pól a fázi (2.7):

$$Q = 240 \quad (2.6)$$

$$q = \frac{Q}{2p \cdot m} = \frac{240}{40 \cdot 3} = 2 \quad (2.7)$$

Vzhledem k velikosti vnitřního průměru, bude stator dělen na segmenty. Jako další krok tedy musíme určit počet segmentů, překladové číslo a počet drážek na segment.

Vydeme z počtu drážek Q . Provedeme rozklad na prvočinitele:

$$Q = 240 = 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 5 \quad (2.8)$$

Dále musí platit:

$$Q = k \cdot n_s \cdot Q_{pr} \quad (2.9)$$

Na základě rovnic (2.8) a (2.9) lze rozhodnout o počtu segmentů n_s , překladovém čísle k a počtu drážek na překlad Q_{pr} . Jedna z možných variant je následující:

$$k=2$$

$$Q_{pr}=8$$

$$n_{sg}=15$$

Nyní, podle rovnice (2.10) určíme předběžný počet závitů v sérii:

$$N'_s = \frac{\pi \cdot D_i \cdot A}{2 \cdot m \cdot I_1} = \frac{\pi \cdot 3,46 \cdot 54000}{2 \cdot 3 \cdot 139,53} = 701,13 \quad (2.10)$$

A z rovnice (2.11) určíme přibližný počet vodičů v drážce:

$$n'_d = \frac{a_{st} \cdot N'_s}{p \cdot q} = \frac{1 \cdot 701,13}{20 \cdot 2} = 17,5, \quad (2.11)$$

kde a_{st} je počet paralelních větví každé fáze střídavého vinutí. Volím $a_{st} = 1$. U dvouvrstvého vinutí musí být n_d číslo sudé. Proto volím $n_d = 18$.

Skutečný počet závitů v sérii jedné fáze tedy bude:

$$N_s = \frac{n_d \cdot p \cdot q}{a_{st}} = \frac{18 \cdot 20 \cdot 2}{1} = 720, \quad (2.12)$$

a z toho lze určit skutečnou hodnotu obvodové proudové hustoty:

$$A = \frac{2 \cdot m \cdot I_1}{\pi \cdot D_i} \cdot N_s = \frac{2 \cdot 3 \cdot 139,53}{\pi \cdot 3,46} \cdot 720 = 55441,12 \text{ A/m} \quad (2.13)$$

Parametry vinutí:

Počet drážek	Q=240
Počet pólů	2p=40
Počet fází	m=3
Matematický počet fází	m'=6
Počet drážek na pól a fázi	q=2
Typ vinutí	smyčkové

Počet drážek na pól:

$$Q_p = \frac{Q}{2p} = \frac{240}{40} = 6 \quad (2.14)$$

Cívkový krok v počtu drážek:

Cívkový krok v počtu drážek volím s ohledem na zkrácení kroku.

$$y_{1d} = 5 \quad (2.15)$$

Poměrné zkrácení kroku:

$$\beta = \frac{y_{1d}}{Q_p} = \frac{5}{6} = 0,83 \quad (2.16)$$

Krok na komutátoru:

$$y_k = \frac{\epsilon \cdot K \pm a_{ss}}{p} = \frac{0 \cdot 240 + 20}{20} = 1 \quad (2.17)$$

Kde K odpovídá počtu drážek, ϵ a znaménko + zohledňuje volbu smyčkového nekříženého vinutí, a_{ss} bylo taktéž zvoleno s ohledem na smyčkové vinutí.

Přední cívkový krok:

$$y_1 = 2 \cdot u \cdot y_{1d} + 1 = 2 \cdot 1 \cdot 5 + 1 = 11 \quad (2.18)$$

Zadní cívkový krok:

$$y_2 = 2 \cdot y_k - y_{1d} = 2 \cdot 1 - 5 = -3 \quad (2.19)$$

Střídavé vinutí:

Počet skupin vinutí:

$$a_{ss} \cdot m' = 20 \cdot 6 = 120 \quad (2.20)$$

Počet skupin v jedné fázi:

$$\frac{a_{ss} \cdot m'}{m} = \frac{20 \cdot 6}{3} = 40 \quad (2.21)$$

Počet cívek ve skupině:

$$\frac{Q}{a_{ss} \cdot m'} = \frac{240}{20 \cdot 6} = 2 \quad (2.22)$$

Činitel vinutí 1. harmonické:

$$k_{v1} = \sin\left(\beta \cdot \frac{\pi}{2}\right) \frac{\sin\left(\frac{\pi}{m'}\right)}{n \cdot \sin\left(\frac{\pi}{m' \cdot n}\right)} = \sin\left(0,833 \cdot \frac{\pi}{2}\right) \frac{\sin\left(\frac{\pi}{6}\right)}{2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{6 \cdot 34}\right)} = 0,9317 \quad (2.23)$$

2.3 Výpočet hlavních rozměrů

Výpočtem hlavních rozměrů se rozumí určit vnitřní průměr statorového svazku a jeho efektivní délku. Vyjdeme z výkonové rovnice:

$$P = C \cdot D_i^2 \cdot l_e \cdot n, \quad (2.24)$$

kde C je Essonův činitel, n_s synchronní otáčky a l_e je efektivní délka stroje.

$$C = \frac{\pi^2}{60 \cdot \sqrt{2}} \cdot A \cdot B_\delta \cdot k_v = \frac{\pi^2}{60 \cdot \sqrt{2}} \cdot 55,441 \cdot 0,83 \cdot 0,9317 = 4,99 \text{ kW/m}^3 \text{ot/min}, \quad (2.25)$$

Z výkonové rovnice (2.24) vyjádříme l_e :

$$l_e = \frac{S}{C \cdot D_i^2 \cdot n} = \frac{1450}{4,99 \cdot 3,46^2 \cdot 34} = 0,7139 \text{ m} \quad (2.26)$$

Stator bude rozdělen na několik menších paketů o šířce $s_p = 0,05 \text{ m}$ a ty budou odděleny radiálními kanály o předepsané šířce $s_k = 10 \text{ mm}$.

Počet paketů:

$$i = \frac{l_e}{s_p} = \frac{0,7139}{0,05} = 14,278 \Rightarrow 14 \quad (2.27)$$

Počet kanálů:

$$i_k = i - 1 = 14 - 1 = 13 \quad (2.28)$$

Celková délka induktu (včetně radiálních kanálů):

$$L = l_e + s_k \cdot i_k = 0,7139 + 0,01 \cdot 13 = 0,844 \text{ m} \quad (2.29)$$

2.4 Návrh drážky

Dle zadání ČKD bude na statoru použita drážka typu M. Z toho vyplývá, že zuby budou lichoběžníkového tvaru. Ostatní druhy drážek, včetně typu M, jsou zobrazeny v příloze č. 2.

Nejprve je potřeba stanovit drážkovou rozteč:

$$t_{d1} = \frac{\pi \cdot D_1}{Q} = \frac{\pi \cdot 3460}{240} = 45,29 \text{ mm} \quad (2.30)$$

Šířka zubu je potom dána rovnicí (2.31).

$$z_1 = \frac{B_\delta \cdot t_{d1}}{B'_{z1} \cdot k_{Fe}} = \frac{0,83 \cdot 45,29}{1,7 \cdot 0,92} = 24,04 \text{ mm} \quad (2.31)$$

Kde B'_{z1} je zvolená hodnota magnetické indukce v hlavě zubu a k_{Fe} je zvolená hodnota činitele plnění železa pro elektrotechnické plechy o tloušťce 0,5 mm.

Šířka drážky:

$$b_d = t_{d1} - z_1 = 45,29 - 24,04 = 21,26 \text{ mm} \quad (2.32)$$

Nejbližší normalizovaná šířka drážky:

$$b_d = 21,5 \text{ mm} \quad (2.33)$$

Této normalizované šířce drážky odpovídají zbývající rozměry drážky:

$$h_0 = 1 \text{ mm}$$

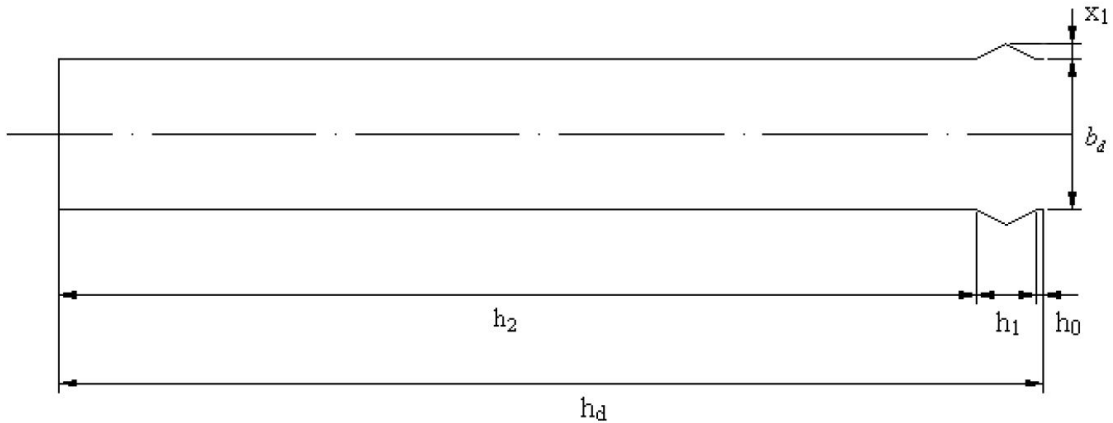
$$h_1 = 9 \text{ mm}$$

$$x_1 = 2,45 \text{ mm}$$

Normalizované rozměry byly odečteny z tabulky v příloze č. 3. Nákres drážky s jednotlivými rozměry je na obrázku 2.1.

Skutečná šířka zubu:

$$z_1 = t_{d1} - b_d = 45,29 - 21,5 = 23,79 \text{ mm} \quad (2.34)$$



Obrázek 2.1: Statorová drážka [4]

Dále je potřeba navrhnout izolaci vinutí a rozměr holého vodiče. Při návrhu jsem vycházel z technické dokumentace zapůjčené z ČKD (příloha č. 12) která, popisuje izolaci obdenného stroje při stejném napětí.

Při návrhu izolace je nutné brát v úvahu napěťové špičky, které se vyskytují ve stejnosměrném meziobvodu měniče frekvence. Tyto špičky dosahují hodnot až 11 kV. A na toto napětí se také bude dimenzovat izolační systém statorového vinutí.[7]

Průřez vodiče:

Volím proudovou hustotu $\sigma_{Cu1} = 4 \text{ A/mm}^2$

$$S'_{Cu1} = \frac{I_1}{a_{st} \cdot \sigma_{Cu1}} = \frac{139,5}{1 \cdot 4} = 39,4 \text{ mm}^2 \quad (2.35)$$

Šířka holého vodiče:

$$b_v = b_d - \text{izolace} = 21,5 - 7,42 = 14,08 \text{ mm} \quad (2.36)$$

Výška holého vodiče:

$$h_v = \frac{S'_{Cu1}}{b_v} = \frac{39,9}{14} = 2,85 \text{ mm} \quad (2.37)$$

Těmto hodnotám odpovídá vodič 14 x 2,5 mm, tedy průřez 35 mm^2 , odečtený z tabulky normalizovaných průřezů vodičů v příloze č. 4.

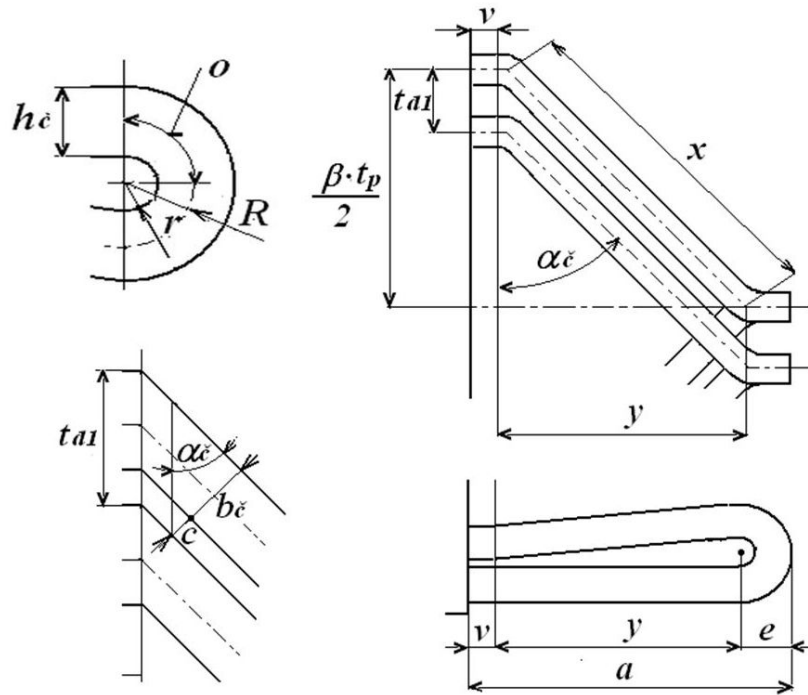
Veškeré rozměry drážky jsou spočteny a zaneseny v tabulce 2.1. A jsou zakótovány na obrázku 2.1.

Název	Šířka [mm]	Hloubka [mm]
Protionizační páska	$0,1 \cdot 2 = \mathbf{0,2}$	$0,1 \cdot 4 = \mathbf{0,4}$
Hlavní izolace	$2,5 \cdot 2 = \mathbf{5}$	$2,5 \cdot 4 = \mathbf{10}$
Stažení vodičů	$0,15 \cdot 2 = \mathbf{0,3}$	$0,15 \cdot 4 = \mathbf{0,6}$
Epoxidový lak	$0,46 \cdot 2 = \mathbf{0,92}$	$2 \cdot 18 \cdot 0,46 = \mathbf{16,56}$
Proložení	–	$8 \cdot 2 \cdot 0,09 = \mathbf{1,44}$
Součet izolace	6,42	29
Montážní vůle	$2 \cdot 0,5 = \mathbf{1}$	1
Vložka pod klín	-	1
Mezivrstva	-	3
Vložka na dno	-	1
Holý vodič	14	$2,5 \cdot 18 = \mathbf{45}$
Rozměr drážky bez klínu	21,5	80
Celkový rozměr drážky	21,5	$80 + 10 = \mathbf{90}$

Tabulka 2.1: Návrh izolace a drážky

2.5 Odpor a rozptylová reaktance statorového vinutí

Jako první krok při určení odporu a rozptylové reaktance statorového vinutí je nutné určit celkovou délku jedné cívky.



Obrázek 2.2: Nákres čela vinutí [6]

Úhel sklonu válcového vinutí:

$$\sin \alpha_c = \frac{b_d + c}{t_{d1}} = \frac{21,5 + 7}{45,29} = 0,629 \quad (2.38)$$

$$\alpha = \arcsin 0,629 = 39,98^\circ \quad (2.39)$$

Vzdálenost mezi čely:

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

$$x = \frac{\beta \cdot t_p}{2 \cdot \cos \alpha_c} = \frac{0,833 \cdot 271,7}{2 \cdot \cos 38,98} = 145,6 \text{ mm} \quad (2.41)$$

$$y = \frac{\beta \cdot t_p}{2} \cdot \tan \alpha_c = \frac{0,833 \cdot 271,7}{2} \cdot \tan(38,98) = 91,6 \text{ mm} \quad (2.42)$$

Kde x a y jsou vzdálenosti vyznačené na obrázku 2.2

$$h_c = \frac{h_2}{2} = \frac{80}{2} = 40 \text{ mm} \quad (2.43)$$

Kde h_2 je hloubka drážky bez klínu a h_c je výška cívky.

Střední poloměr oka:

$$R = r + \frac{h_c}{2} = 10 + \frac{40}{2} = 30 \text{ mm} \quad (2.44)$$

Volím r z rozsahu (6 - 10) mm. [6]

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

Tabulka 2.2: Výběh cívky z drážky [6]

Vyložení čel:

$$E = v + y + r + h_c = 50 + 91,6 + 10 + 40 = 191,6 \text{ mm} \quad (2.45)$$

Kde v je výběh cívky z drážky, odečtený z tabulky 2.2. Pro 6 kV volím 50 mm.

Délka čela:

$$l_c = 2 \cdot \left(v + x + \frac{\pi \cdot R}{2} \right) = 2 \cdot \left(50 + 145,6 + \frac{\pi \cdot 30}{2} \right) = 485,45 \text{ mm} \quad (2.46)$$

Délka vodiče:

$$l_v = L + l_c = 0,844 + 0,48545 = 1,33 \text{ m} \quad (2.47)$$

Odpor jedné fáze při střídavém proudu při 20°:

$$R'_{1/20} = \rho_{Cu} \cdot \frac{2 \cdot l_v \cdot N_s}{a_{st} \cdot S_{Cu1}} = \frac{1}{56} \cdot \frac{2 \cdot 1,33 \cdot 720}{1 \cdot 34,88} = 0,99 \, \Omega \quad (2.48)$$

Odpor vinutí při 75°:

$$R_{1/75} = 1,22 \cdot R'_{1/20} = 1,22 \cdot 0,99 = 1,2 \, \Omega \quad (2.49)$$

Procentní hodnota úbytku napětí na činném odporu:

$$u_r = \frac{R_{1/75} \cdot I_1}{U_f} \cdot 100 = \frac{1,2 \cdot 139,5}{3464,1} = 4,9 \, \% \quad (2.50)$$

Rozptylová reaktance statorového vinutí:

$$A_\sigma = \frac{h'_2}{3 \cdot b_d} + \frac{h'_1}{b_d} = \frac{38,5}{3 \cdot 21,5} + \frac{13,21}{21,5} = 1,2113 \quad (2.51)$$

$$\begin{aligned} B_\sigma &= \frac{l_c}{l_e} \cdot q \cdot \left(0,187 + 0,166 \cdot \frac{t_p}{l_c} \cdot \beta \right) = \\ &= \frac{0,4865}{0,7324} \cdot 2 \cdot \left(0,187 + 0,166 \cdot \frac{0,2717}{0,4865} \cdot 0,833 \right) = 0,351 \end{aligned} \quad (2.52)$$

$$C_\sigma = \ln \left(1 + \frac{\pi \cdot z_1}{2 \cdot b_d} \right) = \ln \left(1 + \frac{\pi \cdot 23,7913}{2 \cdot 21,5} \right) = 1,007 \quad (2.53)$$

$$\begin{aligned} X_\sigma &= \frac{(4 \cdot \pi)^2 \cdot f \cdot N_s^2}{p \cdot q} \cdot l_e \cdot [A_\sigma + B_\sigma + C_\sigma] \cdot 10^{-7} = \\ &= \frac{(4 \cdot \pi)^2 \cdot 11,33 \cdot 720^2}{20 \cdot 2} \cdot 0,7324 \cdot [1,2113 + 0,351 + 1,007] \cdot 10^{-7} = \\ &= 4,36 \, \Omega \end{aligned} \quad (2.54)$$

Procentní hodnota úbytku napětí na rozptylové reaktanci:

$$u_\sigma = \frac{X_\sigma \cdot I_1}{U_f} \cdot 100 = \frac{4,36 \cdot 139,5}{3464,1} = 17,57 \, \% \quad (2.55)$$

Z výsledných hodnot úbytků napětí na činném odporu a rozptylové reaktanci je vidět, že vychází poněkud větší. Je ale potřeba si uvědomit, že stroj má počet závitů v sérii N_s roven 720. Tato skutečnost bude mít jistě vliv na výsledné ztráty a tím pádem i účinnost stroje.

2.6 Návrh magnetického obvodu

Velikost magnetického toku určíme z rovnice pro indukované napětí (2.56).

$$U_f = 4,44 \cdot N_s \cdot \Phi \cdot f \cdot k_v \quad (2.56)$$

Magnetický tok:

$$\Phi = \frac{U_f}{4,44 \cdot N_s \cdot f \cdot k_v} = \frac{3464,1}{4,44 \cdot 11,33 \cdot 720 \cdot 0,9317} = 0,1 \text{ Wb} \quad (2.57)$$

Dále je potřeba určit amplitudu základní harmonické magnetického napětí reakce kotvy (2.58) a její podélnou (2.60) a příčnou složku (2.61).

Magnetické napětí reakce kotvy

$$F'_a = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{1}{C_1} \cdot A \cdot t_p \cdot k_{v1} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{1}{1,03} \cdot 54000 \cdot 0,271 \cdot 0,9317 = 5958,9 \text{ A} \quad (2.58)$$

Kde C_1 je činitel první harmonické magnetické indukce ve vzduchové mezeře a určí se z rovnice 2.59.

$$C_1 = a \cdot b = 1,145 \cdot 0,901 = 1,03 \quad (2.59)$$

Koeficienty a a b určíme z tabulky v příloze č. 5

$$F_{d1} = C_{d1} \cdot F'_a = 0,8748 \cdot 5958,9 = 5212,84 \text{ A} \quad (2.60)$$

$$F_{q1} = C_{q1} \cdot F'_a = 0,4205 \cdot 5958,9 = 2505,71 \text{ A} \quad (2.61)$$

$$C_{d1} = e \cdot f = 0,81 \cdot 1,08 = 0,8748 \quad (2.62)$$

$$C_{q1} = g \cdot h = 1,45 \cdot 0,29 = 0,4205 \quad (2.63)$$

Kde e, f, g, h určíme z tabulek v příloze č. 6.

Dalším krokem při návrhu magnetického obvodu je určení rozměrů jeho jednotlivých částí. V tomto případě se jedná o rozměry pólu a pólového nástavce a také výšku jádra rotoru. Rozměry jádra statoru jsou zadány ČKD. [7]

Předběžná výška pólu:

$$h_p = 0,3 \cdot t_p = 0,3 \cdot 0,2717 = 81,5 \text{ mm} \quad (2.64)$$

Výška pólového nástavce:

$$h_n = 0,1 \cdot t_p = 0,1 \cdot 0,2717 = 27 \text{ mm} \quad (2.65)$$

Šířka pólu:

Pro tělo pólu volím magnetickou indukci 1,45 T.

$$b_p = \frac{(1+v) \cdot \Phi}{B_p \cdot L_p} = \frac{(1+0,15) \cdot 0,1}{1,45 \cdot 0,844} = 94 \text{ mm} \quad (2.66)$$

Kde L_p je délka těla pólu, která odpovídá celkové délce stroje L .

Šířka pólového nástavce:

Volím činitel pólového krytí $\alpha = 0,65$

$$b_n = \alpha \cdot t_p = 0,65 \cdot 0,2717 = 176 \text{ mm} \quad (2.67)$$

Výška jádra rotoru:

Magnetickou indukci pro jho statoru volím 1,1 T.

$$h_{jr} = \frac{(1+v) \cdot \Phi}{2 \cdot B_{jr} \cdot L_R} = \frac{(1+1,15) \cdot 0,1}{2 \cdot 1,1 \cdot (0,844 + 0,082)} = 105,5 \text{ mm} \quad (2.68)$$

Kde L_r délka pólu prodloužená o přesah budící cívky.

Výška jádra statoru:

$$h_{js} = \frac{D_{js} - 2 \cdot h_d}{2} = \frac{(3850 - 3460) - 2 \cdot 90}{2} = 105 \text{ mm} \quad (2.69)$$

Rovnice 2.70, 2.71 a 2.72 vyjadřují délky siločar jednotlivých částí magnetického obvodu.

Pól:

$$l_p = h_p + h_n = 0,0815 + 0,027 = 108,5 \text{ mm} \quad (2.70)$$

Jádro rotoru:

$$l_r = \frac{\pi \cdot [D_i - 2 \cdot (\delta + h_p + h_n)]}{4 \cdot p} = \frac{\pi \cdot [3,46 - 2 \cdot (0,008 + 0,0815 + 0,027)]}{4 \cdot 20} = 126,7 \text{ mm} \quad (2.71)$$

Jádro statoru:

$$l_s = \frac{\pi \cdot [D_i + 2 \cdot (h_d + h_{js})]}{4 \cdot p} = \frac{\pi [3,46 + 2 \cdot (0,09 + 0,105)]}{4 \cdot 20} = 151,2 \text{ mm} \quad (2.72)$$

2.7 Charakteristika naprázdno

$$\frac{b_d}{z_1} = \frac{21,5}{23,79} = 0,9 \quad (2.73)$$

$$\frac{b_d}{\delta} = \frac{21,5}{8} = 2,69 \quad (2.74)$$

Pomocí dvou předchozích rovnic (2.73 a 2.74) získáme hodnotu $k_{cd} = 1,2$, která byla odečtena z grafu v příloze č. 7.

Carterův činitel respektující vliv radiálních ventilačních kanálů:

$$k_{ck} = \frac{1}{1 + \frac{\delta}{2+\delta} \cdot \frac{s_k \cdot i}{l_e}} = \frac{1}{1 + \frac{8}{2+8} \cdot \frac{10 \cdot 13}{732,4}} = 0,8728 \quad (2.75)$$

Výsledná hodnota Carterova činitele:

$$k_c = k_{ck} \cdot k_{cd} = 0,8728 \cdot 1,2 = 1,04736 \quad (2.76)$$

Magnetické napětí na vzduchové mezeře:

$$F_\delta = 0,8 \cdot k_c \cdot \delta \cdot B_\delta \cdot 10^6 = 0,8 \cdot 1,04736 \cdot 0,008 \cdot 0,83 \cdot 10^6 = 5563,58 \text{ A} \quad (2.77)$$

Výpočet charakteristiky naprázdno je uveden v tabulkách v příloze č. 14 a 15. Charakteristika naprázdno je zobrazena v příloze č. 13.

2.8 Návrh budícího vinutí

Z charakteristiky naprázdno bylo odečteno magnetické budící napětí $F_b = 9200 A$.

Předběžná střední délka závitů budící cívky:

$$l_{bs} = 2 \cdot \left(L_p + b_p + \frac{b_n - b_p}{2} \right) = 2 \cdot \left(0,8624 + 0,094 + \frac{0,1766 - 0,094}{2} \right) = 1,995 m \quad (2.78)$$

Pro budící vinutí jsem zvolil napětí 220 V. Tomu odpovídá průřez vodiče budící cívky:

$$S_{Cub} = \frac{\rho_{Cu} \cdot l_{bs} \cdot 2 \cdot p \cdot F_b}{0,9 \cdot U_b} = \frac{\frac{1}{56} \cdot 2 \cdot 40 \cdot 9200}{0,9 \cdot 220} = 66,35 mm^2 \quad (2.79)$$

Velikost vodiče bude $h_{bv} \times b_{bv}$ ($h_{bvi} \times b_{bvi}$): 12 x 5,5 mm (12,46 x 5,96 mm)

Volím proudovou hustotu $\sigma_{Cub} = 2 A/mm^2$

Budící proud:

$$I_b = \sigma_{Cub} \cdot S_{Cub} = 2 \cdot 66,38 = 132,7 A \Rightarrow 133 A \quad (2.80)$$

Počet závitů budící cívky:

$$N_b = \frac{F_b}{I_b} = \frac{9200}{133} = 69,17 \Rightarrow 70 z \quad (2.81)$$

Přesah pólového nástavce:

$$a_n = \frac{b_n - b_p}{2} = \frac{0,1766 - 0,0943}{2} = 0,415m \quad (2.82)$$

Počet závitů vedle sebe:

Mezi tělo pólu a cívku je potřeba umístit izolaci tzv. kostřičku. Pro tento případ je použita izolace o tloušťce $t_k = 5 mm$

$$n'_p = \frac{a_n - t_k}{h_{bvi}} = \frac{41,5 - 5}{12,46} = 2,9 \Rightarrow n_p = 3 \quad (2.83)$$

Šířka cívký:

$$b_{bc} = h_{bvi} \cdot n_p = 12,46 \cdot 3 = 37,38 \text{ mm} \quad (2.84)$$

Počet závitů nad sebou:

$$N_p' = \frac{N_p}{n_p} = \frac{70}{3} = 23,33 \Rightarrow N_p = 24 \quad (2.85)$$

Výška cívký:

$$h_{bc} = N_p \cdot b_{bvi} = 24 \cdot 5,96 = 143,04 \text{ mm} \quad (2.86)$$

Výška těla pólu:

$$h_p = h_{bc} + 2 \cdot t_k = 143,04 + 2 \cdot 5 = 153,04 \text{ mm} \quad (2.87)$$

2.9 Návrh tlumiče

Vzhledem k tomu, že navrhovaný motor bude napájen a tedy i rozbírán pomocí měniče frekvence, navrhovaný tlumič zde bude plnit pouze funkci tlumiče nesynchronních složek momentu. Určení průřezu tyčí tlumiče vychází z množství mědi statorového vinutí.[1]

Průřez statorového vinutí na jeden pól:

$$S_{Cubv} = 3 \cdot q \cdot n_d \cdot S_{Cu} = 3 \cdot 2 \cdot 18 \cdot 35 = 3780 \text{ mm}^2 \quad (2.88)$$

Průřez tyčí na jeden pól:

$$S_{TL} = 0,2 \cdot S_{Cubv} = 0,2 \cdot 3780 = 756 \text{ mm}^2 \quad (2.89)$$

Tlumič bude tvořen sedmi tyčemi, které budou umístěny v polouzavřených drážkách.

Průřez jedné tyče:

$$S_T = \frac{S_{TL}}{7} = \frac{756}{7} = 108 \text{ mm}^2 \quad (2.90)$$

Průměr tyče:

$$d_T = 2 \cdot \sqrt{\frac{S_T}{\pi}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{108}{\pi}} = 11,7 \text{ mm} \Rightarrow 11 \text{ mm} \quad (2.91)$$

Tyče budou spojeny měděnou páskou o průřezu 3 x 40 mm.

2.10 Orientační výpočet oteplení budící cívky

Nyní, když je navržena cívka budícího vinutí, je potřeba vypočítat její oteplení při dané proudové hustotě a ověřit si tak, že tato hodnota odpovídá předepsanému oteplení třídy B.

Vnější obvod budící cívky:

$$\begin{aligned} l_{be} &= 2 \cdot [L_p + b_p + 2 \cdot (b_{bc} + t_k)] = \\ &= 2 \cdot [0,8624 + 0,094 + 2 \cdot (0,03738 + 0,005)] = 2,08 \text{ m} \end{aligned} \quad (2.92)$$

Ochlazovací povrch všech cívek:

$$O_{2pc} = h_{bc} \cdot l_{bc} \cdot 2 \cdot p = 0,143 \cdot 2,08 \cdot 40 = 11,91 \text{ m}^2 \quad (2.93)$$

Střední obvod budící cívky:

$$\begin{aligned} l_{bs} &= 2 \cdot \left[L_p + b_p + 4 \cdot \left(t_k + \frac{b_{bc}}{2} \right) \right] = \\ &= 2 \cdot \left[0,8624 + 0,094 + 4 \cdot \left(0,005 + \frac{0,03738}{2} \right) \right] = 2,1 \text{ m} \end{aligned} \quad (2.94)$$

Odpor všech cívek budícího vinutí:

$$R_{b/75} = 1,22 \cdot \rho \cdot \frac{l_{bs} \cdot N_b \cdot 2 \cdot p}{S_{Cub}} = 1,22 \cdot \frac{1}{56} \cdot \frac{2,1 \cdot 70 \cdot 40}{66} = 1,9 \Omega \quad (2.95)$$

Ztráty v budícím vinutí:

$$\Delta P_{Cub} = R_{b/75} \cdot I_b^2 = 1,9 \cdot 133^2 = 32714 \text{ W} \quad (2.96)$$

Oteplení budící cívky:

$$\Delta \vartheta_{Cub} = \frac{1,18 \cdot \Delta P_{Cub}}{\alpha_p \cdot O_{2pc}} = \frac{1,18 \cdot 32714}{80 \cdot 11,91} = 40,49 \text{ }^\circ\text{C} \quad (2.97)$$

Kde α je zvolený součinitel přestupu tepla.

Je vidět, že hodnota oteplení vyhovuje s celkem velkou rezervou. Pro izolaci třídy B do $80 \text{ }^\circ\text{C}$. Tzn., že by bylo možné zvětšit proudovou hustotu na $2,5 \text{ A/mm}^2$. Toto zvětšení by ale mělo za následek zvýšení ztrát a tím pádem snížení účinnosti. Nízká hodnota oteplení je důsledkem specifických rozměrů stroje a to především malé délky.

2.11 Výpočet kroužků a kartáčů

Přívod budícího proudu do statorového vinutí bude realizován pomocí kluzného kontaktu kartáčů a kroužků. Zdrojem budícího proudu je statický elektronický budič.

Volím kartáče typu: EK24 Elektrografit

- Proudová hustota - $0,1 \text{ A/mm}^2$
- Maximální obvodová rychlost - 40 m/s
- Měrný tlak - 18 kPa
- Celkový úbytek napětí - $2,1 \text{ V}$

Celková plocha kartáčů:

$$S_k = \frac{I_b}{\sigma_{Cub}} = \frac{133}{0,1} = 1330 \text{ mm}^2 \quad (2.98)$$

Volím kartáče: $b_k = 20 \text{ mm}$ a $l_k = 10 \text{ mm}$ (Příloha č. 11) $\Rightarrow S_{K1} = 200 \text{ mm}^2$

Počet kartáčů:

$$i_k = \frac{S_K}{S_{K1}} = \frac{1330}{200} = 6,65 \Rightarrow 7 \quad (2.99)$$

Průměr hřídele v místě přívodu mechanické energie:

$$d_h = 0,135 \cdot \sqrt[3]{\frac{P}{n}} = 0,135 \cdot \sqrt[3]{\frac{1450}{34}} = 0,47 \text{ m} \quad (2.100)$$

Vnější průměr kroužku:

$$D_k = 1,3 \cdot d_H = 1,3 \cdot 0,47 = 0,61 \text{ m} \quad (2.101)$$

Rozteč kartáčů:

$$t_{kr} = \frac{\pi \cdot D_K}{2 \cdot i_k} = \frac{\pi \cdot 0,61}{2 \cdot 7} = 0,137 \text{ m} \quad (2.102)$$

Obvodová rychlost kroužků:

$$v_k = \frac{\pi \cdot D_K \cdot n_{max}}{60} = \frac{\pi \cdot 0,61 \cdot 40,8}{60} = 1,3 \text{ m/s} \quad (2.103)$$

2.12 Ztráty a účinnost

Poslední částí elektromagnetického výpočtu je určení ztrát a účinnosti motoru. Vzhledem k atypické konstrukci stroje a vyšším hodnotám činného odporu a rozptylové reaktance statorového vinutí lze očekávat zhoršenou účinnost motoru.

Jouleovy ztráty statorového vinutí:

$$\Delta P_{Cu} = m \cdot R_{1/75} \cdot I^2 = 3 \cdot 1,2 \cdot 139,53^2 = 71067 \text{ W} \quad (2.104)$$

Jouleovy ztráty v budícím vinutí:

$$\Delta P_{Cub} = R_{Cub} \cdot I_b^2 = 1,9 \cdot 133^2 = 32714 \text{ W} \quad (2.105)$$

Hmotnost statorového svazku plechů:

$$\begin{aligned} m_{FeS} &= \frac{\pi}{4} \cdot (D_{je}^2 - D_3^2) \cdot l_e \cdot k_{Fe} \cdot \rho_{Fe} = \\ &= \frac{\pi}{4} \cdot (3,85^2 - 3,61^2) \cdot 0,7139 \cdot 0,92 \cdot 7800 = 7390,4 \text{ kg} \end{aligned} \quad (2.106)$$

Kde D_{je} je hodnota vnějšího průměru statoru zadaná ČKD (3850 mm), D_3 je odečteno z tabulky v příloze č. 14 a ρ_{Fe} je hustota železa.

Ztráty v jádru statoru:

$$\begin{aligned} \Delta P_{Fej} &= 1,8 \cdot \Delta p_{Fe} \cdot B_{js}^2 \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} \cdot m_{FeS} = \\ &= 1,8 \cdot 1,8 \cdot 1,3^2 \cdot \left(\frac{11,33}{50}\right)^{1,3} \cdot 7390,4 = 5874,05 \text{ W} \end{aligned} \quad (2.107)$$

Kde Δp_{Fe} je ztrátové číslo použitých plechů a B_{js} je hodnota magnetické indukce v jádru statoru.

Hmotnost zubové vrstvy:

$$m_{Fez} = Q \cdot z_2 \cdot h_d \cdot l_e \cdot k_{Fe} \cdot \rho_{Fe} = 240 \cdot 0,023 \cdot 0,09 \cdot 0,7139 \cdot 0,92 \cdot 7800 = 2700,8 \text{ kg} \quad (2.108)$$

Kde z_2 je střední šířka zubu odečtená z tabulky v příloze č. 14.

Ztráty v zubové vrstvě:

$$\Delta P_{Fez} = 2 \cdot \Delta p_{Fez} \cdot B_{z2}^2 \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} \cdot m_{Fez} = 2 \cdot 1,8 \cdot 1,67^2 \cdot \left(\frac{11,33}{50}\right)^{1,3} \cdot 2700,8 = 3936,1 \text{ W} \quad (2.109)$$

Hodnota B_{z2} odpovídá magnetické indukci ve středu zubu.

Povrchové ztráty:

$$\begin{aligned} \Delta P_p &= \frac{\pi}{2} \cdot D_i \cdot \alpha \cdot L_p \cdot k_0 \cdot \left(\frac{Q \cdot n}{10000}\right)^{1,5} \cdot (t_{d1} \cdot \beta_p \cdot 1000 \cdot B_\delta \cdot k_c)^2 = \\ &= \frac{\pi}{2} \cdot 3,46 \cdot 0,65 \cdot 0,8624 \cdot 4,6 \cdot \left(\frac{240 \cdot 34}{10000}\right)^{1,5} \cdot \\ &\quad \cdot (0,045 \cdot 0,21 \cdot 1000 \cdot 0,83 \cdot 1,047)^2 = \\ &= 710,8 \text{ W} \end{aligned} \quad (2.110)$$

Kde k_0 a β_p jsou zvolené činitele povrchových ztrát.

Přídavné ztráty:

$$\Delta P_{Pr} = 0,003 \cdot P = 0,003 \cdot 1450000 = 4350 \text{ W} \quad (2.111)$$

Mechanické ztráty:

$$\Delta P_{Mech} = v_o^{2,5} \cdot D_1 \cdot \sqrt{l_e} = 6,15^{2,5} \cdot 3,46 \cdot \sqrt{0,7139} = 174,2 \text{ W} \quad (2.112)$$

$$v_o = \frac{\pi \cdot D_1 \cdot n}{60} = \frac{\pi \cdot 3,46 \cdot 34}{60} = 6,15 \text{ m/s} \quad (2.113)$$

Celkové ztráty:

$$\begin{aligned} \Delta P_c &= \Delta P_{Cu} + \Delta P_{Cub} + \Delta P_{Fej} + \Delta P_{Fez} + \Delta P_p + \Delta P_{Pr} + \Delta P_{Mech} = \\ &= 71067 + 32714 + 5874,05 + 3936,1 + 710,8 + 4350 + 174,2 = 118,93 \text{ kW} \end{aligned} \quad (2.114)$$

Množství vzduchu potřebného k odvedení ztrát:

$$V_{vz} = 40 \cdot \Delta P_c = 40 \cdot 118,93 = 4757,2 \text{ l/s} \quad (2.115)$$

Účinnost:

$$\eta = 100 \cdot \left(1 - \frac{\Delta P_c}{P + \Delta P_c} \right) = 100 \cdot \left(1 - \frac{118930}{1450000 + 118930} \right) = 92,42 \% \quad (2.116)$$

Z rovnice 2.116 je vidět, že účinnost motoru vyšla dle předpokladu nižší, než bývá u synchronních strojů zvykem. Možnou příčinou je již výše zmíněná hodnota činného odporu a rozptylové reaktance statorového vinutí.

3 Mechanické výpočty

Tato kapitola se zabývá zjednodušenými mechanickými výpočty, které se zabývají upevněním pólu a návrhem momentového pera, pro přenos momentu z rotoru na pól. V obou případech (šrouby a pero), se jedná o nenormalizované součásti a proto jsou navrhovány speciálně pro tento stroj.

3.1 Výpočet sil působících na pól

Maximální otáčky:

$$n_{max} = 1,2 \cdot n = 1,2 \cdot 34 = 40,8 \text{ ot/min} \quad (3.1)$$

Maximální obvodová rychlost:

$$\omega_{max} = \frac{\pi \cdot n_{max}}{30} = \frac{\pi \cdot 40,8}{30} = 4,27 \text{ rad/s} \quad (3.2)$$

Hmotnost budící cívky:

$$m_{Cub} = \rho_C \cdot l_{bs} \cdot N_b \cdot S_{Cub} = 8900 \cdot 2,1 \cdot 72 \cdot 66,235 \cdot 10^{-6} = 89,28 \text{ kg} \quad (3.3)$$

Hmotnost pólového nástavce:

$$m_n = \rho_{Fe} \cdot L_p \cdot h'_n \cdot b_n = 7800 \cdot 0,8624 \cdot 0,0272 \cdot 0,1766 = 32,3 \text{ kg} \quad (3.4)$$

Kde h'_n je střední výška pólového nástavce.

Hmotnost těla pólu:

$$m_p = \rho_{Fe} \cdot L_p \cdot h_p \cdot b_p = 7800 \cdot 0,8624 \cdot 0,153 \cdot 0,0943 = 97,05 \text{ kg} \quad (3.5)$$

Síla od vlastní hmotnosti pólu:

$$\begin{aligned} F_m &= (m_{Cub} + m_n + m_p) \cdot g = \\ &= (89,28 + 32,3 + 97,05) \cdot 9,81 = 2144,76 \text{ N} \end{aligned} \quad (3.6)$$

Odstředivá síla:

$$\begin{aligned}
 F_P &= \omega_{max}^2 \cdot (m_p \cdot r_p + m_n \cdot r_n + m_{Cu} \cdot r_{Cu}) = \\
 &= 4,27^2 \cdot (97,05 \cdot 1,61 + 32,3 \cdot 1,7 + 89,28 \cdot 1,612) = 6283,6 \text{ N}
 \end{aligned} \tag{3.7}$$

Celková síla působící na pól:

$$F_C = F_P + F_m = 6283,6 + 2144,76 = 8428,36 \text{ N} \tag{3.8}$$

3.2 Výpočet upevnění pólu pomocí šroubů

V následujícím výpočtu uvažuji, že pól bude upevněn dvěma šrouby a bude na něj působit celková síla vypočtená v předchozím kroku (3.8).

Malý průměr šroubu:

$$d_s = \sqrt{\frac{1,2 \cdot 4 \cdot F_C}{\pi \cdot m_s \cdot \sigma_D}} = \sqrt{\frac{1,2 \cdot 4 \cdot 8428,36}{\pi \cdot 2 \cdot 120 \cdot 10^6}} = 7,33 \text{ mm} \tag{3.9}$$

Kde m_s je počet šroubů a σ_D je maximální dovolené namáhání v tahu.

S přihlédnutím ke konstrukčním zásadám, respektive k dané aplikaci šroubů, nelze použít šrouby s takto malým průměrem. V praxi se používají šrouby minimálně M12. V tomto případě, s přihlédnutím k bezpečnosti volím dva šrouby M20.

3.3 Výpočet momentového pera

Je nutné si uvědomit, že použité šrouby nesmějí být za žádných okolností namáhány na ohyb nebo na stříh. Proto je nutné použít pero, které se umístí podél celého pólu a zajistí přenos momentu mezi pólem a zbytkem rotoru. Pera, která se používají pro tyto aplikace nejsou normalizovaná. Budu tedy postupovat tak, že zvolím průřez pera a provedu kontrolní výpočet na smykové a tlakové namáhání.

Volím pero ($b_{pe} \times h_{pe}$): 16 x 10 mm. Délka pera L_{pe} je shodná s délkou pólu.

Moment stroje:

$$M_k = \frac{P}{\omega} = \frac{P}{\frac{\pi \cdot n}{30}} = \frac{1450000}{\frac{\pi \cdot 34}{30}} = 407303,37 \text{ N} \cdot \text{m} \tag{3.10}$$

Tečná síla:

$$T_t = \frac{2 \cdot M_k}{d_{mk}} = \frac{2 \cdot 407303,37}{1,533} = 531380,72 \text{ N} \quad (3.11)$$

Kontrola pera na otlačení:

$$p_p = \frac{T_t}{t_1 \cdot L_{pe}} = \frac{531380,71}{0,005 \cdot 0,844} = 125 \text{ MPa} \quad (3.12)$$

Maximální dovolený tlak $p_{pd} = 130 \text{ MPa}$. Z toho vyplývá, že kontrola pera na otlačení vyhovuje, protože musí platit podmínka $p_{pd} > p_p$.

Kontrola pera na stříh:

$$J_S = \frac{T_t}{b_{pe} \cdot L_{pe}} = \frac{531380,71}{0,016 \cdot 844} = 39,35 \text{ MPa} \quad (3.13)$$

Maximální dovolené namáhání na smyk $J_{SD} = 100 \text{ MPa}$. Vzhledem k tomu, že musí platit podmínka $J_{SD} > J_S$, lze tedy říci, že pero vyhovuje i při namáhání na smyk. [5]

4 Porovnání výsledků

Veličina	Můj výpočet	ČKD
Aktivní délka (včetně rad. kanálů)	844 mm	600 mm
Radiální kanály	13 x 10 mm	9 x 10 mm
Počet segmentů statorových plechů	15	20
Způsob upevnění statorových plechů	pravítka	momentové tyče
Rozměr drážky	21,5/90 mm	18/110 mm
Rozměr holého vodiče	2,5 x 14 mm	2,1 x 10,6 mm
Počet závitů v sérii	720	680
Krok vinutí v počtu drážek	5	5
Počet vodičů v drážce	18	34
Hmotnost statorového svazku plechů	7390 kg	6709 kg
Činný odpor jedné fáze stat. vinutí při 20°C	0,99 Ω	0,704 Ω
Rozptylová reaktance jedné fáze stat. vinutí	17,57 %	28,3 %
Sycení zubů na vrcholu	1,69 T	1,729 T
Sycení jha	1,3 T	1,456 T
Sycení ve vzduchové mezeře	0,83 T	1,046 T
Obvodová proudová hustota	55441,12 A/m ²	58000 A/m ²
Esosonův činitel elmeg. využití	4,99 $\frac{kW \cdot tmin}{ot \cdot m^3}$	6,57 $\frac{kW \cdot tmin}{ot \cdot m^3}$
Šířka těla pólu	94 mm	136 mm
Výška těla pólu	153 mm	175 mm
Výška pólového nástavce	27 mm	31 mm
Závity budícího vinutí	72 (3 x 24)	108 (6 x 18)
Průřez vodiče budícího vinutí	12 x 5,5 mm	9 x 5 mm
Hmotnost budícího vinutí	3560 kg	2752 kg
Počet tyčí tlumiče na pól	7	5
Rozteč tlumiče	25 mm	41 mm
Průměr tyče tlumiče	11 mm	14 mm
Budící magnetické napětí	9200 A	10800 A
Budící napětí	220 V	210 V
Budící proud	133 A	100 A
Celkové ztráty	118,93 kW	127,7 kW
Počet a velikost šroubů k uchycení pólu	2 x M20	4 x M36
Účinnost	92,42 %	92 %

Tabulka 4.1: Porovnání výsledků [7]

Závěr

Cílem této práce bylo provést elektromagnetický výpočet synchronního těžního stroje a jeho výsledky porovnat s výstupem výpočetního programu, který používá společnost Howden ČKD Compressors s.r.o. Společně s elektromagnetickým návrhem byla vytvořena výkresová dokumentace v podobě rozměrového výkresu a detailních výkresů částí rotoru.

Z výsledného porovnání v kapitole 4 je na první pohled vidět, že stroj navržený ČKD je mnohem více elektromagneticky využitý. Vyplývá to zejména z rozdílných hodnot magnetické indukce a obvodové proudové hustoty a potažmo z hodnoty Essonova činitele elektromagnetického využití. Dalším významným rozdílem, který koresponduje s předchozím tvrzením je velikost efektivní délky stroje, která dle ČKD vychází o 244 mm kratší. Výše zmíněné skutečnosti mají samozřejmě vliv na výslednou hmotnost statorového svazku plechů, jenž u ČKD vychází o 681 kg nižší. Výrazným rozdílem v obou výpočtech je výsledný rozměr drážky a počet vodičů. ČKD v tomto případě zvolilo hlubší a užší drážku na rozdíl od mého výpočtu. S tím koresponduje i počet vodičů v drážce, který je u ČKD skoro dvojnásobný. Ale je nutné si uvědomit, že ČKD použilo vodič o celkově menším průřezu.

Zajímavým zjištěním je také hodnota magnetické indukce ve vzduchové mezeře. Tuto hodnotu jsem v mém výpočtu zvolil na základě výkonu stroje, a to 0,83 T. Na druhou stranu, ČKD uvádí hodnotu 1,046 T, což je poněkud vyšší hodnota, oproti běžným případům.

Velice významnou veličinou při návrhu stroje je výsledný odpor a rozptylová reaktance statorového vinutí. Dle mého výpočtu sice vychází hodnota činného odporu o 0,28 Ω vyšší oproti návrhu ČKD, nicméně v mém výpočtu jsem dosáhl mnohem menší hodnoty rozptylové reaktance a to o celých 10 %.

Vzhledem k odlišnosti obou výpočtů lze očekávat, že v případě velikosti pólů a budícího vinutí tomu nebude jinak. Tak například výška pólu se liší pouze o 2 cm, nicméně šířka pólu je velice odlišná. V případě mého výpočtu vychází šířka pólu pouze 94 mm a v případě ČKD celých 136 mm. To s sebou nese i rozdíly ve velikosti budícího vinutí, respektive v počtu závitů (70/108)¹ a hodnotě magnetického budícího napětí, která je oproti mému výpočtu více než dvojnásobná (9200/10800 A). Z toho samozřejmě vyplývá i rozdílná velikost

¹První hodnota odpovídá mému výpočtu a druhá výpočtu ČKD

budícího proudu, která dle ČKD vychází 100 A, oproti hodnotě 133 A z mého výpočtu.

I přes značné odchylky v obou výpočtech vychází ztráty u mnou navrženého stroje nižší (118 kW) oproti ČKD (127,7 kW). Tomu odpovídá i lehce vyšší účinnost (92,42 %).

Na úplný závěr je nutno říci, že důvodem všech výše zmíněných odchylek a rozdílů, je velký vliv zkušeností a propracovaných technologických procesů a řešení, které jsou uplatňovány ve společnosti Howden ČKD Compressors s.r.o. Je potřeba zmínit, že výpočetní program, který je používám v ČKD je jistě velice propracovaný a prochází neustálým vylepšováním již řadu let. Dále je zde velký vliv nových materiálů, zejména v oblasti izolačních systémů.

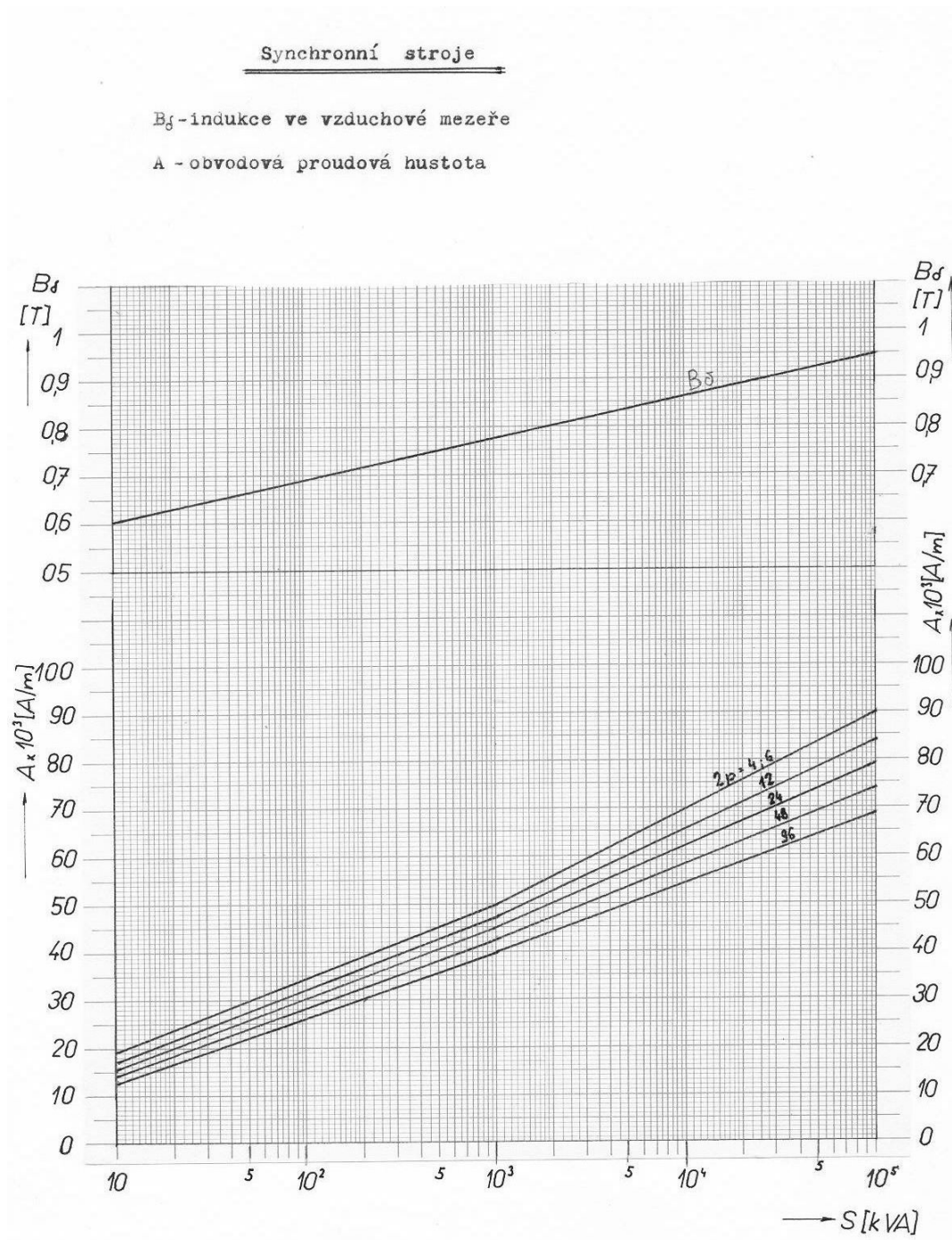
Reference

- [1] *CIGÁNEK, Ladislav. Stavba elektrických strojů.* Praha: SNTL, 1958.
- [2] *KOPYLOV, Igor Petrovič. Stavba elektrických strojů.* Praha: SNTL/MIR, 1988.
- [3] *WIEDEMANN a KELLENBERGER. Konstrukce elektrických strojů.* Praha: SNTL, 1973.
- [4] *HLAVÁČ, Vladimír. Návrh synchronního generátoru a ověření parametrů MKP [online].* Plzeň, 2010 [cit. 2014 – 04 – 06]. Dostupné z: http://home.zcu.cz/~jvarga/DP/Navrh_synchronniho_generatoru_a_overeni_parametru_MKP.pdf. Diplomová práce. Západočeská universita v Plzni.
- [5] *KOLESA, Michal. Strojírenské výpočty [online].* 2007. Dostupné z: <http://www.michal-kolesa.cz/download/strojirenske-vypocty.pdf>
- [6] *ČERVENÝ, Josef. Stavba elektrických strojů - učební materiály předmětu KEV/SES1,2* Plzeň, 2010 [cit. 2014 – 04 – 06]. Dostupné z: <https://courseware.zcu.cz/wps/myportal/predmety/>. Výukový materiál. Západočeská universita v Plzni.
- [7] ČKD. Informační zdroje ČKD

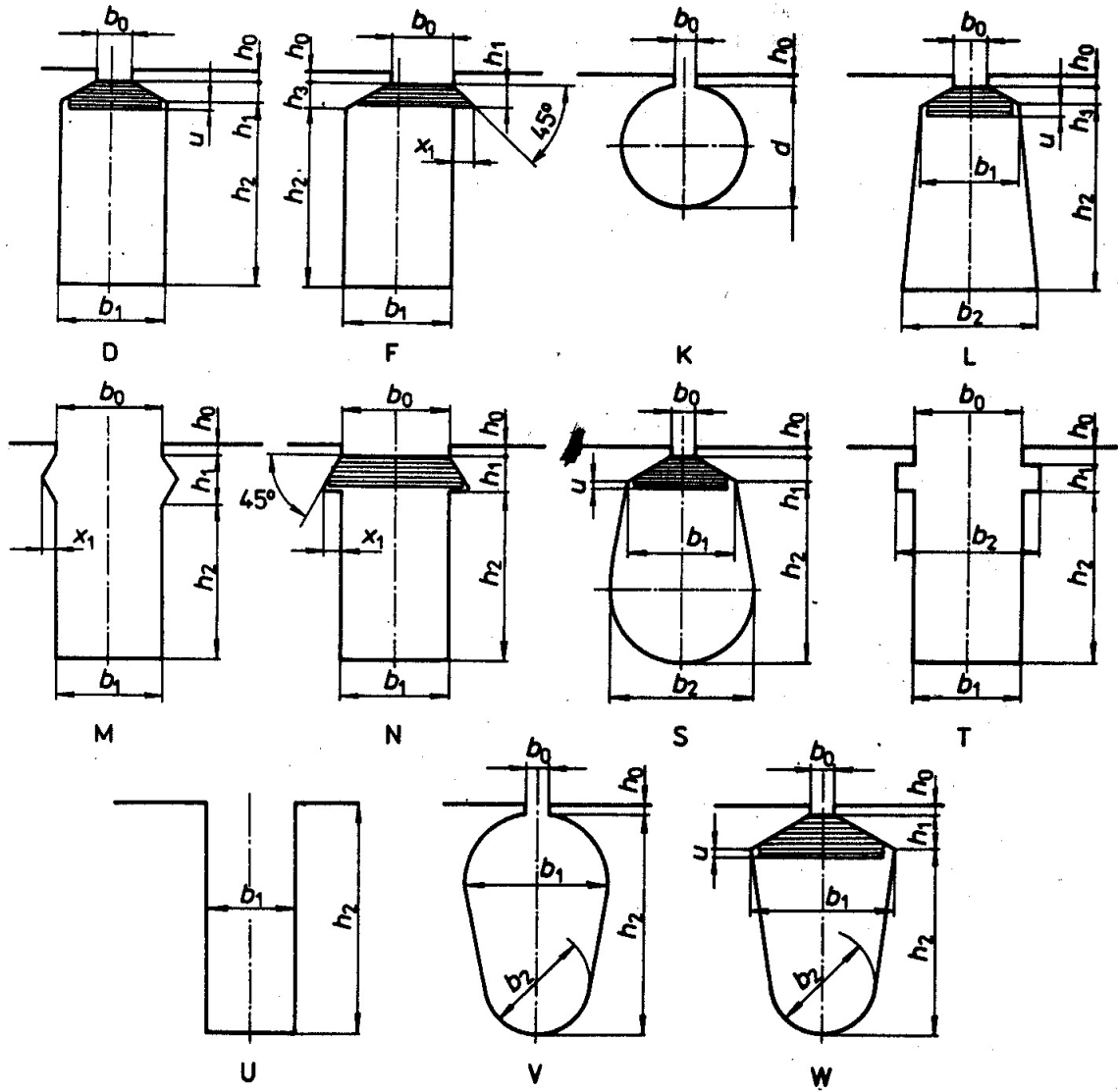
Přílohy

- Příloha č. 1:** Závislost proudové hustoty a magnetické indukce na zdánlivém výkonu
- Příloha č. 2:** Používané typy drážek
- Příloha č. 3:** Rozměry drážky typu M
- Příloha č. 4:** Rozměry normalizovaných měděných pasů
- Příloha č. 5:** Grafy určení činitele základní harmonické mg. indukce a tvaru mg. toku
- Příloha č. 6:** Grafy pro určení činitele magnetického napětí
- Příloha č. 7:** Graf pro určení Carterova činitele
- Příloha č. 8:** Nomogram k určení skutečné indukce v zubech induktu
- Příloha č. 9:** Magnetizační charakteristika dynamových plechů
- Příloha č. 10:** Graf pro určení činitele povrchových ztrát
- Příloha č. 11:** Doporučené rozměry kartáčů a jejich vlastnosti
- Příloha č. 12:** Výkresová dokumentace ČKD - izolace statorového vinutí
- Příloha č. 13:** Charakteristika naprázdno
- Příloha č. 14:** Tabulka magnetizační charakteristiky zubové vrstvy
- Příloha č. 15:** Tabulka magnetizační charakteristiky celého magnetického obvodu
- Příloha č. 16:** Tabulka teplotních tříd izolačních materiálů
- Příloha č. 17:** Výkres - Lamela pólu
- Příloha č. 18:** Výkres - Pól
- Příloha č. 19:** Výkres - Rozměrový
- Příloha č. 20:** Výkres - Rotor

Příloha č. 1: Závislost proudové hustoty a magnetické indukce na zdánlivém výkonu



Příloha č. 2: Používané typy drážek



Příloha č. 3: Rozměry drážky typu M

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

Příloha č. 4: Rozměry normalizovaných měděných pasů

Výběr z ČSN 42 8308-1659 Rozměry měděných pásů

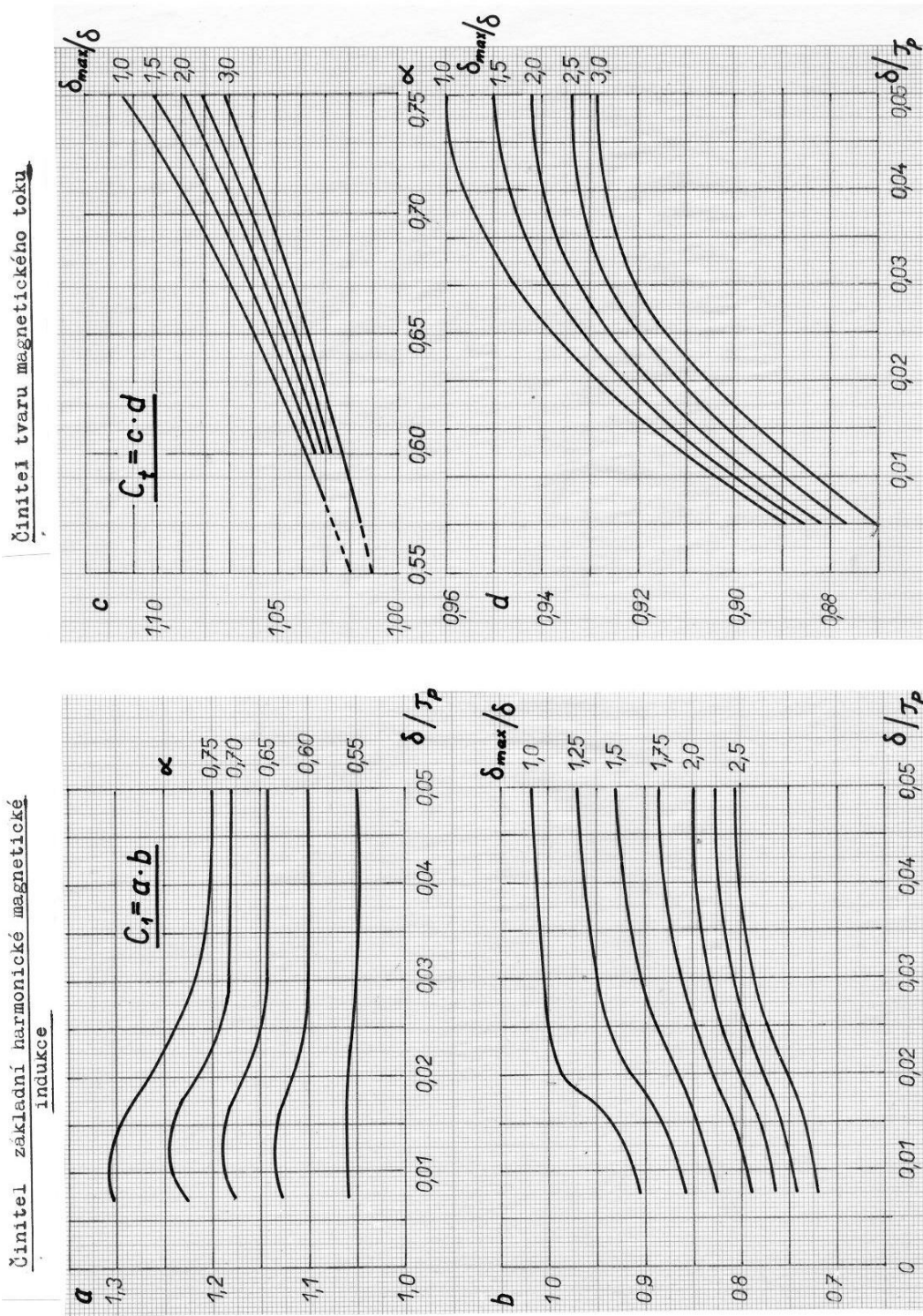
Jmenovitá tloušťka [mm]	0,8	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,8	2,0	2,2	2,5	2,8
0,30	1,8	1,3	1,66										
	2,0	1,46	1,86	2,18	2,38	2,58	2,69	2,89					
	2,2	1,62	2,06	2,42	2,64	2,86	2,99	3,21					
	2,5	1,86	2,36	2,78	3,03	3,28	3,44	3,69	4,19	4,45			
	2,8	2,1	2,66	2,94	3,14	3,42	3,70	3,89	4,17	4,73	5,05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

Rozměry v závorkách nepatří pro nové konstrukce.

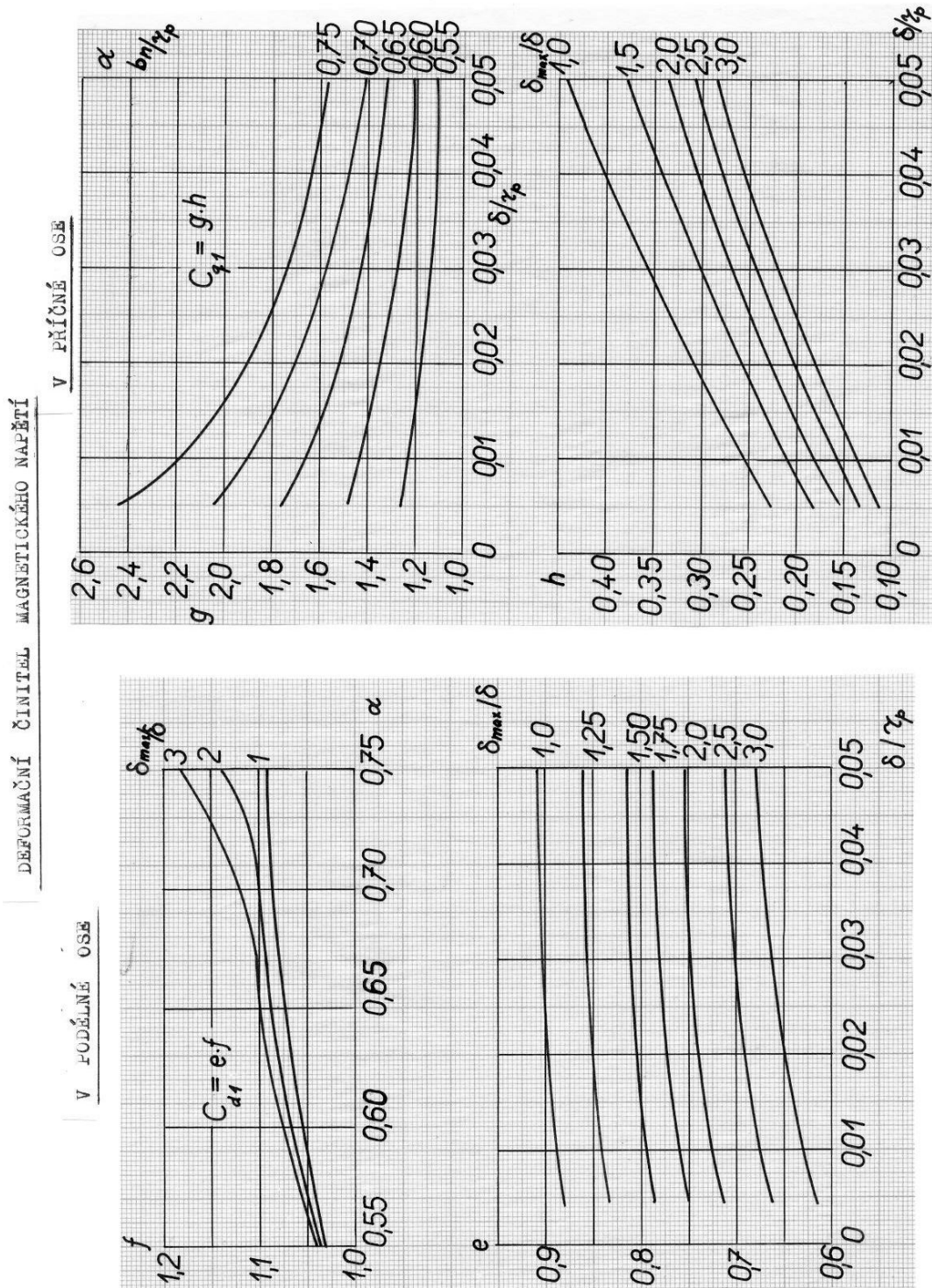
3,0 (3,2)	3,5	4	4,5	5	5,5	6 (6,5)	7	8	9	10
11,4										
12,9	13,5									
14,4	16,6	19,1								
15,9	18,4	21,1								
17,4	20,1	23,1								
18,9	19,9	21,9	25,1							
20,4	21,4	23,6	27,1	30,3	33,8					
23,4	24,7	27,1	31,1	34,8	42,8	46,8				
26,4	27,9	30,6	35,1	39,3	48,3	52,5				
29,4	31,1	34,1	39,1	43,8	53,8	58,5				
32,4	34,3	37,6	43,1	48,3	59,3	64,5				
35,4	37,5	41,1	47,1	52,8	64,8	70,5		93,8		
38,4	40,7	44,6						101,8		
41,4	43,9	48,1	55,1	61,8	75,8	82,5		109,8		
44,4	47,1	51,6	59,1	66,3				117,8		147,8
47,4	50,3	55,1	63,1	70,8	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
59,4	63,1	69,1	79,1	88,8	98,8	108,8	118,8	128,8	138,5	157,8
74,4	79,1	86,6	99,1	111,3	123,8	136,3	148,5	161,0	173,5	197,8
89,4	95,1	104,1	119,1	138,8	148,8	163,8	178,5	193,5	208,5	237,8
										267,8
										297,8

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

Příloha č. 5: Grafy určení činitele základní harmonické mg. indukce a tvaru mg. toku

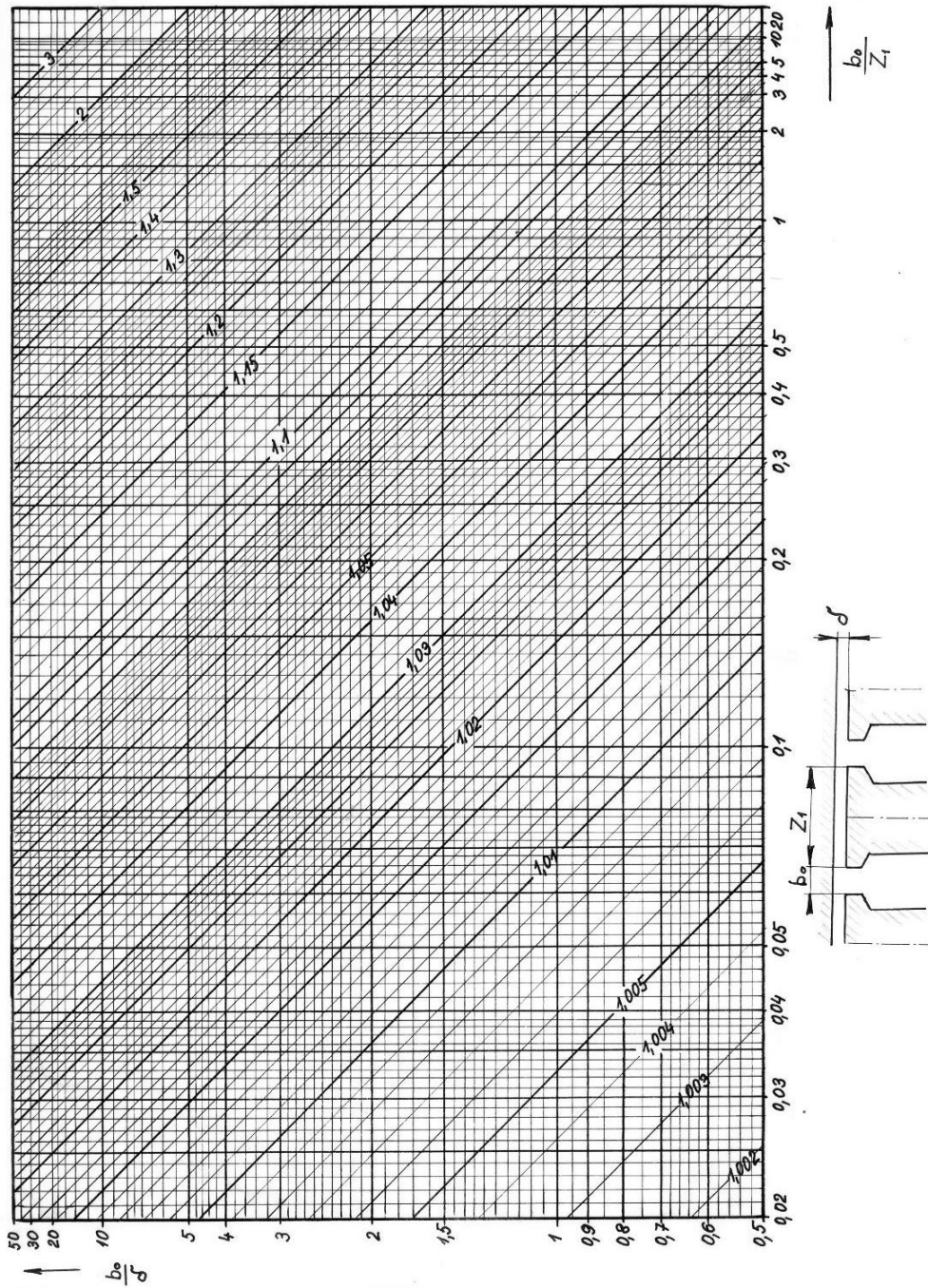


Příloha č. 6: Grafy pro určení činitele magnetického napětí

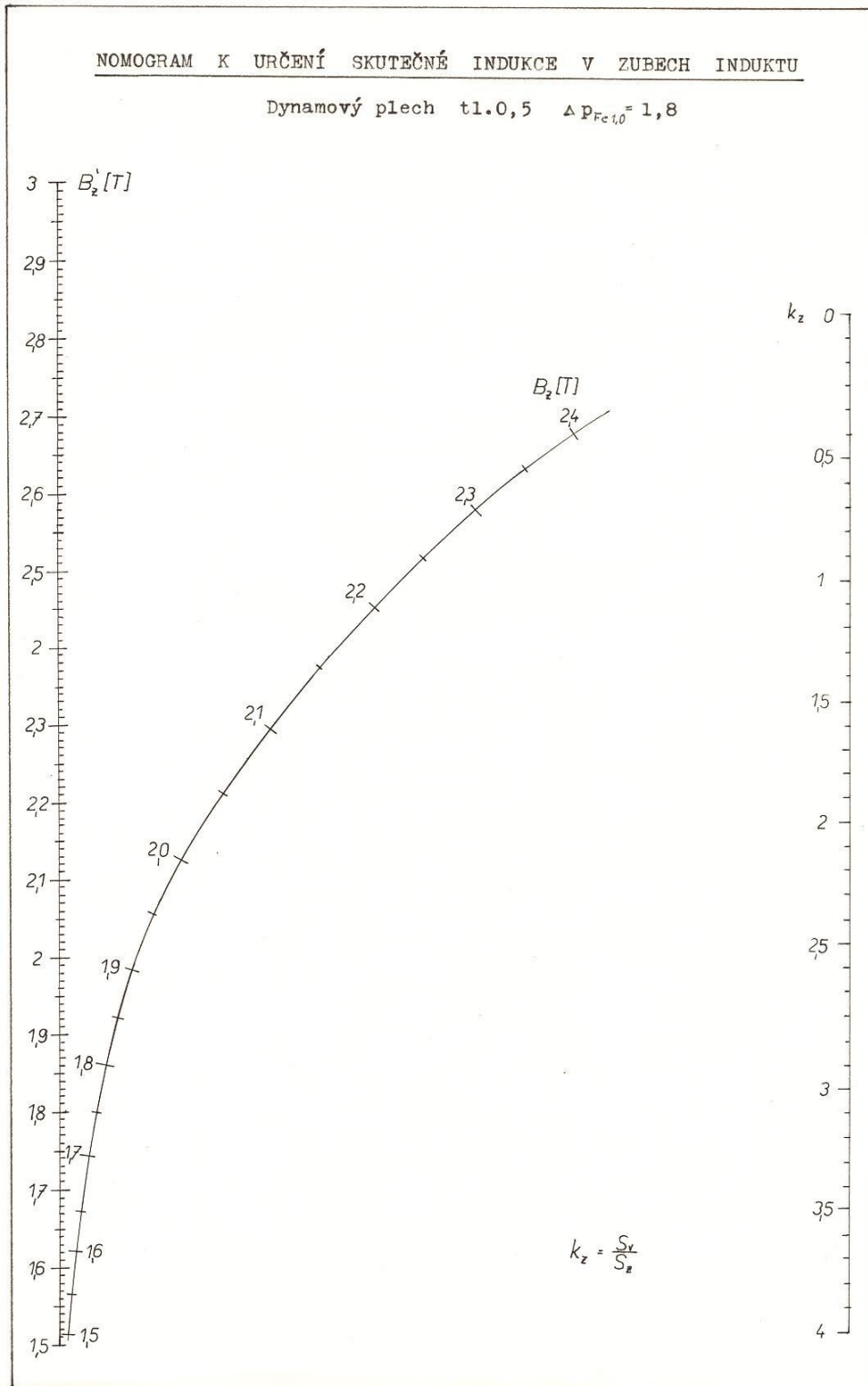


Příloha č. 7: Graf pro určení Carterova činitele

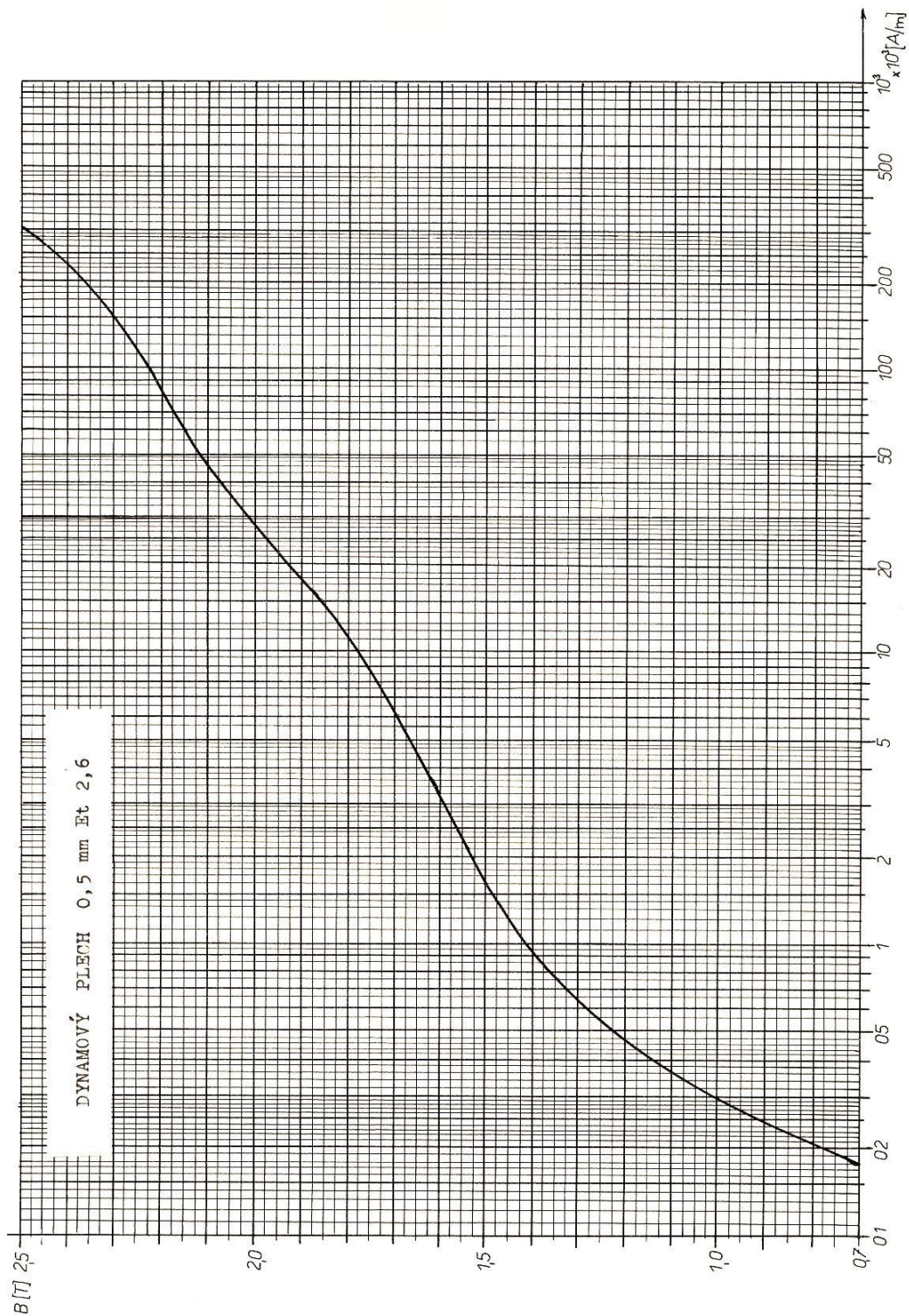
CARTERŮV ČINITEĽ NA DRÁŽKOVÁNÍ



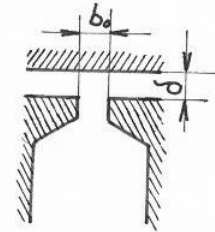
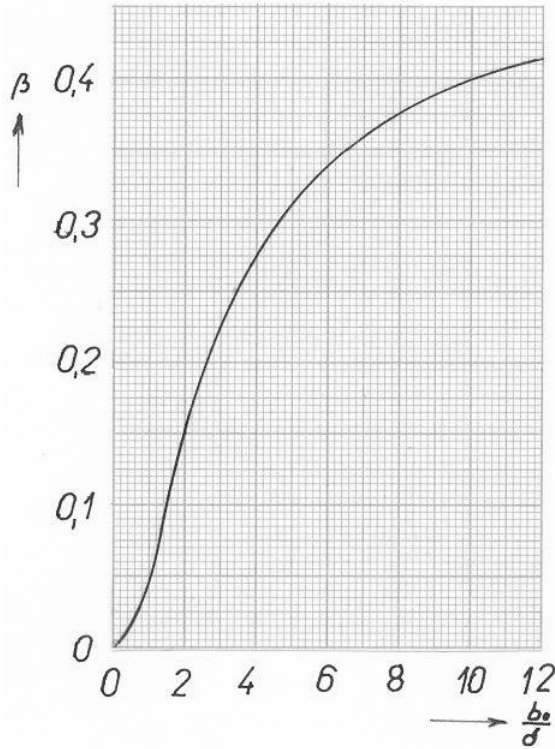
Příloha č. 8: Nomogram k určení skutečné indukce v zubech induktu



Příloha č. 9: Magnetizační charakteristika dynamových plechů



Příloha č. 10: Graf pro určení činitele povrchových ztrát



$k_p = 23,3$ kovaná ocel
 17,5 litina
 8,6 plech 2 mm
 2,8 plech 0,5 mm

k_p, β - činitelé povrchových ztrát v pólovém nastavci

Činitel mechanických ztrát :

A = 1,1 ÷ 1,5 pomalub. alternátor

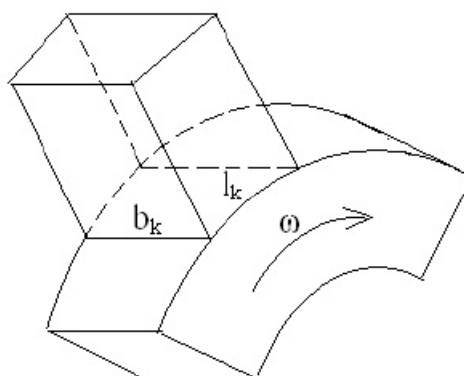
0,8 ÷ 1,1 rychloběžné alt.

0,8 ÷ 1 turboalternátor

Příloha č. 11: Doporučené rozměry kartáčů a jejich vlastnosti

Doporučené rozměry kartáčů

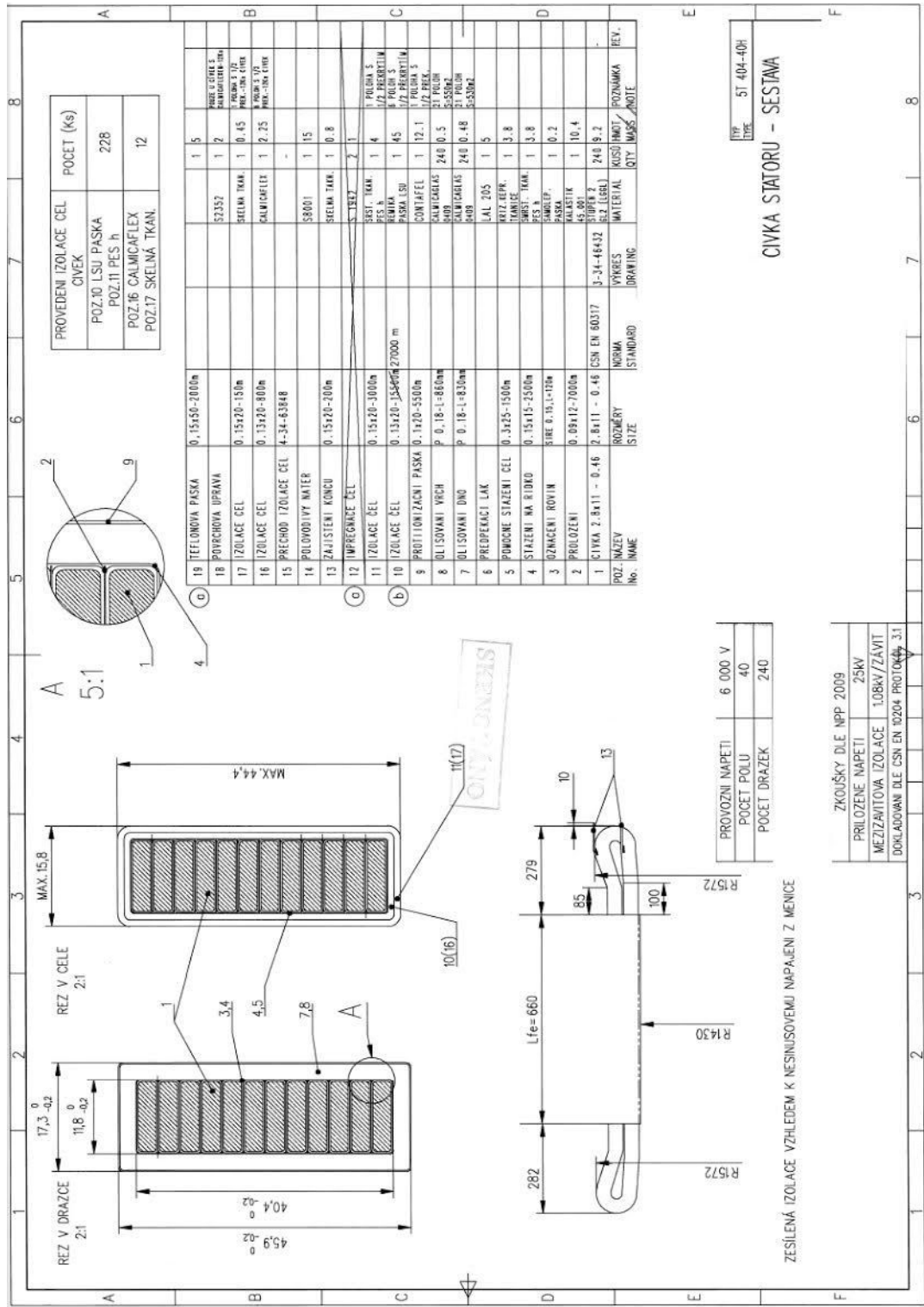
[mm]	Rozměr ve směru osy b_k									
	10	12,5	16	20	25	32	40	50	64	80
Tečný směr l_k	4	4	5	5	5	5	5	25	12,5	40
		5	6,3	6,3	6,3	6,3	6,3	40	20	
		6,3	8	8	8	8	8	50	25	
				10	10	10	10		32	
					12,5	12,5	12,5		50	
					16	16	16			
					20	20	20			
						25	25			
						32	32			
							40			



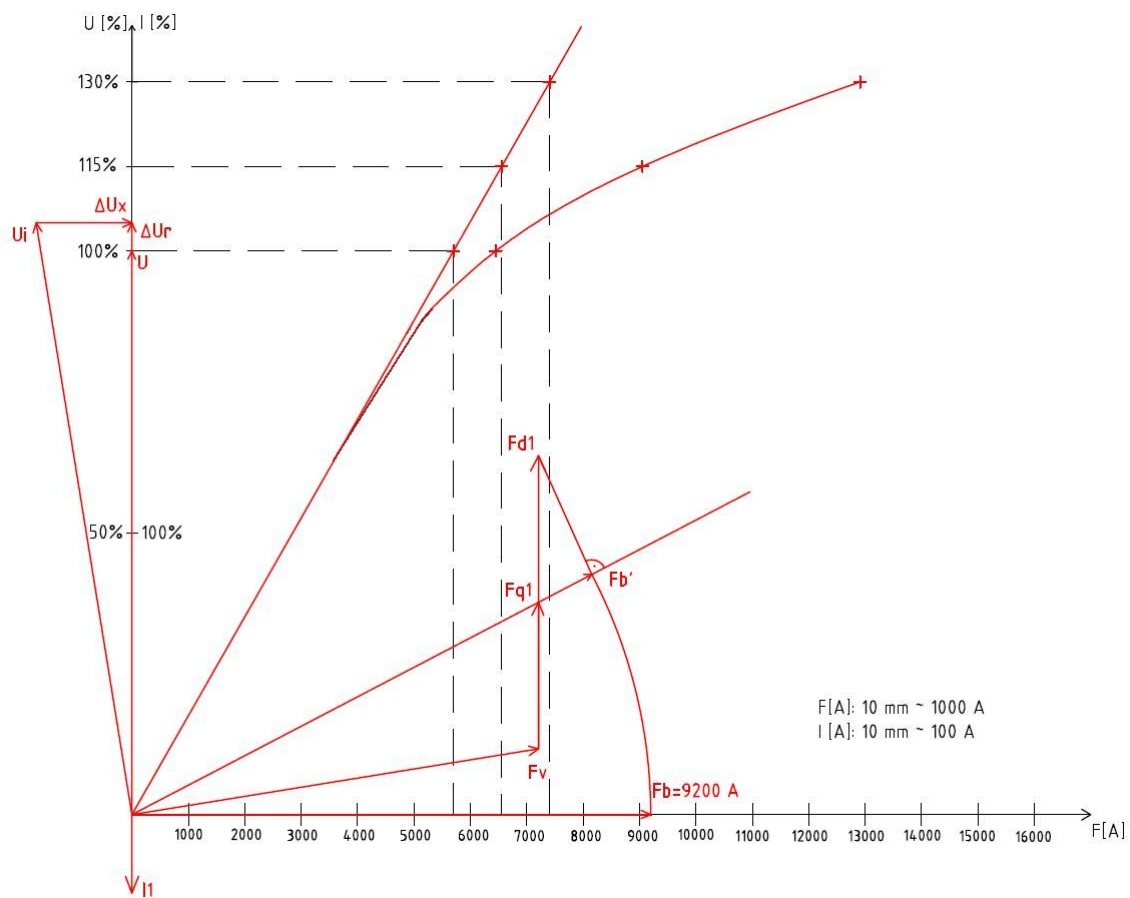
Kartáče pro kroužky – vlastnosti

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

Příloha č. 12: Výkresová dokumentace ČKD - izolace statorového vinutí



Příloha č. 13: Charakteristika naprázdno

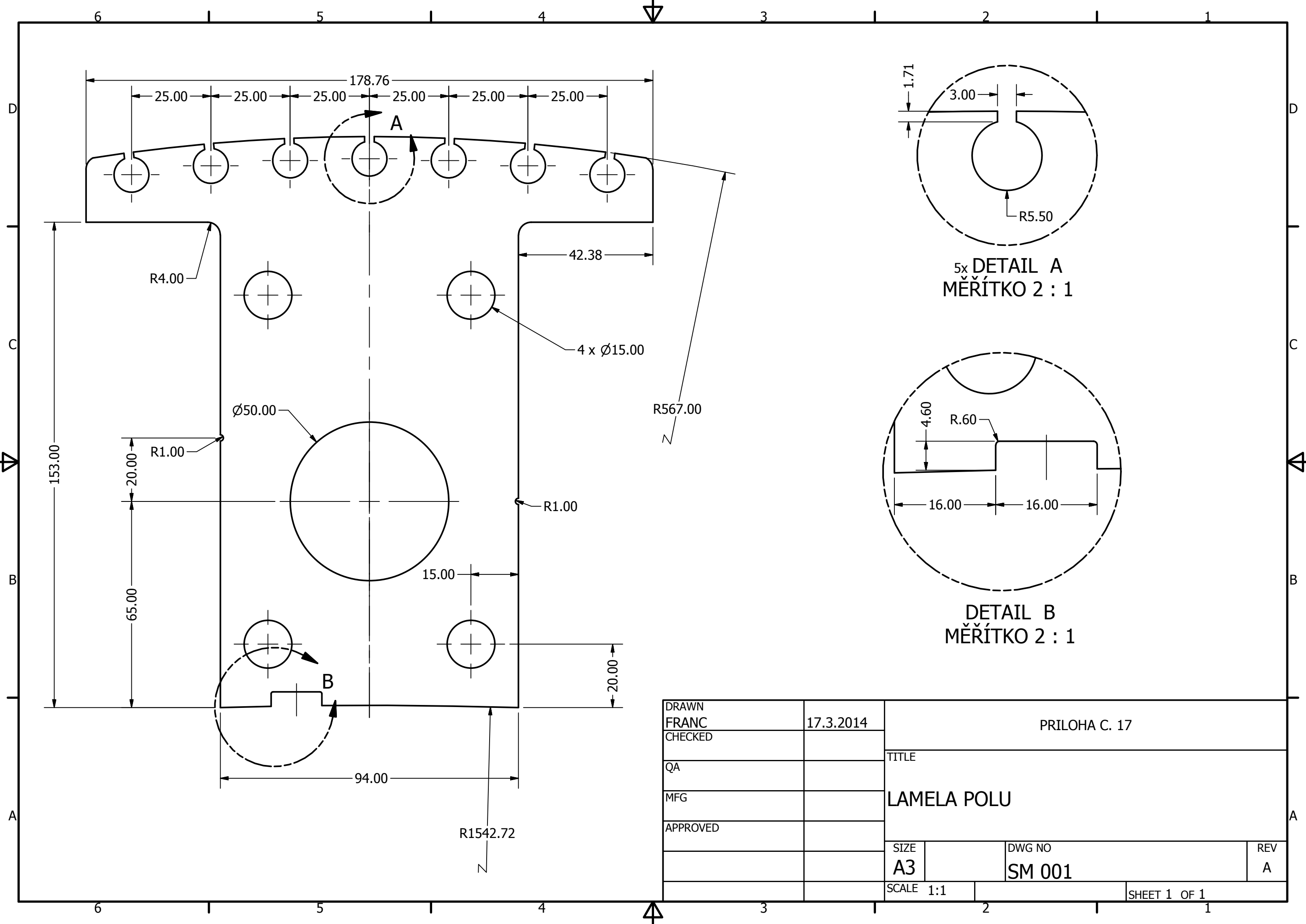


Příloha č. 14: Tabulka magnetizační charakteristiky zubové vrstvy

	n	D_{z0} [mm]	t_{z0} [mm]	z_0 [mm]	k_{z0} [-]	B_{z0}' [T]	B_{z0} [T]	H_{z0} [T]	H_{z050n} [A]	F_{z0} [A]						
Φ	1	3460	45,29	23,79	1,07	1,71	1,69	6000	5300	448						
	2	3535	46,27	24,77	1,03	1,67	1,67	5300								
	3	3610	47,25	25,75	0,99	1,66	1,66	4600								
Magnetizační charakteristika zubové vrstvy											1,15. Φ	1,97	1,94	20000	19166	1623
												1,92	1,92	19000		
												1,9	1,92	19000		
											1,3. Φ	2,2	2,2	30000	28166	2385
												2,17	2,17	28000		
												2,16	2,16	27000		

Příloha č. 15: Tabulka magnetizační charakteristiky celého magnetického obvodu

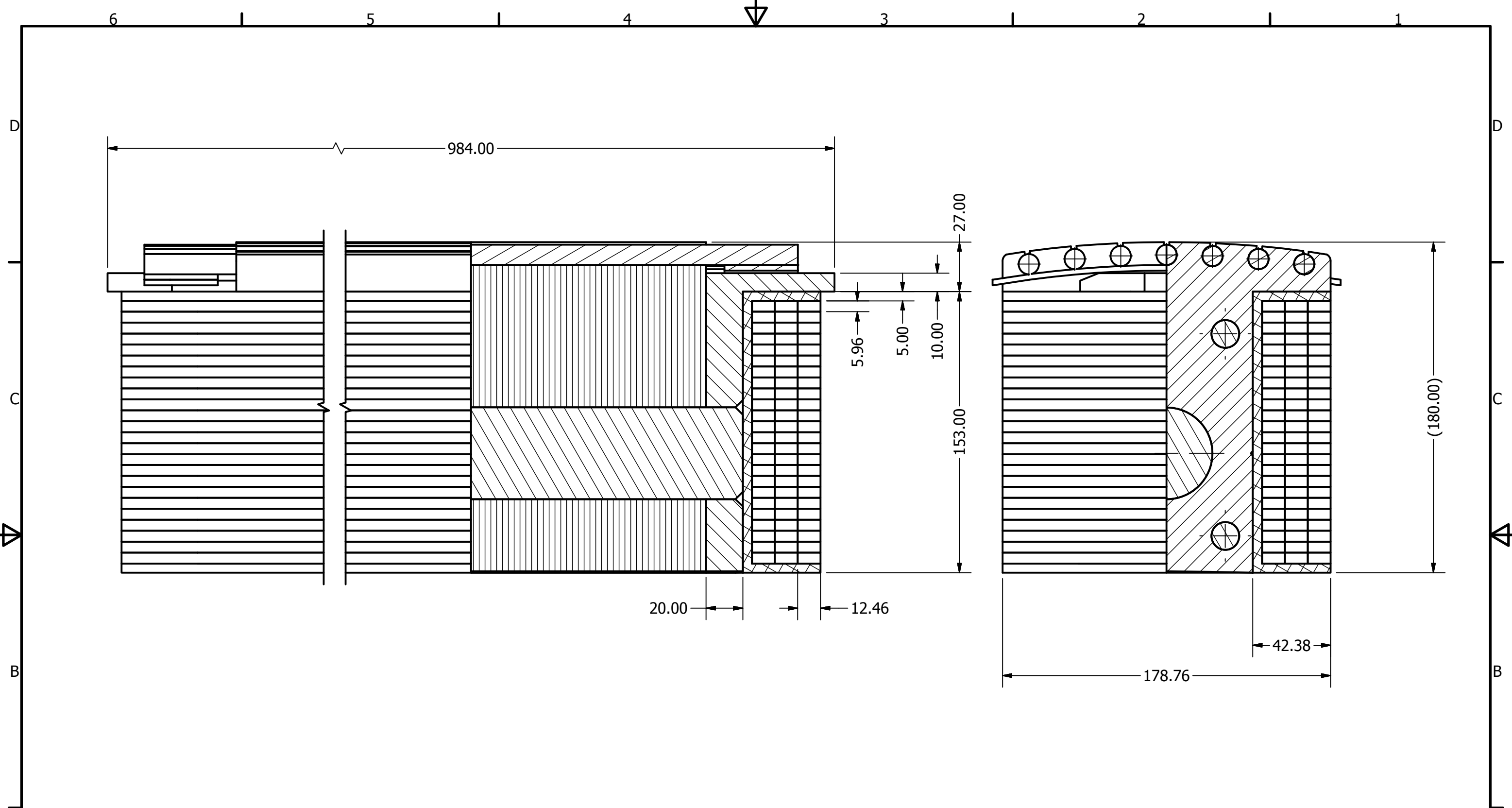
		Φ			$k1\Phi$			$k2\Phi$			
		B [T]	H [A/m]	F [A]	B [T]	H [A/m]	F [A]	B [T]	H [A/m]	F [A]	
Zuby	Vzd. Mezera	$\delta = 0,008 \text{ m}$		5582			6419,3			7256,6	
	Hlava	B'_{z1}	1,71		1,97			2,2			
		B_{z1}	1,69	6000		1,94	20000		2,2	30000	
	Střed	B'_{z2}	1,67			1,92			2,17		
		B_{z2}	1,67	5300		1,92	19000		2,17	28000	
	Pata	B'_{z3}	1,66			1,9			2,16		
		B_{z3}	1,66	4600		1,92	19000		2,16	27000	
	Stř. hod.	$hz = 0,085 \text{ m}$			448,91			1623,4			2385,7
	Jádro induktu	$l_{ji} = 0,1103 \text{ m}$	1,3	650	71,7	1,495	1500	165,45	1,69	6000	661,8
	$\Sigma F = F+Fz+Fj$				6102,61			8208,15			10304,1
Pól	$l_p = 0,1087 \text{ m}$	1,45	1900	207	1,68	6000	652,2	1,9	20000	2174	
Jho	$l_j = 0,1665 \text{ m}$	1,1	600	100	1,265	1100	183,15	1,43	1800	300	
$\Sigma F = Fp+Fj$											
$\Sigma F = F+Fz+Fj+Fp+Fj$				6409,61			9043,5			12778,1	



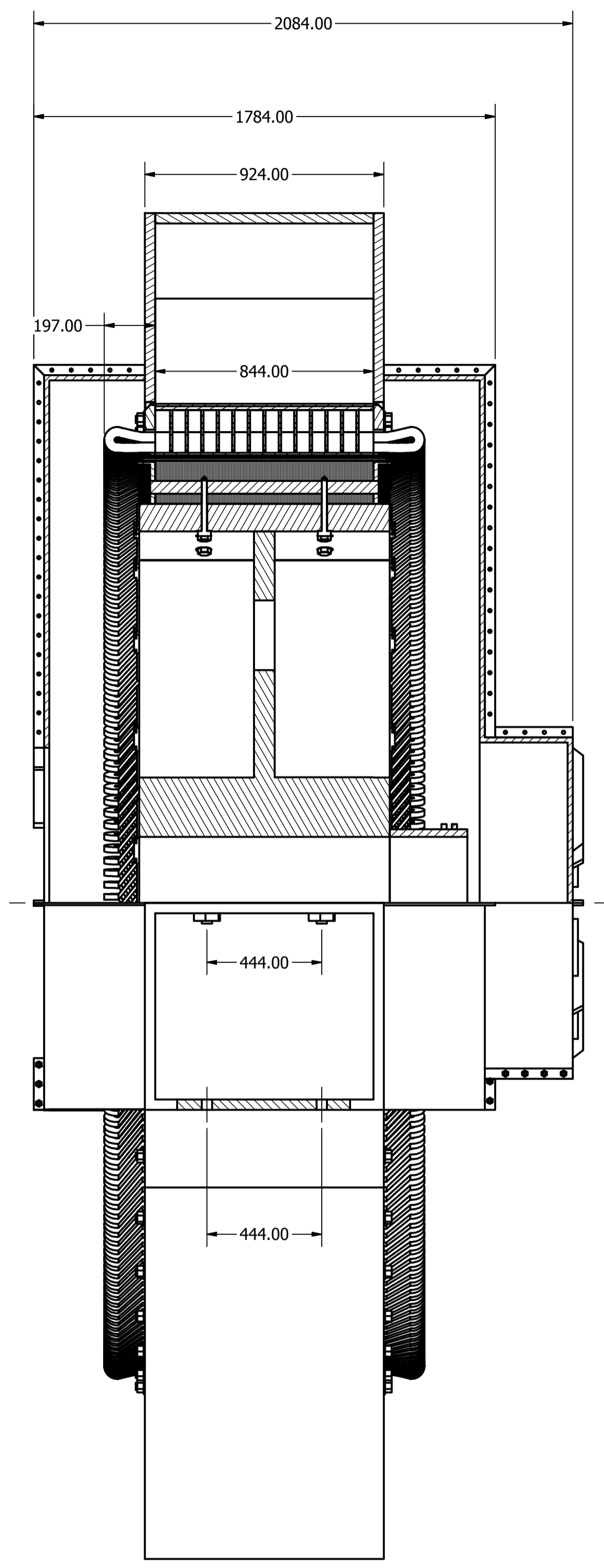
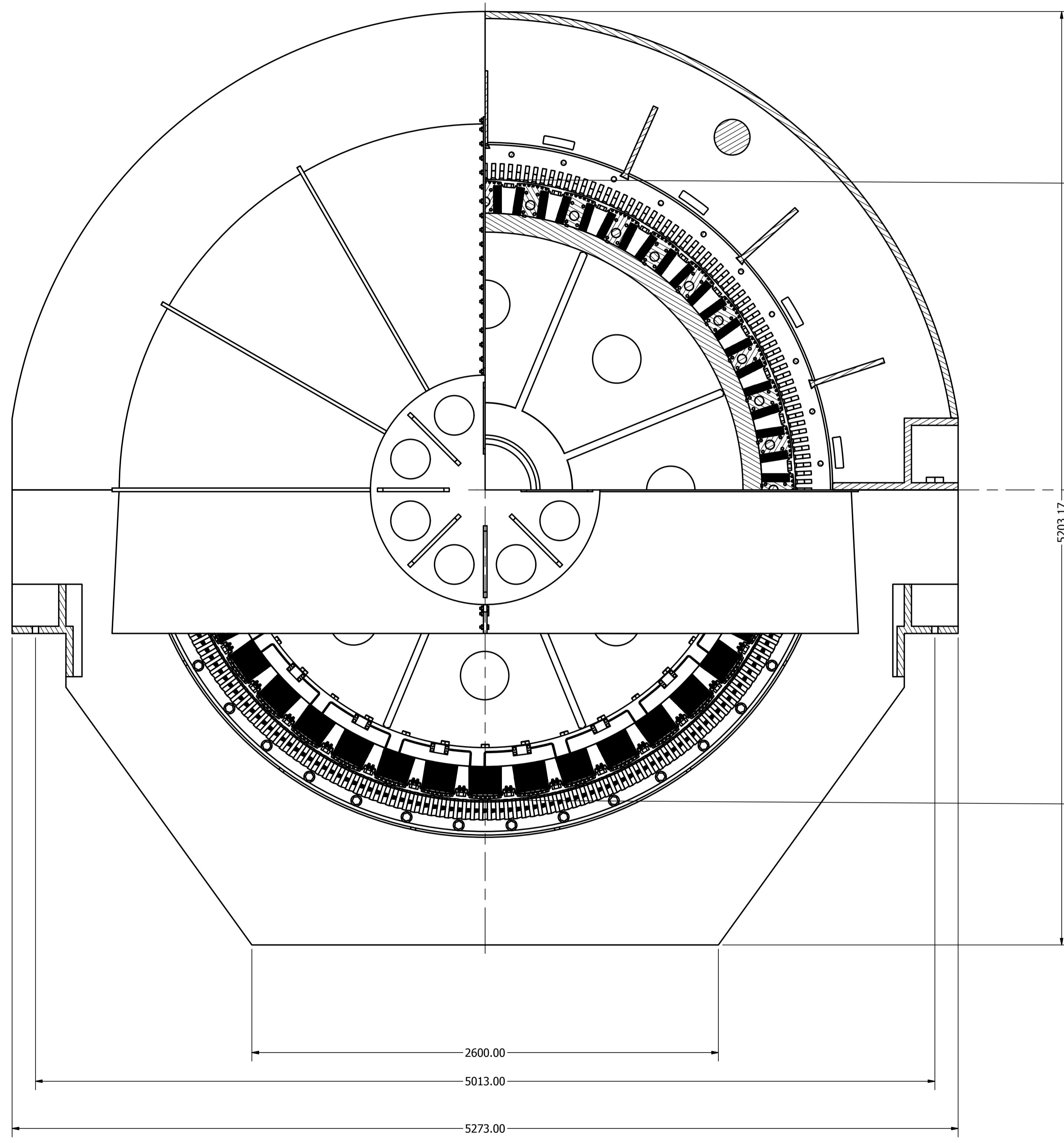
5x DETAIL A
MĚŘÍTKO 2 : 1

DETAIL B
MĚŘÍTKO 2 : 1

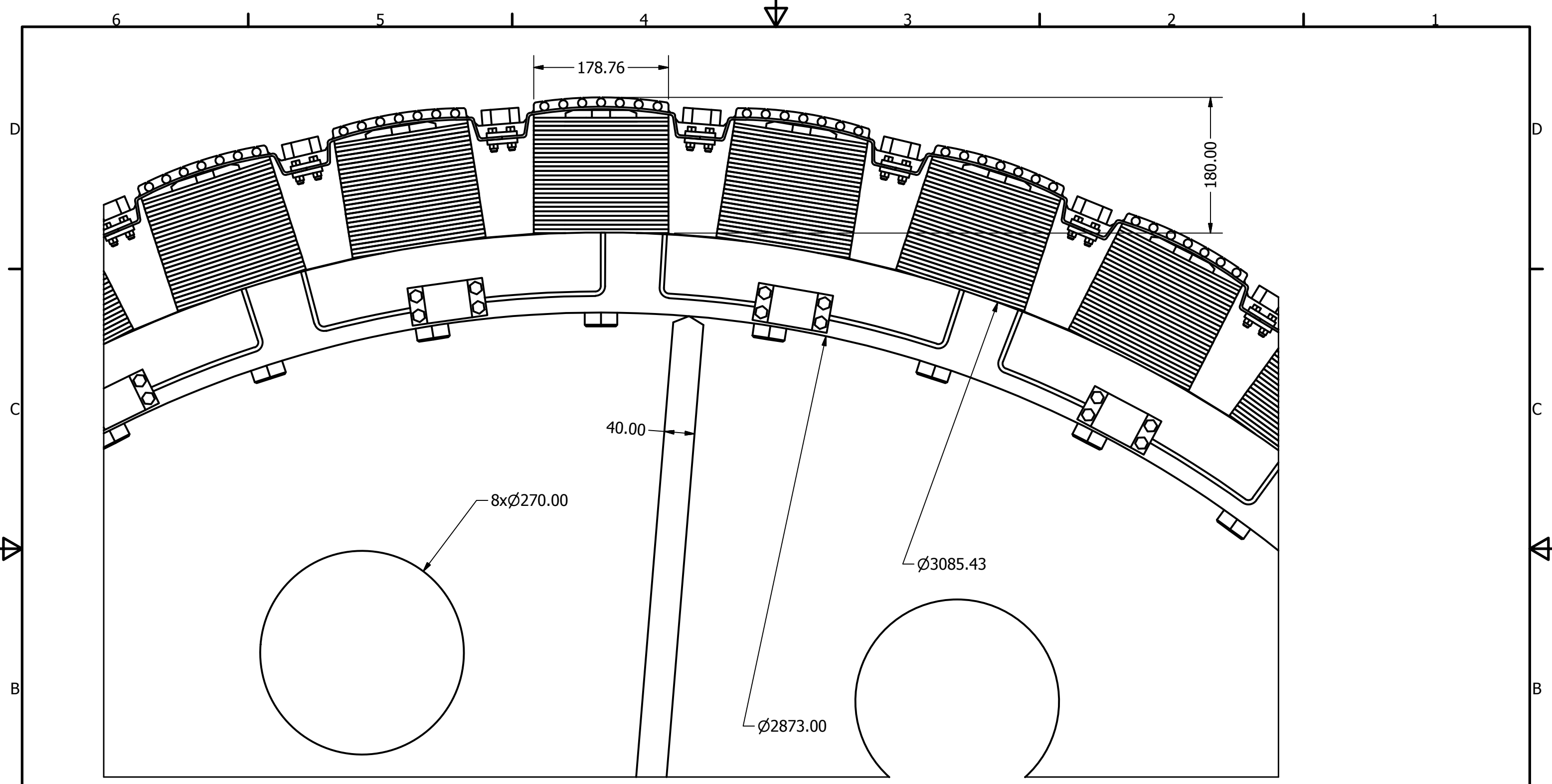
DRAWN	FRANC	17.3.2014	PRILOHA C. 17	
CHECKED			TITLE	
QA			LAMELA POLU	
MFG			SIZE	
APPROVED			DWG NO	REV
			SM 001	A
			SCALE 1:1	SHEET 1 OF 1



DRAWN	FRANC	17.3.2014	PRILOHA C. 18	
CHECKED			TITLE	
QA			POL	
MFG			SIZE	
APPROVED			DWG NO	
			SM 002	
			SCALE 1:2	REV
			SHEET 1 OF 1	



DRAWN	FRANC	17.3.2014	PRILOHA C. 19	
CHECKED			TITLE	
QA			ROZMEROVY VYKRES	
MFG			SIZE	DWG NO
APPROVED			A1	SM 003
			SCALE 1:15	SHEET 1 OF 1
				REV A



DRAWN	FRANC	8.4.2014	PRILOHA C. 20		
CHECKED			TITLE		
QA			ROTOR		
MFG					
APPROVED					
			SIZE	DWG NO	REV
			A3	SM 004	
			SCALE 1:5	SHEET 1 OF 1	