

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Návrh synchronního generátoru

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Filip KOTYZA**
Osobní číslo: **E12B0490P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Název tématu: **Návrh synchronního generátoru**
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 :

Navrhňte synchronní generátor s parametry: $S=120\text{kVA}$; $U=400\text{V}$; $2p=4$; účinník=0,8; $m=3$; $f=50\text{Hz}$

1. Proveďte elektromagnetický návrh.
2. Vypracujte konstrukční uspořádání stroje.
3. Navrhňte a popište ventilační systém stroje.

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

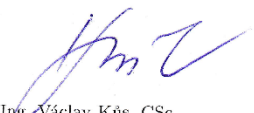
1. Kopylov, I.P.: Stavba elektrických strojů, SNTL 1988.
2. Cigánek, L.: Stavba elektrických strojů, SNTL 1958.

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

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2015**
Termín odevzdání bakalářské práce: **2. června 2016**


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




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce pojednává o elektromagnetickém návrhu malého synchronního generátoru s vyniklými póly, který je dimenzován na výkon 120 kVA. Dále se tato práce zabývá popisem vinutí statoru, zjištění možného počtu paralelních větví, a také návrhem a popisem ventilačního systému stroje. Obsahem práce je i příčný a podélný řez stroje spolu s vyznačeným ventilačním systémem.

Klíčová slova

Synchronní generátor s vyniklými póly, synchronní stroj, magnetický obvod, vinutí statoru, návrh drážky, ventilační systém stroje, vzduchová mezera, účinnost, ztráty, návrh vinutí

Abstract

This bachelor thesis deals about the electromagnetic design of small synchronous generator with salient poles, which is rated at 120 kVA power. The thesis is also focused on stator winding, finding possible number of parallel branch circuits and the design and description of the ventilation system of the machine. This work contains also a cross and longitudinal sectional view of the machine together with the ventilation system.

Key words

Synchronous generator with salient poles, synchronous machine, magnetic circuit, stator winding, slots proposal, the ventilation system of the machine, air gap, efficacy, losses, winding proposal

Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 1.6.2016

Filip Kotyza

Poděkování

Tímto bych velice rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce Doc. Ing Josefovi Červenému, CSc. za jeho velmi cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	7
ÚVOD	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK (LATINSKÉ PÍSMO)	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK (ŘECKÉ PÍSMO)	13
1 SYNCHRONNÍ STROJ	14
1.1 OBECNÉ POZNATKY.....	14
1.1.1 <i>Alternátory</i>	14
1.1.2 <i>Kompenzátory</i>	14
1.1.3 <i>Motory</i>	15
1.2 PRINCIP ČINNOSTI.....	15
1.3 USPOŘÁDÁNÍ SYNCHRONNÍCH STROJŮ.....	15
2 ZADANÉ HODNOTY	16
3 ELEKTROMAGNETICKÝ VÝPOČET GENERÁTORU	16
3.1 ZÁKLADNÍ HODNOTY.....	16
3.2 NÁVRH VINUTÍ INDUKTU (STATORU).....	18
3.3 NÁVRH DRÁŽKY INDUKTU.....	22
3.4 ODPOR A ROZPTYLOVÁ REAKTANCE STATOROVÉHO VINUTÍ.....	25
3.4.1 <i>Čela statorového vinutí</i>	25
3.4.2 <i>Odpor Jedné fáze ve statorovém vinutí</i>	27
3.4.3 <i>Rozptylová reaktance statorového vynutí</i>	28
3.5 NÁVRH MAGNETICKÉHO OBVODU.....	28
3.5.1 <i>Určení magnetického toku Φ</i>	28
3.5.2 <i>Magnetizační charakteristika</i>	33
3.5.3 <i>Návrh budícího vinutí</i>	36
3.5.4 <i>Ztráty a účinnost</i>	40
3.6 VENTILAČNÍ SYSTÉM STROJE.....	43
3.7 KONSTRUKČNÍ USPOŘÁDÁNÍ STROJE.....	42
ZÁVĚR	43
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	45
SEZNAM PŘÍLOH	45
PŘÍLOHY	1

Úvod

Tématem předkládané práce je navrhnout elektromagnetický synchronní generátor s vyniklými póly dle zadaných parametrů a obecně navrhnout a popsání ventilačního systému stroje. Celá práce je rozdělena do několika částí, první část se zabývá určením hlavních rozměrů a parametrů stroje. Další část této práce je vyhrazena podrobnému návrhu vinutí induktu - statoru, návrhu drážky, statorového vinutí, řezu drážky, a také výsledného úbytku napětí na odporu a rozptylové reaktanci statorového vinutí. Následně je ve třetí části řešen návrh magnetického obvodu, jehož výsledkem je sestavení magnetizační charakteristiky a následné zjištění magnetického budícího napětí. Čtvrtá část této práce je zaměřena na návrh budící vinutí, výpočtu ztrát a účinnosti stroje. V poslední části je obecně navrhnout a popsán ventilační systém stroje. Závěr práce také obsahuje technické výkresy příčného a podélného řezu stroje.

Seznam symbolů a zkratek (latinské písmo)

$2p$	Počet pólů	[-]
A	Lineární obvodová proudová hustota	[A/m]
a	Přesahující část pólového nástavce	[m]
a_{\approx}	Počet paralelních větví	[-]
B	Magnetická indukce	[T]
B'_{z1}	Imaginární magnetická indukce v hlavě zubu	[T]
B'_{z2}	Imaginární magnetická indukce ve středu zubu	[T]
B'_{z3}	Imaginární magnetická indukce v patě zubu	[T]
b_{ε}	Šířka čela	[m]
b_d	Šířka drážky	[m]
B_{jr}	Magnetická indukce jha rotoru	[T]
b_k	Šířka kartáčů	[m]
b_n	Šířka pólového nástavce	[m]
b_p	Šířka pólu	[m]
B_{z1}	Reálná magnetická indukce v hlavě zubu	[T]
B_{z2}	Reálná magnetická indukce ve středu zubu	[T]
B_{z3}	Reálná magnetická indukce v patě zubu	[T]
B_{δ}	Magnetická indukce vzduchové mezery	[T]
C	Essonův činitel elmag. využití stroje	[kVA/m ³ ot/min]
C_1	Činitel základní harmonické mg. indukce ve vzduch. mez.	[-]
C_{d1}	Cartérův činitel v podélném směru	[-]
$\cos \varphi$	Účinitel	[-]
C_{q1}	Cartérův činitel v příčném směru	[-]
D_1	Vnitřní průměr statoru	[m]
D_2	Vnitřní průměr statoru + $\frac{1}{2} h_d$	[m]
D_3	Vnitřní průměr statoru + $2 \cdot h_d$	[m]
d_H	Průměr volného konce hřídele	[m]
D_{je}	Vnější průměr statoru	[m]
D_k	Vnější průměr kroužků	[m]
E	Vyložení čel	[m]
f	Frekvence	[Hz]

F	Magnetické napětí	[A]
F'_a	Amplituda základní harmonické reakce kotvy	[A]
F_b	Budící magnetické napětí	[A]
F_{d1}	Amplituda zákl. harmonické mg. napětí v podélném směru	[A]
F_{q1}	Amplituda zákl. harmonické mg. napětí v příčném směru	[A]
F_z	Magnetické napětí v zubu statoru	[A]
F_δ	Magnetické napětí vzduchové mezery	[A]
H	Magnetická intenzita	[A/m]
h_c	Výška cívký	[m]
h_{js}	Výška jádra induktu	[m]
h_n	Výška pólového nástavce	[m]
h_p	Výška pólu	[m]
$H_{stř}$	Střední hodnota magnetické intenzity v zubech statoru	[A/m]
h_v	Výška vodiče	[m]
i	Počet paketů	[-]
I_1	Fázový proud	[A]
I_b	Budící proud	[A]
i_k	Počet ventilačních kanálů	[-]
l_k	Délka kartáčů v axiálním směru	[m]
k	Překladové číslo	[-]
k_c	Carterův činitel	[-]
k_{cd}	Carterův činitel respektující vliv drážkování induktu	[-]
k_{ck}	Carterův činitel respektující vliv ventilačních kanálů	[-]
k_{Cu}	Činitel zvýšení elektrického odporu	[-]
k_{Fe}	Činitel plnění železa	[-]
k_{vv}	Činitel vinutí k-té harmonické	[-]
k_{z1}	Činitel pro přepočtení magnetické indukce v hlavě zubu	[-]
k_{z2}	Činitel pro přepočtení magnetické indukce ve středu zubu	[-]
k_{z3}	Činitel pro přepočtení magnetické indukce v patě zubu	[-]
L	Celková délka induktu	[m]
l_{be}	Vnější obvod budící cívký	[m]
l_{bs}	Střední délka závitů cívký	[m]
$l_{\check{c}}$	Délka čela	[m]
l_e	Efektivní délka stroje	[m]

l_p	Délka střední siločáry pólu	[m]
L_r	Délka rotoru s ohledem na dosednutí budící cívky	[m]
l_r	Délka střední siločáry jha rotoru	[m]
l_s	Délka střední siločáry jádra induktu	[m]
l_v	Délka vodiče	[m]
m	Počet fází	[-]
m'	Matematický počet fází	[-]
m_{Fej}	Hmotnost jádra statoru	[kg]
m_{Fez}	Hmotnost zubů statoru	[kg]
n	Jmenovité otáčky	[ot/min]
n_d	Počet vodičů v drážce	[-]
n_m	Maximální otáčky	[ot/min]
n_s	Počet segmentů	[-]
N_s	Počet závitů v sérii jedné fáze	[-]
o	Délka oka	[m]
O_{2pc}	Ochlazovací povrch všech cívek	[m ²]
P	Činný výkon	[W]
p	počet pólpárů	[-]
p_k	Měrný tlak kartáčů	[kPa]
Q	Počet drážek induktu	[-]
q	Počet drážek na pól a fázi	[-]
Q_p	Počet drážek na pól	[-]
$Q_{př}$	Počet drážek na překlad	[-]
$R'_{1/20}$	Elektrický odpor při stejnosměrném proudu	[Ω]
$R_{1/20}$	Odpor při střídavém proudu a 20°C	[Ω]
$R_{1/75}$	Odpor při střídavém proudu a 75°C	[Ω]
$R_{b/75}$	Odpor všech cívek budícího vinutí	[Ω]
S	Zdánlivý výkon	[kVA]
S'_{Cub}	Průřez vodiče budící cívky	[m ²]
S'_{Cu1}	Průřez vodiče	[mm ²]
S_k	Celkový průřez kartáčů jedné polarity	[m ²]
t_{d1}	Mezidrážková rozteč	[m]
t_{d2}	Mezidrážková rozteč ve středu zubu	[m]

t_{d3}	Mezidrážková rozteč v patě zubu	[m]
t_i	Tloušťka izolace mezi závitů	[m]
t_k	Tloušťka kostřičky budící cívky	[m]
t_k	Rozteč kartáčů	[m]
t_p	Mezipólová rozteč	[m]
U_b	Budící napětí	[V]
U_f	Fázové napětí	[V]
$u_{př}$	Přechodové napětí kartáčů	[V]
u_R	Procentní úbytek napětí na odporu	[%]
U_s	Sdružené napětí	[V]
u_σ	Procentní úbytek napětí na rozptylové reaktanci	[%]
v	Výběh cívky z drážky	[m]
v_k	Obvodová rychlost kroužků	[m/s]
v_0	Maximální obvodová rychlost	[m/s]
x_d	Procentní hodnota nesyčené procentní reaktance	[%]
X_σ	Rozptylová reaktance statorového vinutí	[Ω]
x_σ	Procentní hodnota rozptylové reaktance	[%]
y_1	Přední cívkový krok	[-]
y_{1d}	Cívkový krok	[-]
y_2	Zadní cívkový krok	[-]
y_k	Krok na komutátoru	[-]
z_1	Šířka hlavy zubu	[m]
z_2	Šířka středu zubu	[m]
z_3	Šířka paty zubu	[m]

Seznam symbolů a zkratek (řecké písmo)

α	Činitel pólového krytí	[-]
α_{ε}	Úhel sklonu čel	[°]
β	Poměrné zkrácení kroku	[-]
δ	Vzduchová mezera	[m]
ΔP	Celkové ztráty	[W]
ΔP_{Cu1}	Jouleovy ztráty ve vinutí statoru	[W]
ΔP_{Cub}	Ztráty v budícím vinutí	[W]
Δp_{Fe}	Ztrátové číslo plechů	[W/kg]
ΔP_{Fej}	Ztráty v jádře induktu	[W]
ΔP_{Fez}	Ztráty v zubech statoru	[W]
ΔP_m	Mechanické ztráty	[W]
ΔP_o	Povrchové ztráty	[W]
$\Delta P_{přid}$	Přídavné ztráty	[W]
$\Delta \vartheta_{Cub}$	Oteplení budící cívky	[°C]
η	Účinnost	[%]
μ	Součinitel tření kartáčů	[-]
ν	Poměrná hodnota mezipólového rozptylového toku	[-]
ξ	Náhradní výška vodiče	[m]
ρ_{Cu}	Měrný odpor vodiče	[$\Omega\text{m}/\text{mm}^2$]
ρ_{Cub}	Proudová hustota ve vodiči	[A/m ²]
σ_{Cu1}	Proudová hustota ve vodiči	[A/m ²]
σ_k	Maximální proudové zatížení kartáčů	[A/cm ²]
φ	Fázový posun	[°]
Φ	Magnetický tok	[Wb]

1 Synchronní stroj

1.1 Obecné poznatky

Synchronní stroje jsou stroje elektrické točivé, které se nejčastěji využívají k přeměně mechanické energie na energii elektrickou. Nazýváme je alternátory. Synchronní stroje se ale také používají jako stroje pro výrobu jalové energie, kterou dodávají do elektrické sítě a zlepšují tak účinnost. Tyto stroje, v generátorickém režimu, se nazývají kompenzátory. Synchronní stroje lze také samozřejmě využívat v motorickém režimu, kde se mění energie elektrická na energii mechanickou.

1.1.1 Alternátory

Alternátory jsou stroje pro výrobu elektrické energie z energie mechanické. Dělíme je na dva základní druhy.

Turboalternátory

Jsou to synchronní generátory s hladkým rotorem a vyrábějí se jako dvoupólové. V elektrárnách jsou poháněny parními nebo plynovými turbínami. Rychlost otáčení je pro ně typická 3000 ot/min a vyrábějí se nejčastěji v rozsahu výkonů od 630 do 12 500 kW, ale i více. Používají se jako generátory v klasických tepelných a jaderných elektrárnách.

Hydrogenerátory

Jako hydrogenerátory se používají synchronní generátory s vyniklými póly. Rychlost otáčení mají podstatně menší než turboalternátory a jejich rozsah je od 1500 ot/min do 100 ot/min. Jsou vyráběny jako 4 a více pólové stroje pro jmenovité výkony od několika desítek wattů do několika desítek tisíc kilowattů. Používají se jako generátory v přečerpávacích, průtočných a akumulacích vodních elektrárnách, ale také jako například soustrojí tvořené alternátorem a spalovacím motorem, alternátorem a elektromotorem apod.

1.1.2 Kompenzátory

Synchronní stroje v generátorickém režimu se mimo jiné také používají jako tzv. synchronní kompenzátory. Pracují jako elektrický motor naprázdno. Jsou to zařízení, které dle

nastaveného buzení vyrábí jalovou energii, kterou následně dodávají do elektrické sítě a tím kompenzují její účinník. Lze pomocí nich řídit nejen kompenzaci účinníku, ale i napětí v síti.

1.1.3 Motory

Jsou to motory, které se používají hlavně pro pohon zařízení velkých výkonů, řádově stovek až tisíce kilowattů. Typické použití synchronních motorů je tam, kde se požaduje pokud možno trvalé zapnutí stroje a kdy poháněné zařízení nevyžaduje řízení otáček. Jsou např. kompresory, čerpadla, kulové mlýny atd. Zvláštním případem použití je také v přečerpávacích vodních elektrárnách. Jejich funkce jako generátoru je totiž pouze při pokrývání špiček okamžité spotřeby a pokud nepracují jako generátor, tak musí pracovat jako zátěž neboli čerpadlo, které přečerpává vodu z nižší nádrže zpět do vyšší.

1.2 Princip činnosti

Popis principu je popsán na synchronním motoru. Stroj je tvořen ze dvou základních částí – stator a rotor. Stator je obvykle osazen střídavým trojfázovým vinutím, v některých speciálních případech se ojediněle používají vinutí jednofázová. Je v zásadě stejný jako u asynchronního stroje. Rotor je tvořen soustavou pólů, které jsou buzeny stejnosměrným proudem. V případě menších motorů jsou použity permanentní magnety. Pokud přivedeme na statorové vinutí trojfázový proud, tak vlivem tohoto proudu začne vznikat točivé magnetické pole, které sebou unáší magnetové kolo buzeného rotoru. Motor se tedy po roztočení otáčí současně s magnetickým polem synchronními otáčkami, které se ani při zatížení nemění. Z toho vyplývá, že rotor se tedy otáčí současně s magnetickým polem statoru a z této přímé závislosti kmitočtu a otáček se právě používá název synchronní stroj.

1.3 Uspořádání synchronních strojů

Synchronní stroje rozeznáváme mezi sebou podle uspořádání rotoru. Prvním uspořádáním rotoru je tzv. vyjádření s vyniklými (vyjádřenými) póly, kde je rotor složen z rotorového kola, na němž je připevněn určitý počet pólů (4 a víc) a každý pól má svou budící cívku. Druhým uspořádáním je tzv. uspořádání s hladkým rotorem. Rotor je zde tvořen pevným válcem, ve kterém jsou na povrchu umístěny hladké drážky a v nich je uloženo soustředné budící vinutí napájené stejnosměrným proudem tak, že se rotor magnetuje. Toto uspořádání je obvykle dvoupólové. Stroje jsou zpravidla trojfázové.

2 Zadané hodnoty

Zdánlivý výkon: $S = 120 \text{ kVA}$

Sdružené napětí: $U = 400 \text{ V}$

Počet pólů: $2p = 4$

Účinník: $\cos\varphi = 0,8$

Počet fází: $m = 3$

Frekvence: $f = 50 \text{ Hz}$

3 Elektromagnetický výpočet generátoru

3.1 Základní hodnoty

Činný výkon:

$$P = S \cdot \cos\varphi = 120 \cdot 0,8 = 96 \text{ kW} \quad (1)$$

Fázové napětí:

$$U_f = \frac{U}{\sqrt{3}} = \frac{400}{\sqrt{3}} = 230,94 \text{ V} \quad (2)$$

Počet pól párů:

$$2p = 4 \rightarrow p = 2 \quad (3)$$

Jmenovité otáčky:

$$n = \frac{60 \cdot f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{2} = 1500 \text{ ot/min} \quad (4)$$

Fázový proud:

$$I_1 = \frac{S}{U_S \cdot \sqrt{3}} = \frac{120 \cdot 10^3}{400 \cdot \sqrt{3}} = 173,21 \text{ A} \quad (5)$$

Průměr induktu (statoru) ve vzduchové mezeře (vrtání statoru):

a) Určení pomocí empirického vztahu:

$$D_1 = 0,08 \cdot 2p^{0,625} \cdot S^{0,185} = 0,08 \cdot (4)^{0,625} \cdot 120^{0,185} = 0,46 \text{ m} \quad (6)$$

b) Určení hodnoty z grafu (viz příloha [1]):

$$D_1 = 0,44 \text{ m}$$

Jak je vidět, obě hodnoty jsou trochu odlišné. Je nutné podotknout, že graf, ze kterého byly odečteny hodnoty, ale i empirický vztah, jsou založeny na základě dlouhodobých zkušeností konstruktérů strojů. Pro mé další výpočty volím výsledek dle empirického vztahu:

$$D_1 = 0,46 \text{ m}$$

Mezipólová rozteč:

$$t_p = \frac{\pi \cdot D_1}{2p} = \frac{\pi \cdot 0,46}{4} = 0,36 \text{ m} \quad (7)$$

Obvodová prostorová hustota:

$$A = 36000 \text{ A/m}$$

kde A je hodnota prostorové hustoty odečtena z grafu (viz příloha [2])

Indukce ve vzduchové mezeře (při jmenovitém zatížení):

$$B_\delta = 0,7 \text{ T}$$

kde B_δ je hodnota odečtena z grafu (viz příloha [2])

Činitel pólového krytí:

$$\text{Volím: } \alpha = 0,65$$

Jedná se o předběžně zvolenou hodnotu činitele. Z důvodu nedostatečné znalosti uspořádání, rozměrů pólového nástavce, velikosti pólové rozteče t_p a vzduchové mezery δ nelze hodnotu činitele pólového krytí určit přesněji. [1]

3.2 Návrh vinutí induktu (statoru)

Mezidrážková rozteč:

S ohledem na průměr a napětí stroje volím hodnotu: $t_{d1} = 27 \text{ mm}$

Této hodnotě mezidrážkové rozteče odpovídá:

Počet drážek induktu:

$$Q = \frac{\pi \cdot D_1}{t_{d1}} = \frac{\pi \cdot 460}{27} = 53,52 \quad (8)$$

Počet drážek na pól a fázi:

$$q = \frac{Q}{2p \cdot m} = \frac{53,52}{4 \cdot 3} = 4,46 \quad (9)$$

Z důvodu menšího počtu drážek na pól a fázi než je hodnota 7 až 8, volím zlomkové vinutí, tedy $q = \frac{n}{c}$, které v našem případě zajistí znatelně lepší průběh napětí pod póly.

Výše uvedené výpočty počtu drážek induktu Q a počtu drážek na pól a fázi q jsou pouze orientační a budeme z nich vycházet v dalším postupu. Pro přesnější určení počtu drážek Q , musíme u výpočtu drážek na pól a fázi q dodržet několik kritérií.

1. První kritérium je, aby počet drážek Q v každé fázi m , bylo celé číslo, tedy:

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

2. Druhé kritérium je takové, že počet drážek na pól a fázi q musí vyjít jako celé číslo nebo zlomek, který už nelze dále krátit. Dále musí hodnota c nabývat pouze nižších hodnot než počet pólových dvojic p a nesmí být dělitelné počtem fází m .
3. Poslední podmínkou je, že počet drážek Q by mělo být možné rozložit na co největší součin prvočinitelů (prvočísel), aby mohl být zvolen co nejoptimálnější počet segmentů plechu induktu. [1]

Z výše uvedených kritérií vyplývá, že jedinou možnou hodnotou počtu drážek na pól a fázi q může být:

$$q = 4\frac{1}{2} = \frac{9}{2}, \text{ z čehož plyne:}$$

$$Q = 2p \cdot m \cdot q = 4 \cdot 3 \cdot \frac{9}{2} = 54 \rightarrow 2 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 3 \quad (10)$$

Počet drážek odpovídající vypočítanému zlomkovému vinutí:

$$Q = 2p \cdot m \cdot q = 4 \cdot 3 \cdot \frac{9}{2} = 54 \quad (11)$$

Počet drážek na fázi:

$$Q_f = \frac{Q}{m} = \frac{2p \cdot m \cdot q}{m} = 2p \cdot q = 4 \cdot \frac{9}{2} = 18 \quad (12)$$

Počet drážek na pól:

$$Q_p = \frac{Q}{2p} = \frac{54}{4} = 13,5 \quad (13)$$

Parametry vinutí

Počet závitů jedné fáze v sérii:

$$N_s = \frac{\pi \cdot D_1 \cdot A}{2 \cdot m \cdot I_1} = \frac{\pi \cdot 0,46 \cdot 36000}{2 \cdot 3 \cdot 173,21} = 50,1 \quad (14)$$

Počet vodičů v drážce:

$$n_d = \frac{a_{\approx} \cdot N_s}{p \cdot q} = \frac{2 \cdot 50,1}{2 \cdot \frac{9}{2}} = 11,13 \quad (15)$$

kde a_{\approx} je počet paralelních větví každé fáze střídavého vinutí

Počet paralelních větví a_{\approx} jsem pro další výpočty zvolil 2. Pro dvouvrstvé vinutí musí počet vodičů v drážce vycházet jako celé sudé číslo. Je potřeba proto můj výsledek $n_d = 11,13$ zaokrouhlit. Možnosti zaokrouhlení máme buďto nahoru na hodnotu $n_d = 12$ nebo dolů na hodnotu $n_d = 10$. Při zaokrouhlení nahoru, tudíž $n_d = 12$, by obvodová proudová hustota A vycházela příliš vysoko ($A = 38833 \text{ A/m}$), proto volím:

$$n_d = 10$$

Při volbě počtu paralelních větví $a_{\approx} > 1$ si ale musíme dát pozor na proveditelnost tohoto zapojení. Tuto možnost lze ověřit pomocí tzv. Tingleyho a pilového schéma.

Počet závitů v sérii jedné fáze:

$$N_s = \frac{n_d \cdot p \cdot q}{a_{\approx}} = \frac{10 \cdot 2 \cdot \frac{9}{2}}{2} = 45 \quad (16)$$

A poté skutečná hodnota obvodové proudové hustoty:

$$A = \frac{2 \cdot m \cdot I_1}{\pi \cdot D_1} \cdot N_s = \frac{2 \cdot 3 \cdot 173,21}{\pi \cdot 0,46} \cdot 45 = 32360 \text{ A/m} \quad (17)$$

Shrnutí a dopočítání parametrů vinutí

Počet drážek:	$Q = 54$
Počet pólů:	$2p = 4$
Počet fází:	$m = 3$
Matematický počet fází:	$m' = 6$
Počet drážek na pól a fázi:	$q = \frac{9}{2}$

Počet drážek na pól:

$$Q_p = \frac{Q}{2p} = \frac{54}{4} = 13,5 \quad (18)$$

Nyní musím zvolit hodnotu cívkového kroku y_{1d} . Tato hodnota se volí tak, aby poměrné zkrácení kroku β vycházelo v rozmezí hodnot 0,81 až 0,88.

Volím cívkový krok: $y_{1d} = 11$

Poměrné zkrácení kroku:

$$\beta = \frac{y_{1d}}{Q_p} = \frac{11}{13,5} = 0,82 \quad (19)$$

Vinutí střídavé:

Počet skupin vinutí:

$$a_{ss} \cdot m' = 2 \cdot 6 = 12 \quad (20)$$

Počet skupin v jedné fázi:

$$\frac{a_{ss} \cdot m'}{m} = \frac{2 \cdot 6}{3} = 4 \quad (21)$$

Počet cívek ve skupině:

$$\frac{Q}{a_{ss} \cdot m'} = \frac{54}{2 \cdot 6} = 4,5 \quad (22)$$

Výpočet činitelů vinutí

Pro určení jednotlivých činitelů vinutí v -té harmonické 1, 5, 7, 11 a 13 budu využívat základního vzorce:

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

kde vje řád harmonické

βje poměrné zkrácení kroku

m' ...matematický počet fází

nčinitel z počtu drážek na pól ($q = \frac{n}{c}$)

Činitel základní harmonické ($v = 1$):

$$k_{v1} = \sin\left(1 \cdot 0,82 \cdot \frac{\pi}{2}\right) \cdot \frac{\sin\left(1 \cdot \frac{\pi}{6}\right)}{9 \cdot \sin\left(1 \cdot \frac{\pi}{6 \cdot 9}\right)} = 0,92 \quad (23)$$

Po postupném dosazování zbylých řádů harmonických $v = 5, 7, 11$ a 13:

$$k_{v5} = 0,03 \quad (24)$$

$$k_{v7} = -0,06 \quad (25)$$

$$k_{v5} = -0,09 \quad (26)$$

$$k_{v5} = -0,07 \quad (27)$$

Výpočet Essonova činitele:

Jedná se o činitele, který ukazuje skutečnou hodnotu elektromagnetického využití stroje.

$$C = \frac{\pi^2}{60 \cdot \sqrt{2}} \cdot A \cdot B_\delta \cdot k_{v1} = \frac{\pi^2}{60 \cdot \sqrt{2}} \cdot 32,360 \cdot 0,7 \cdot 0,92 = 2,42 \frac{kVA}{m^3 \cdot \frac{ot}{min}} \quad (28)$$

kde A je obvodová proudová hustota dosazena v kA

Poté efektivní délka stroje:

$$l_e = \frac{S}{C \cdot D_1^2 \cdot n} = \frac{120}{2,42 \cdot 0,46^2 \cdot 1500} = 0,16 \text{ m} \quad (29)$$

Počet paketů:

$$i = \frac{l_e}{\check{s}_p} = \frac{0,16}{0,05} = 4 \quad (30)$$

kde \check{s}_p je šířka paketu kterou uvažují o velikosti 50 mm .

Počet kanálů:

$$i_k = i - 1 = 4 - 1 = 3 \quad (31)$$

Celková délka induktu:

$$L = l_e + \check{s}_k \cdot i_k = 0,16 + 0,01 \cdot 3 = 0,19 \text{ m} \quad (32)$$

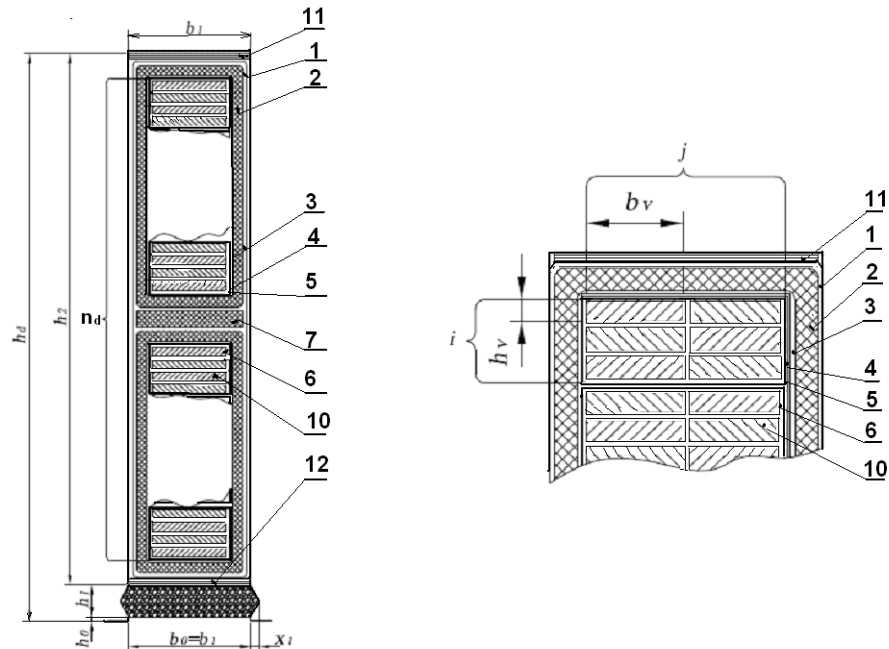
kde \check{s}_k je šířka ventilačního kanálu, kterou pro zjištění celkové délky induktu uvažují o velikosti 10 mm .

3.3 Návrh drážky induktu

Při výpočtu parametrů vinutí jsem zvolil počet vodičů v drážce $n_d = 10$. Z toho plyne, že pro další výpočty musím uvažovat tzv. závitové vinutí, které se používá pro hodnoty $n_d > 2$. V opačném případě pro $n_d = 2$, tudíž dvou vodičů v drážce, by byl použit výpočet pro tzv. Roebelovu neboli permutovanou tyč.

Na induktu mám na výběr ze dvou typů drážek, otevřenou nebo zavřenou. Nejčastěji se u mého použitého návrhu používají otevřené obdélníkové drážky tvaru M a N (viz příloha

[4]). Tyto drážky se používají u strojů s vyšším výkonem – tyčová vinutí. Zuby mají poté lichoběžníkový tvar. Uzavřené drážky se používají u menších strojů pro vsypávaná vinutí. Na induktu proto volím otevřenou obdélníkovou řádku tvaru M. Schématický tvar drážky je uveden na obrázku 1. Jednotlivé očíslované rozměry jsou pojmenovány a zobrazeny v Tab. 1.



Obrázek 1: Řez drážkou induktu [5]

Velikost drážkové rozteče na průměru D_1 :

$$t_{d1} = \frac{\pi \cdot D_1}{Q} = \frac{\pi \cdot 460}{54} = 26,76 \text{ mm} \quad (33)$$

Šířka zubu:

$$z_1 = \frac{B_\delta \cdot t_{d1}}{B'_{z1} \cdot k_{Fe}} = \frac{0,7 \cdot 26,76}{1,7 \cdot 0,92} = 11,98 \text{ mm} \quad (34)$$

kde B_{z1} je magnetická indukce v hlavě zubu (dle doporučené literatury [1])

k_{Fe} je činitel plnění železa

Šířka drážky:

$$b_d = t_{d1} - z_1 = 26,76 - 11,98 = 14,78 \text{ mm} \quad (35)$$

Nejbližší normalizovaná hodnota určená z tabulky pro drážku M:

$$b_d = 14,5 \text{ mm}$$

kde b_d je zvolená hodnota z použité literatury [1]

Poté skutečná šířka zubu:

$$z_1 = t_{d1} - b_d = 26,76 - 14,5 = 12,26 \text{ mm} \quad (36)$$

V mém případě se jedná o závitové vinutí ($n_d = 10$), kterému odpovídá pro napětí 400 V následující uspořádání vodičů a izolace v drážce induktu.

Poz.	Položka	Šířka		Hloubka	
1	Vyložení drážky	$2 \cdot 0,15$	-	$3 \cdot 0,15$	-
2	Izolace proti železu	$2 \cdot t_i \rightarrow 2 \cdot 0,45$	0,9	$4 \cdot t_i \rightarrow 4 \cdot 0,45$	1,8
3	Tmelení	$2 \cdot 0,1$	0,2	$4 \cdot 0,1$	0,4
4	Stažení vodičů	$2 \cdot 0,15$	0,3	$4 \cdot 0,15$	0,6
5	Izolace závitů	$2 \cdot 0,48$	0,96	$2 \cdot n_d \cdot 0,48 \rightarrow 2 \cdot 10 \cdot 0,48$	9,6
6	Izolace vodičů	$1 \cdot j \cdot 0,37 \rightarrow 1 \cdot 1 \cdot 0,37$	0,37	$n_d \cdot i \cdot 0,37 \rightarrow 10 \cdot 1 \cdot 0,37$	3,7
7	Mezivrstva	-	-	$1 \cdot m_v \rightarrow 1 \cdot 3$	3
8	Součet izolace		3,03		19,1
9	Vůle na šířku	0,2 až 0,6	0,47	-	-
10	Holý vodič	$j \cdot b_v \rightarrow 1 \cdot 11$	11	$n_d \cdot i \cdot h_v \rightarrow 10 \cdot 1 \cdot 1,8$	18
11	Vložka na dno	-	-	$1 \cdot 1$	1
12	Vložka pod klín	-	-	$1 \cdot 0,5$	0,5
13	Vůle na hloubku	-	-	0,4 až 2	1,4
14	Rozměr drážky bez klínu	b_d	14,5	h_2	40
15	Klín + můstek	-	-	$h_0 + h_1 \rightarrow 1 + 5$	6
16	Konečný rozměr drážky	b_d	14,5	h_d	46

Tab. 1: Rozbor konečného rozměru drážky

Hodnotu tloušťky izolace proti železu volím $t_i = 0,45 \text{ mm}$ (obyčejná) a hodnotu mezivrstvy $m_v = 3 \text{ mm}$. Obě tyto hodnoty jsou brány s ohledem na sdružené napětí stroje 400 V. Pro potlačení přídavných ztrát vlivem skinefektu se původně jeden vodič obvykle rozděluje na více vodičů. V mém případě nebylo rozdělení nutné, jelikož výška vodiče h_v je pouze 1,8 mm a potlačení ztrát není nutné. Vodiče volím dle normy ČSN (viz příloha [5]).

Hloubka drážky bez klínu (h_2) se volí dle doporučení ČSN, tak aby tato hodnota byla zakončena číslicemi 0, 2, 5 nebo 8. Z toho plyne, že např. hodnota h_2 se může rovnat 100 (respektive 102, 105 nebo 108). Hodnotu vložky pod drážkovým klínem určíme součtem výšky všech vodičů a izolací v drážce a následně tuto hodnotu odečteme od nejbližších vyšších hodnot h_2 , tak aby platila dle doporučení ČSN. Výsledná hodnota nám určuje výšku vložky pod klín. [5]

Průřez vodiče:

$$S'_{Cu1} = \frac{I_1}{a_{st} \cdot \sigma'_{Cu1}} = \frac{173,21}{2 \cdot 4,77} = 18,16 \text{ mm}^2 \quad (37)$$

kde σ'_{Cu1} je proudová hustota ve vodiči zjištěná dle empirického vztahu

Proudová hustota ve vodiči:

$$\sigma'_{Cu1} = \sqrt{\frac{K}{b_v}} = \sqrt{\frac{250}{11}} = 4,77 \text{ A/mm}^2 \quad (38)$$

kde K je konstanta závislá na napětí určená dle použité literatury [5]

kde b_v je šířka holého vodiče v drážce (viz Tab. 1)

Skutečný průřez vodiče dle ČSN 42 8308-1959 (příloha [5]):

$$\text{Volím: } S_1 = 19,5 \text{ mm}^2$$

Poté skutečný průřez vodičů tvořících jeden závit je:

$$S_{Cu1} = i \cdot j \cdot S_1 = 1 \cdot 1 \cdot 19,5 = 19,5 \text{ mm}^2 \quad (39)$$

A dále skutečná proudová hustota:

$$\sigma_{Cu1} = \frac{I_1}{a_{st} \cdot S_{Cu1}} = \frac{173,21}{2 \cdot 19,5} = 4,44 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2} \quad (40)$$

3.4 Odpor a rozptylová reaktance statorového vinutí

3.4.1 Čela statorového vinutí

Vzdálenost mezi čely:

$$c = 4 + \frac{U[kV]}{2} = 4 + \frac{0,4}{2} = 4,2 \text{ mm} \quad (41)$$

Úhel sklonu čel válcového vinutí:

$$\sin \alpha_{\xi} = \frac{b_{\xi} + c}{t_{d1}} = \frac{14,5 + 4,2}{26,76} = 0,7 \quad (42)$$

$$\alpha_{\xi} = \arcsin(0,7) = 44,33^{\circ} \quad (43)$$

kde b_{ξ} je hodnota rovna šířce drážky b_d

Délka vinutí mezi okem a výběhem cívky:

$$x = \frac{\beta \cdot t_p}{2 \cdot \cos \alpha_{\xi}} = \frac{0,82 \cdot 360}{2 \cdot \cos(44,33)} \approx 207 \text{ mm} \quad (44)$$

Výška čela:

$$h_{\xi} = \frac{1}{2} \cdot (h_2 - m) = \frac{1}{2} \cdot (40 - 6) = 17 \text{ mm} \quad (45)$$

Střední poloměr ohybu čela:

$$R = r + \frac{h_{\xi}}{2} = 5 + \frac{17}{2} = 13,5 \text{ mm} \quad (46)$$

kde r je vnitřní poloměr ohybu čela, který se volí v rozmezí hodnot $5 \div 20$ mm,
volím $r = 5$

Délka oka:

$$o = \frac{\pi \cdot R}{2} = \frac{\pi \cdot 13,5}{2} = 21,2 \text{ mm} \quad (47)$$

Délka čela přepočtená na metry:

$$l_{\xi} = 2 \cdot (v + x + o) = 2 \cdot (0,01 + 0,207 + 0,0212) = 0,48 \text{ m} \quad (48)$$

kde v je výběh cívky z drážky závislý na jmenovitém napětí (viz Tab. 2)

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

Tab. 2: Závislost jmenovitého napětí na výběhu cívky z drážky

Délka vodiče v metrech:

$$l_v = L + l_{\xi} = 0,19 + 0,48 = 0,67 \text{ m} \quad (49)$$

Vyložení čel v podélném směru:

Délka oka:

$$e = h_{\xi} + r = 17 + 5 = 22 \text{ mm} \quad (50)$$

Průmět x do osového směru:

$$y = \frac{\beta \cdot t_p}{2} \cdot \operatorname{tg} \alpha_{\xi} = \frac{0,82 \cdot 360}{2} \cdot \operatorname{tg}(44,33) \approx 145 \text{ mm} \quad (51)$$

Celkové vyložení čel přepočteno na metry:

$$a = v + y + B = 0,01 + 0,145 + 0,022 = 0,18 \text{ m} \quad (52)$$

3.4.2 Odpor jedné fáze ve statorovém vinutí

Elektrický odpor $R'_{1/20}$ je uvažován pro stejnosměrný proud. Díky tomu můžeme zanedbat vliv skinefektu, který ke svému vzniku potřebuje frekvenci (střídavým průběh) a výpočet si značně zjednodušíme.

$$R'_{1/20} = \rho_{cu} \cdot \frac{2 \cdot l_v \cdot N_s}{a_{st} \cdot S_{Cu1}} = \frac{1}{56} \cdot \frac{2 \cdot 0,67 \cdot 45}{2 \cdot 19,5} = 0,0276 \Omega \quad (53)$$

kde ρ_{cu} je hodnota měrného odporu měděného vodiče při teplotě 20°C

Vliv skinefektu:

Náhradní výška vodiče:

$$\xi = 2\pi \cdot h_v \cdot \sqrt{\frac{j \cdot b_v \cdot f}{b_d \cdot \rho_{cu}} \cdot 10^{-7}} = 2\pi \cdot 21,8 \cdot \sqrt{\frac{1 \cdot 11 \cdot 50}{14,5 \cdot \frac{1}{56}} \cdot 10^{-7}} = 0,16 \quad (54)$$

Činitel zvýšení elektrického odporu:

$$k_{Cu} = \frac{g^2 - 0,2}{9} \cdot \xi^4 = \frac{10^2 - 0,2}{9} \cdot 0,16^4 = 0,0073 \quad (55)$$

kde g je celkový počet vodičů v drážce nad sebou: $g = i \cdot n_d = 1 \cdot 10 = 10$

Odpor při působení střídavého proudu při teplotě 20°C:

$$R_{1/20} = (1 + k_{Cu}) \cdot R'_{1/20} = (1 + 0,0073) \cdot 0,0276 = 0,0278 \Omega \quad (56)$$

Odpor při působení střídavého proudu při teplotě 75°C:

$$R_{1/75} = 1,22 \cdot R_{1/20} = 1,22 \cdot 0,0278 = 0,0339 \Omega \quad (57)$$

Procentní hodnota úbytku napětí na odporu:

$$u_R = \frac{R_{1/75} \cdot I_1}{U_f} \cdot 100 = \frac{0,0339 \cdot 173,21}{230,94} \cdot 100 = 2,54 \% \quad (58)$$

Procentní hodnota úbytku napětí na odporu se u malých strojů na rozdíl od velkých strojů (zlomky procent) pohybuje okolo 1-3%.

3.4.3 Rozptylová reaktance statorového vynutí

Velikost rozptylové reaktance je závislá jak na vodivosti čel vinutí a vodivosti mezi sousedními zuby (přes vzduchovou mezeru), tak také na magnetické vodivosti drážky induktu. Hodnota h'_1 je vzdálenost horního okraje krajního vodiče od kraje drážky a hodnota h'_2 je vzdálenost krajních vláken vodičů v drážce.

$$x_\sigma = \frac{(4\pi)^2 \cdot f \cdot N_s^2}{p \cdot q} \cdot l_e \cdot \left[\left(\frac{h'_2}{3 \cdot b_d} + \frac{h'_1}{b_d} \right) + \frac{l_\zeta}{l_e} \cdot q \cdot \left(0,187 + 0,166 \cdot \frac{t_p}{l_\zeta} \cdot \beta \right) + \ln \left(1 + \frac{\pi \cdot z_1}{2 \cdot b_d} \right) \right] \cdot 10^{-7} \quad (59)$$

$$= \frac{(4\pi)^2 \cdot 50 \cdot 45^2}{2 \cdot \frac{9}{2}} \cdot 0,16$$

$$\cdot \left[\left(\frac{36,7}{3 \cdot 14,5} + \frac{7,45}{14,5} \right) + \frac{0,48}{0,16} \cdot \frac{9}{2} \left(0,187 + 0,166 \cdot \frac{0,36}{0,48} \cdot 0,82 \right) + \ln \left(1 + \frac{\pi \cdot 12,26}{2 \cdot 14,5} \right) \right] \cdot 10^{-7} = 0,17 \Omega$$

kde $h'_1 = h_0 + h_1 + \text{izolace Fe} + \text{vložka na dno} = 1 + 5 + 0,45 + 1 = 7,45 \text{ mm}$
 $h'_2 = h_2 - \text{vůle na hloubku} - \text{vložka na dno} - 2 \cdot \text{izolace Fe}$
 $= 40 - 1,4 - 1 - 2 \cdot 0,45 = 36,7 \text{ mm}$

Procentní úbytek napětí na rozptylové reaktanci:

$$u_\sigma = \frac{x_\sigma \cdot I_1}{U_f} \cdot 100 = \frac{0,17 \cdot 173,21}{230,94} \cdot 100 = 12,75 \% \quad (60)$$

Procentní hodnota rozptylové reaktance:

$$x_\sigma = u_\sigma = 12,75 \% \quad (61)$$

3.5 Návrh magnetického obvodu

3.5.1 Určení magnetického toku Φ

Nyní musím určit velikost magnetického toku. Pro jeho určení vycházím z rovnice pro indukované napětí. Tento výsledný magnetický tok následně porovnám s výpočtem indukovaného napětí pomocí rozměrů stroje a velikosti magnetické indukce ve vzduchové mezeře. Porovnáním těchto hodnot zjistím správnost návrhu jak po elektrické, tak i po rozměrové stránce.

Magnetický tok:

$$\Phi = \frac{U_f}{4,44 \cdot f \cdot N_s \cdot k_{v1}} = \frac{230,94}{4,44 \cdot 50 \cdot 45 \cdot 0,92} = 0,025 \text{ Vs} \quad (62)$$

Kontrola magnetického toku skrze rozměry stroje:

$$\Phi = \frac{2 \cdot t_p \cdot l_e \cdot B_\delta}{\pi} = \frac{2 \cdot 0,36 \cdot 0,16 \cdot 0,7}{\pi} = 0,025 \text{ Vs} \quad (63)$$

Jak je z porovnání vidět, výsledné hodnoty se velmi dobře shodují, a proto pro další výpočty volím hodnotu:

$$\Phi = 0,025 \text{ Vs}$$

Velikost vzduchové mezery

Na rozdíl od strojů s hladkým rotorem, kde je vzduchová mezera konstantní, je vzduchová mezera u strojů s vyniklými póly proměnlivá. Podmínkou při návrhu vzduchové mezery je tudíž nutné zajistit, aby magnetická indukce ve vzduchové mezeře měla sinusový charakter. Při nedodržení této podmínky by se do statorového vinutí neindukovalo harmonické střídavé napětí a stroj by nefungoval tak, jak se od něho očekává. [5]

Velikost vzduchové mezery:

$$\delta = \frac{k \cdot A \cdot t_p}{B_\delta} \cdot \frac{10^{-6}}{x_d - x_\sigma} = \frac{47 \cdot 32360 \cdot 0,36}{0,7} \cdot \frac{10^{-6}}{170 - 12,75} = 0,005 \text{ m} \quad (64)$$

kte k ...je konstanta, která závisí na velikost Cartérova činitele, tvaru pólového nástavce a dalších parametrech. Volba je doporučena v rozmezí $k = 43 \div 50$.

Volím $k = 47$

x_d ...je procentní hodnota nesyčené synchronní reaktance, která se volí dle Tab.

3 v závislosti na počtu pólů stroje:

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. 3: Tabulka pro odečet nesyčené synchronní reaktance [5]

Z výpočtu volím hodnotu vzduchové mezery:

$$\delta = 0,005 \text{ m}$$

Za účelem splnění podmínky sinusového průběhu magnetické indukce ve vzduchové mezeře volím po obvodu proměnnou velikost mezery. Vzduchová mezera by měla být na okrajích pólových nástavců přibližně $1,5 \div 2$ krát větší než v ose pólu.

Proto volím hodnotu $\frac{\delta_{max}}{\delta} = 1,5$.

Magnetické napětí reakce kotvy

Činitel základní harmonické magnetické indukce ve vzduchové mezeře:

$$C_1 = a \cdot b = 1,19 \cdot 0,85 = 1,01 \quad (65)$$

kde hodnoty a a b jsou odečteny z grafu (viz příloha [7])

Deformační činitel magnetického napětí v podélné ose:

$$C_{d1} = e \cdot f = 0,8 \cdot 1,08 = 0,86 \quad (66)$$

kde hodnoty e a f jsou odečteny z grafu (viz příloha [8])

Deformační činitel magnetického napětí v příčné ose:

$$C_{q1} = g \cdot h = 1,6 \cdot 0,23 = 0,37 \quad (67)$$

kde hodnoty g a h jsou odečteny z grafu (viz příloha [8])

Poměr vzduchových mezer:

$$\frac{\delta_{max}}{\delta} = 1,5 \quad (68)$$

Poměr vzduchové mezery a mezipólové rozteče:

$$\frac{\delta}{t_p} = \frac{5}{360} = 0,0139 \quad (69)$$

Amplituda základní harmonické reakce kotvy:

$$F'_a = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{1}{C_1} \cdot A \cdot t_p \cdot k_{v1} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{1}{1,01} \cdot 32360 \cdot 0,36 \cdot 0,92 = 4774 \text{ A} \quad (70)$$

Amplituda základní harmonické magnetického napětí v podélném směru:

$$F_{d1} = C_{d1} \cdot F'_a = 0,86 \cdot 4774 = 4125 \text{ A} \quad (71)$$

Amplituda základní harmonické magnetického napětí v příčném směru:

$$F_{q1} = C_{q1} \cdot F'_a = 0,37 \cdot 4774 = 1757 \text{ A} \quad (72)$$

Dimenzování magnetického obvodu

Výška pólu:

$$h_p = 0,3 \cdot t_p = 0,3 \cdot 0,36 = 0,11 \text{ m} \quad (73)$$

Výška pólového nástavce:

$$h_n = 0,1 \cdot t_p = 0,1 \cdot 0,36 = 0,04 \text{ m} \quad (74)$$

Šířka pólu:

$$b_p = \frac{(1 + v) \cdot \Phi}{B_p \cdot L_p} = \frac{(1 + 0,15) \cdot 0,025}{1,40 \cdot 0,19} = 0,11 \text{ m} \quad (75)$$

kde L_p odpovídá celkové délce induktu včetně radiálních ventilačních kanálů,

tedy $L_p = L = 0,19 \text{ m}$

volím $B_p = 1,40 \text{ T}$, hodnota magnetické indukce v pólu

volím $v = 0,15$, poměrná hodnota mezipólového rozptylového toku

Šířka pólového nástavce:

$$b_n = \alpha \cdot t_p = 0,65 \cdot 0,36 = 0,23 \text{ m} \quad (76)$$

Šířka mezery budící cívky:

$$a = \frac{b_n - b_p}{2} = \frac{0,23 - 0,11}{2} = 0,06 \text{ m} \quad (77)$$

Délka rotoru:

$$L_{jr} = L + \frac{a}{2} = 0,19 + \frac{0,06}{2} = 0,22 \text{ m} \quad (78)$$

Výška jha rotoru:

$$h_{jr} = \frac{(1 + v) \cdot \Phi}{2 \cdot B_{jr} \cdot L_{jr}} = \frac{(1 + 0,15) \cdot 0,025}{2 \cdot 1,1 \cdot 0,22} = 0,06 \text{ mm} \quad (79)$$

kde B_{jr} je hodnota magnetické indukce jha rotoru, volba hodnoty je v rozmezí $0,9 \div 1,2 \text{ T}$, pro další výpočty volím $B_{jr} = 1 \text{ T}$, viz doporučená literatura [5]

Výška jádra induktu:

$$h_{js} = \frac{\Phi}{2 \cdot B_{js} \cdot k_{Fe} \cdot l_e} = \frac{0,025}{2 \cdot 1,3 \cdot 0,92 \cdot 0,16} = 0,07 \text{ m} \quad (80)$$

kde B_{js} je hodnota magnetické indukce jha statoru, volba hodnoty v rozmezí $1,2 \div 1,4 \text{ T}$, pro další výpočty volím $B_{js} = 1,3 \text{ T}$, viz doporučená literatura [5]
 k_{Fe} je činitel plnění železa, který jsem zvolil dle doporučené literatury [5]

Délka středních siločar částí magnetického obvodu

Jádro induktu:

$$l_s = \frac{\pi \cdot [D_1 + 2 \cdot (h_d + h_{js})]}{4 \cdot p} = \frac{\pi \cdot [0,46 + 2 \cdot (0,046 + 0,07)]}{4 \cdot 2} = 0,27 \text{ m} \quad (81)$$

Jho rotoru:

$$\begin{aligned} l_r &= \frac{\pi \cdot [D_1 - 2 \cdot (\delta + h_p + h_n)]}{4 \cdot p} = \\ &= \frac{\pi \cdot [0,46 - 2 \cdot (0,005 + 0,11 + 0,04)]}{4 \cdot 2} = 0,06 \text{ m} \end{aligned} \quad (82)$$

Pól:

$$l_p = h_p + h_n = 0,11 + 0,04 = 0,15 \text{ m} \quad (83)$$

Charakteristika naprázdno

Cartérovův činitel respektující vliv drážkování induktu:

$$\frac{b_0}{z_1} = \frac{14,5}{12,26} = 1,18 \quad (84)$$

$$\frac{b_0}{\delta} = \frac{14,5}{5} = 2,9 \quad (85)$$

kde b_0 je rovna hodnotě $b_d = 14,5 \text{ mm}$ (platí pro otevřenou drážku)

Hodnotu Cartérova činitele respektující vliv drážkování induktu lze snadno zjistit pomocí výše vypočtených poměrů hodnot a pomocí grafu pro odečtení hodnoty Cartérova činitele (viz příloha [8]).

Volím hodnotu: $k_{cd} = 1,25$

Cartérův činitel respektující vliv radiálních ventilačních vložek:

$$k_{ck} = \frac{1}{1 + \frac{\delta}{2 + \delta} \cdot \frac{\check{s}_k \cdot i}{l_e}} = \frac{1}{1 + \frac{5}{2 + 5} \cdot \frac{10 \cdot 4}{160}} = 0,85 \quad (86)$$

Výsledný Cartérův činitel:

$$k_c = k_{cd} \cdot k_{ck} = 1,25 \cdot 0,85 = 1,06 \quad (87)$$

Magnetické napětí ve vzduchové mezeře:

$$F_\delta = 0,8 \cdot k_c \cdot \delta \cdot B_\delta \cdot 10^6 = 0,8 \cdot 1,06 \cdot 0,005 \cdot 0,7 \cdot 10^6 = 2957 \text{ A} \quad (88)$$

3.5.2 Magnetizační charakteristika

$D_1 = 460 \text{ mm}$	$t_{d1} = 26,76 \text{ mm}$	$z_1 = 12,26 \text{ mm}$	$k_{z1} = 1,37$
$D_2 = D_1 + h_d = 528 \text{ mm}$	$t_{d2} = 30,72 \text{ mm}$	$z_2 = 16,22 \text{ mm}$	$k_{z2} = 1,06$
$D_3 = D_1 + 2 \cdot h_d = 596 \text{ mm}$	$t_{d3} = 34,67 \text{ mm}$	$z_3 = 20,17 \text{ mm}$	$k_{z3} = 0,87$

Tab. 4: Základní hodnoty magnetizační charakteristiky zubové vrstvy

Φ	$B'_{z1} = 1,66 \text{ T}$	$B_{z1} = 1,65 \text{ T}$	$H_{z1} = 4,4 \text{ kA/m}$	$H_{zstr} = 1,7$ [kA/m]	$F_z = 78 \text{ A}$
	$B'_{z2} = 1,44 \text{ T}$	$B_{z2} = 1,47 \text{ T}$	$H_{z2} = 1,3 \text{ kA/m}$		
	$B'_{z3} = 1,31 \text{ T}$	$B_{z3} = 1,32 \text{ T}$	$H_{z3} = 0,68 \text{ kA/m}$		
$1,15 \cdot \Phi$	$B'_{z1} = 1,91 \text{ T}$	$B_{z1} = 1,87 \text{ T}$	$H_{z1} = 15,5 \text{ kA/m}$	$H_{zstr} = 7,2$ [kA/m]	$F_z = 331 \text{ A}$
	$B'_{z2} = 1,66 \text{ T}$	$B_{z2} = 1,7 \text{ T}$	$H_{z2} = 6,2 \text{ kA/m}$		
	$B'_{z3} = 1,50 \text{ T}$	$B_{z3} = 1,58 \text{ T}$	$H_{z3} = 2,8 \text{ kA/m}$		
$1,3 \cdot \Phi$	$B'_{z1} = 2,16 \text{ T}$	$B_{z1} = 2,04 \text{ T}$	$H_{z1} = 34 \text{ kA/m}$	$H_{zstr} = 19,3$ [kA/m]	$F_z = 888 \text{ A}$
	$B'_{z2} = 1,87 \text{ T}$	$B_{z2} = 1,90 \text{ T}$	$H_{z2} = 18 \text{ kA/m}$		
	$B'_{z3} = 1,70 \text{ T}$	$B_{z3} = 1,77 \text{ T}$	$H_{z3} = 9,5 \text{ kA/m}$		

Tab. 5: Hodnoty pro sestavení charakteristiky naprázdno

Použité vzorce pro výpočty hodnot v Tab. 4 a Tab. 5, kde i nabývá hodnot 1, 2, 3:

$$t_{di} = \frac{\pi \cdot D_i}{Q} \quad (89)$$

$$z_i = t_{di} - b_d \quad (90)$$

$$k_{zi} = \frac{t_{di}}{z_i \cdot k_{Fe}} - 1 \quad (91)$$

$$B'_{zi} = \frac{B_\delta \cdot t_{d1}}{z_i \cdot k_{Fe}} \quad (92)$$

$$H_{zstr} = \frac{H_{z1} + 4 \cdot H_{z2} + H_{z3}}{6} \quad (93)$$

$$F_z = H_{zstr} \cdot h_d \quad (94)$$

Hodnoty pro sestavení magnetizační charakteristiky celého magnetického obvodu			Φ			$1,15 \cdot \Phi$			$1,3 \cdot \Phi$			
			B [T]	H [kA/m]	F [A]	B [T]	H [kA/m]	F [A]	B [T]	H [kA/m]	F [A]	
Vzduchová mezera		$\delta = 0,005 \text{ m}$	0,7		2957			3401			3844	
Zuby	Hlava	$k_{z1} = 1,37$	B_{z1}' 1,66	4,4		B_{z1} 1,65	15,5		B_{z1} 2,16	34		
	Střed	$k_{z2} = 1,06$	B_{z2}' 1,44	1,3		B_{z2} 1,47	6,2		B_{z2} 1,87	18		
	Pata	$k_{z3} = 0,87$	B_{z3}' 1,31	0,68		B_{z3} 1,32	2,8		B_{z3} 1,7	9,5		
	Stř. hodnota		$h_d = 0,068 \text{ m}$		1,7	78		7,2	331		19,25	888
	Jádro induktu		$l_s = 0,27 \text{ m}$	1,3	0,63	170	1,5	1,6	432	1,69	6	1620
Pól		$l_p = 0,15 \text{ m}$	1,45	2,2	330	1,68	6,6	990	1,89	20,3	3045	
Jho		$l_r = 0,06 \text{ m}$	1	0,6	36	1,27	0,95	57	1,43	1,8	108	
$\Sigma F = F_\delta + F_z + F_{ji} + F_p + F_j$			3571			5211			9505			

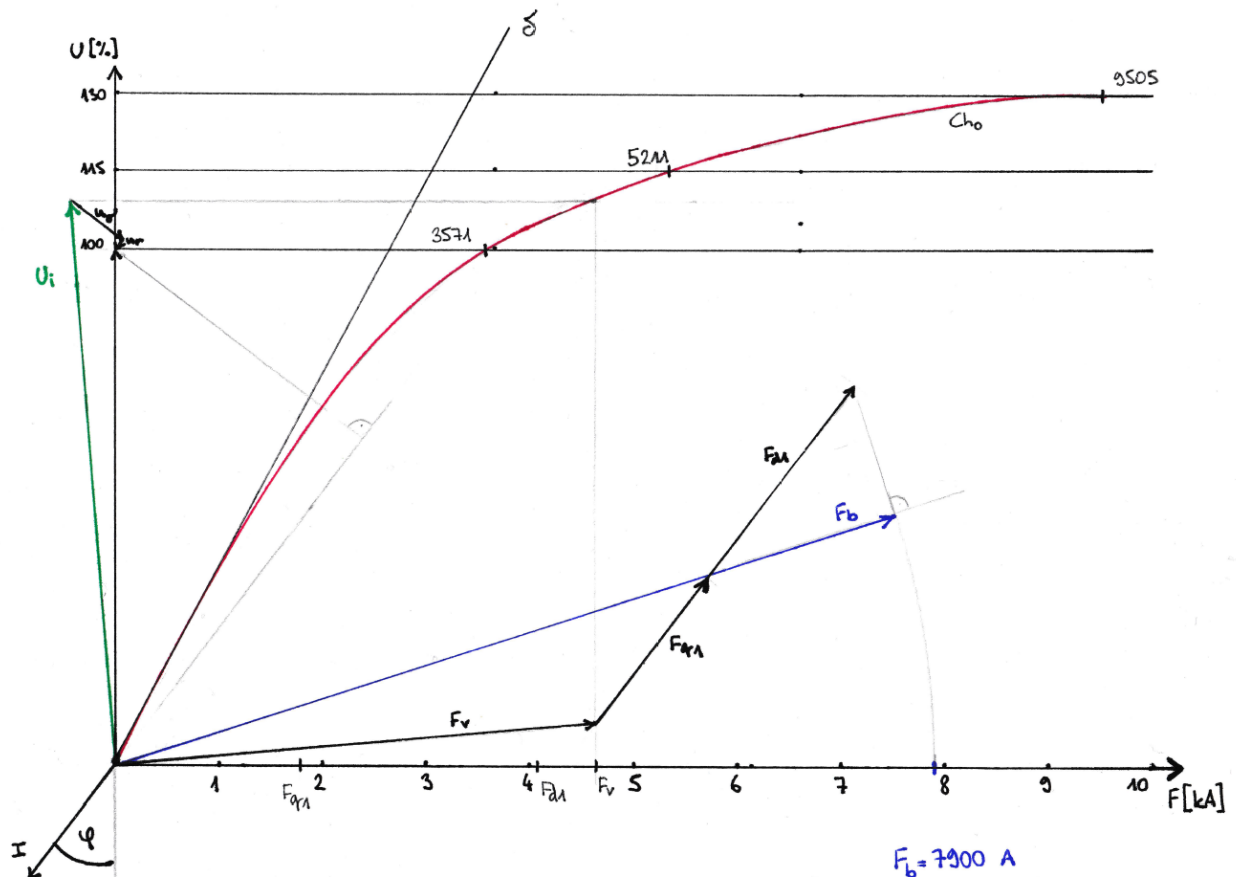
Tab. 6: Hodnoty pro sestavení magnetizační charakteristiky mg. obvodu

Použité vzorce pro výpočty hodnot v Tab. 6:

$$F_{j\acute{a}dro} = l_s \cdot H_{j\acute{a}dro} = 0,29 \cdot 0,63 \cdot 10^3 = 170 \text{ A} \quad (95)$$

$$F_{p\acute{o}l} = l_p \cdot H_{p\acute{o}l} = 0,15 \cdot 2,2 \cdot 10^3 = 330 \text{ A} \quad (96)$$

$$F_{jho} = l_r \cdot H_{jho} = 0,06 \cdot 0,6 \cdot 10^6 = 36 \text{ A} \quad (97)$$

Obrázek 2: Charakteristika naprázdno: $F_b = 7900 \text{ A}$

Na obrázku 2 je znázorněna charakteristika naprázdno spolu s grafickým výpočtem magnetického budícího napětí F_b . Z důvodu přehlednosti bylo nutné fázorový diagram magnetických napětí otočit doprava o 90° . Díky tomu jsou hodnoty na svislé ose v procentech. Charakteristiku jsem sestavil za pomoci výše pospaných výpočtů, a také pomocí nomogramu k určení skutečné indukce v zubech statoru (příloha 11) a magnetizačních křivek konstrukční oceli (příloha 9) a dynamového plechu (příloha 10). Výsledná hodnota magnetického budícího napětí z grafického výpočtu vyšla $F_b = 7900 \text{ A}$ a z této hodnoty budu dále vycházet při návrhu budícího vinutí.

3.5.3 Návrh budicího vinutí

Předběžná hodnota střední délky závitu budicí cívky:

$$l_{bs} = 2 \cdot (L_p + b_p + 2 \cdot a) = 2 \cdot (0,19 + 0,11 + 2 \cdot 0,06) = 0,84 \text{ m} \quad (98)$$

Předběžný průřez vodiče budicí cívky:

$$S'_{Cub} = \frac{\rho_{Cu} \cdot l_{bs} \cdot 2p \cdot F_b}{0,9 \cdot U_b} = \frac{1}{56} \cdot 0,84 \cdot 4 \cdot 7900}{0,9 \cdot 125} = 4,23 \text{ mm}^2 \quad (99)$$

kde F_b je hodnota budicího magnetického napětí určeného pomocí charakteristiky naprázdno

U_b je zvolená hodnota budicího napětí, volím $U_b = 125 \text{ V}$

V předchozím výpočtu (99) jsem zvolil hodnotu budicího napětí $U_b = 125 \text{ V}$, díky tomu jsem v budicím vinutí mohl použít vodiče kruhového průřezu namísto vodičů z měděných pásků, které se používají až nad průřez přibližně 20 mm^2 .

Průměr vodiče budicí cívky:

$$d_v = 2,36 \text{ mm}$$

Zvolená tloušťka izolace mezi závity (viz doporučená literatura [1]):

$$t_i = 0,08 \text{ mm}$$

Průměr izolovaného vodiče budicí cívky:

$$d_{vi} = 2,44 \text{ mm}$$

Skutečný průřez vodiče budicí cívky

$$S_{Cub} = 4,374 \text{ mm}^2$$

Pro určení dalších rozměrů volím předběžnou hodnotu proudové hustoty ve vodiči:

$$\sigma_{Cub} = 2 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$$

Budicí proud:

$$I_b = \sigma_{Cub} \cdot S_{Cub} = 2 \cdot 4,374 = 8,75 \text{ A} \quad (100)$$

Počet závitů budící cívky:

$$N_b = \frac{F_b}{I_b} = \frac{7900}{8,75} = 902,85 \approx 903 \quad (101)$$

Zvolená tloušťka kostřičky cívky (viz doporučená literatura [5]):

$$t_k = 5 \text{ mm} \quad (102)$$

Šířka budící cívky - předběžná:

$$a_n = \frac{b_n - b_p}{2} - t_k = \frac{0,23 - 0,11}{2} - 5 = 0,055 \text{ mm} \rightarrow 55 \text{ mm} \quad (103)$$

Počet poloh budící cívky:

$$n_p = \frac{a_n}{d_{vi}} = \frac{55}{2,44} = 22,54 \approx 23 \quad (104)$$

Šířka budící cívky:

$$b_c = d_{vi} \cdot n_p = 2,44 \cdot 23 = 56,12 \text{ mm} \quad (105)$$

Počet závitů v jedné poloze:

$$N'_{p1} = \frac{N_b}{n_p} = \frac{903}{23} = 39,26 \approx 39 \quad (106)$$

Výška cívky:

$$h_c = N'_{p1} \cdot d_{vi} = 39 \cdot 2,44 = 95,16 \text{ mm} \quad (107)$$

Výška těla pólu:

$$h_p = h_c + 2 \cdot t_k = 95,16 + 2 \cdot 5 = 105,16 \text{ mm} \quad (108)$$

Jak je vidět, skutečná výška těla pólu vyšla nepatrně nižší, než byla předpokládána výška pólu ($h_p = 110 \text{ mm}$) vypočítaná pomocí mezipólové rozteče dle vztahu (73). To bude mít za následek zmenšení magnetického napětí na pól, které v prvním návrhu zanedbáváme. Tuto skutečnost beru jako malou rezervu v buzení stroje. Zároveň zde bylo nutné použít budící cívku vícepolohovou a tu provést odstupňovanou. Důvod je takový, že budící cívka se nevešla do mezipólového prostoru a protínala tak jeho osu. Na konci této práce (viz příloha [16]) je vyobrazen vyniklý pól synchronního stroje s odstupňovanou budící cívkou.

Orientační výpočet oteplení budící cívky

Vnější obvod budící cívky:

$$l_{be} = 2 \cdot (L_p + b_p + 4 \cdot a) = 2 \cdot (0,19 + 0,11 + 4 \cdot 0,055) = 1,04 \text{ m} \quad (109)$$

Střední obvod budící cívky:

$$\begin{aligned} l_{bs} &= 2 \cdot \left[L_p + b_p + 4 \cdot \left(t_{kc} + \frac{b_c}{2} \right) \right] = \\ &= 2 \cdot \left[0,19 + 0,11 + 4 \cdot \left(0,005 + \frac{0,056}{2} \right) \right] = 0,86 \text{ m} \end{aligned} \quad (110)$$

Ochlazovací povrch všech cívek:

$$O_{2pc} = h_c \cdot l_{be} \cdot 2p = 0,095 \cdot 1,04 \cdot 4 = 0,4 \text{ m}^2 \quad (111)$$

Odpor všech cívek budícího vinutí:

$$R_{b/75} = 1,22 \cdot \rho \cdot \frac{l_{bs} \cdot N_b \cdot 2p}{S_{Cub}} = 1,22 \cdot \frac{1}{56} \cdot \frac{0,86 \cdot 903 \cdot 4}{4,374} = 15,47 \ \Omega \quad (112)$$

Ztráty v budícím vinutí:

$$\Delta P_{Cub} = R_{b/75} \cdot I_b^2 = 15,47 \cdot 8,75^2 = 1184 \text{ W} \quad (113)$$

Rychlost proudícího vzduchu kolem cívky:

$$v = \frac{1}{3} \cdot \frac{\pi \cdot D_1 \cdot n}{60} = \frac{1}{3} \cdot \frac{\pi \cdot 0,46 \cdot 1500}{60} = 12,04 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (114)$$

Součinitel přestupu tepla (viz příloha [12]):

$$\alpha = 60 \text{ W} \cdot \text{°C}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$$

Oteplení cívky:

$$\Delta \vartheta_{Cub} = \frac{1,18 \cdot \Delta P_{Cub}}{\alpha \cdot O_{2pc}} = \frac{1,18 \cdot 1184}{60 \cdot 0,4} = 58,22 \text{ °C} \quad (115)$$

Jak je vidět, oteplení cívky velmi dobře odpovídá použité izolaci třídy „B“, pro kterou je maximální velikost oteplení 80°C.

Kroužky a kartáče

Pro kartáče volím materiál elektrografit s označením EK24, jehož vlastnosti jsou:

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

Celkový průřez kartáčů jedné polaroty:

$$S_k = \frac{I_b}{\sigma_k} = \frac{8,75}{10} = 0,875 cm^2 \quad (116)$$

Zvolené rozměry kartáče:

$$\begin{aligned} b_k &= 1 cm \\ l_k &= 0,8 cm \end{aligned}$$

kde b_k je šířka kroužku v axiálním směru
 l_k je rozměr v obvodovém (radiálním) směru

Průřez kartáče:

$$S_{k1} = b_k \cdot l_k = 1 \cdot 0,8 = 0,8 cm^2 \quad (117)$$

Počet kartáčů jedné polaroty na obvodu kroužku:

$$i_k = \frac{S_k}{S_{k1}} = \frac{0,875}{0,8} = 1,09 \approx 1 \quad (118)$$

Počet kartáčů obou polarit:

$$2i_k = 2 \cdot i_k = 2 \cdot 1 = 2 \quad (119)$$

Průměr volného konce hřídele (přívod mechanické energie):

$$d_h = 0,135 \cdot \sqrt[3]{\frac{P}{n}} = 0,135 \cdot \sqrt[3]{\frac{96}{1500}} = 0,054 m \rightarrow 54 mm \quad (120)$$

kde P je činný výkon stroje dosazený v jednotkách kW

Vnější průměr kroužků:

$$D_k = 1,3 \cdot d_h = 1,3 \cdot 0,054 = 0,07 \text{ m} \quad (121)$$

Obvodová rychlost kroužků:

$$v_k = \frac{\pi \cdot D_k \cdot n_{max}}{60} = \frac{\pi \cdot 0,07 \cdot 1800}{60} = 6,6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (122)$$

kde n_{max} je hodnota, kterou volím dle doporučené literatury [4]

Rozteč kartáčů:

$$t_k = \frac{\pi \cdot D_k}{i_k} = \frac{\pi \cdot 0,07}{1} = 0,22 \text{ m} \rightarrow 220 \text{ mm} \quad (123)$$

Z výše uvedených hodnot je vidět, že obvodová rychlost kroužků je mnohem menší než dovolená maximální obvodová rychlost a zároveň rozteč kartáčů je přibližně tři krát větší než délka samotného kartáče. Díky tomu mohu konstatovat, že návrh kartáčů a kroužků je přijatelný.

3.5.4 Ztráty a účinnost

Jouleovy ztráty

Ztráty ve vinutí statoru:

$$\Delta P_{Cu1} = m \cdot R_{1/75} \cdot I^2 = 3 \cdot 0,0339 \cdot 173,21^2 = 2694 \text{ W} \quad (124)$$

Ztráty v budícím vinutí:

$$\Delta P_{Cub} = R_{b/75} \cdot I_b^2 = 15,65 \cdot 8,75^2 = 1184 \text{ W} \quad (125)$$

Ztráty v železe

Ztrátové číslo plechů volím dle doporučené literatury [5]:

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

Vnější průměr statoru:

$$D_e = D_1 + 2 \cdot (h_d + h_{js}) = 0,46 + 2 \cdot (0,046 + 0,07) = 0,692 \text{ m} \quad (126)$$

Vzdálenost protilehlých drážek:

$$D_3 = D_1 + 2 \cdot h_d = 0,46 + 2 \cdot 0,046 = 0,552 \text{ m} \quad (127)$$

Hmotnost jádra statoru:

$$\begin{aligned} m_{Fej} &= \frac{\pi}{4} \cdot (D_e^2 - D_3^2) \cdot l_e \cdot k_{Fe} \cdot \rho_{Fe} = \\ &= \frac{\pi}{4} \cdot (0,692^2 - 0,552^2) \cdot 0,16 \cdot 0,92 \cdot 7900 = 159 \text{ kg} \end{aligned} \quad (128)$$

Hmotnost zubů statoru:

$$\begin{aligned} m_{Fez} &= Q \cdot z_2 \cdot h_d \cdot l_e \cdot k_{Fe} \cdot \rho_{Fe} = \\ &= 54 \cdot 0,016 \cdot 0,046 \cdot 0,16 \cdot 0,92 \cdot 7900 = 46,22 \text{ kg} \end{aligned} \quad (129)$$

Ztráty v jádře statoru:

$$\begin{aligned} \Delta P_{Fej} &= 1,8 \cdot \Delta p_{Fe} \cdot B_{js}^2 \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} \cdot m_{Fej} = \\ &= 1,8 \cdot 1,8 \cdot 1,3^2 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1,3} \cdot 159 = 871 \text{ W} \end{aligned} \quad (130)$$

Ztráty v zubech statoru:

$$\begin{aligned} \Delta P_{Fez} &= 2 \cdot \Delta p_{Fe} \cdot B_{z2}^2 \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} \cdot m_{Fez} = 2 \cdot 1,8 \cdot 1,47^2 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1,3} \cdot 46,22 \\ &= 360 \text{ W} \end{aligned} \quad (131)$$

Povrchové ztráty

Povrchové ztráty stroje lze zjistit za pomoci vztahu, kde mimo jiných hodnot je i potřeba znát dva důležité činitele. První z nich je činitel k_0 , jehož velikost závisí na konstrukčním provedení pólů stroje, které mohou být vyrobeny ze složených plechů nebo jsou jejich pólové nástavce vyrobeny z masivního výkovku. V mém případě počítám s první variantou, tedy složené plechy o tloušťce 0,5 mm. [5]

Druhým z činitelů je činitel povrchových ztrát β , jehož velikost volím pomocí poměru hodnot šířky drážky b_0 ku vzduchové mezeře δ dle přílohy [13]:

$$k_0 = 2,8$$

$$\beta = 0,021$$

Povrchové ztráty:

$$\begin{aligned}\Delta P_p &= \frac{\pi}{2} \cdot D_1 \cdot \alpha \cdot L_p \cdot k_0 \cdot \left(\frac{Q \cdot n}{10000}\right)^{1,5} \cdot (t_{d1} \cdot \beta \cdot 1000 \cdot B_\delta \cdot k_c)^2 = \\ &= \frac{\pi}{2} \cdot 0,46 \cdot 0,65 \cdot 0,19 \cdot 2,8 \cdot \left(\frac{54 \cdot 1500}{10000}\right)^{1,5} \cdot (26,76 \cdot 10^{-3} \cdot 0,021 \cdot 1000 \cdot 0,7 \cdot 1,06)^2 = \\ &= 100,2 \text{ W}\end{aligned}\quad (132)$$

Mechanické ztráty

Obvodová rychlost rotoru:

$$v = \frac{\pi \cdot D_1 \cdot n}{60} = \frac{\pi \cdot 0,46 \cdot 1500}{60} = 36,12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (133)$$

Mechanické ztráty:

$$\Delta P_m = v^{2,5} \cdot D_1 \cdot \sqrt{l_e} = 36,12^{2,5} \cdot 0,46 \cdot \sqrt{0,16} = 1443 \text{ W} \quad (134)$$

Přídavné ztráty

Přídavné ztráty:

$$\Delta P_{přid} = 0,003 \cdot S = 0,003 \cdot 120 \cdot 10^3 = 360 \text{ W} \quad (135)$$

Celkové ztráty

$$\begin{aligned}\Delta P &= \Delta P_{Cu1} + \Delta P_{Cub} + \Delta P_{Fej} + \Delta P_{Fez} + \Delta P_p + \Delta P_m + \Delta P_{přid} = \\ &= 2694 + 1184 + 871 + 360 + 100,2 + 1443 + 360 = \\ &= 7012 \text{ W}\end{aligned}\quad (136)$$

Účinnost

$$\eta = 100 \cdot \left(\frac{P}{P + \Delta P}\right) = 100 \cdot \left(\frac{96 \cdot 10^3}{96 \cdot 10^3 + 7012}\right) = 93,2 \% \quad (137)$$

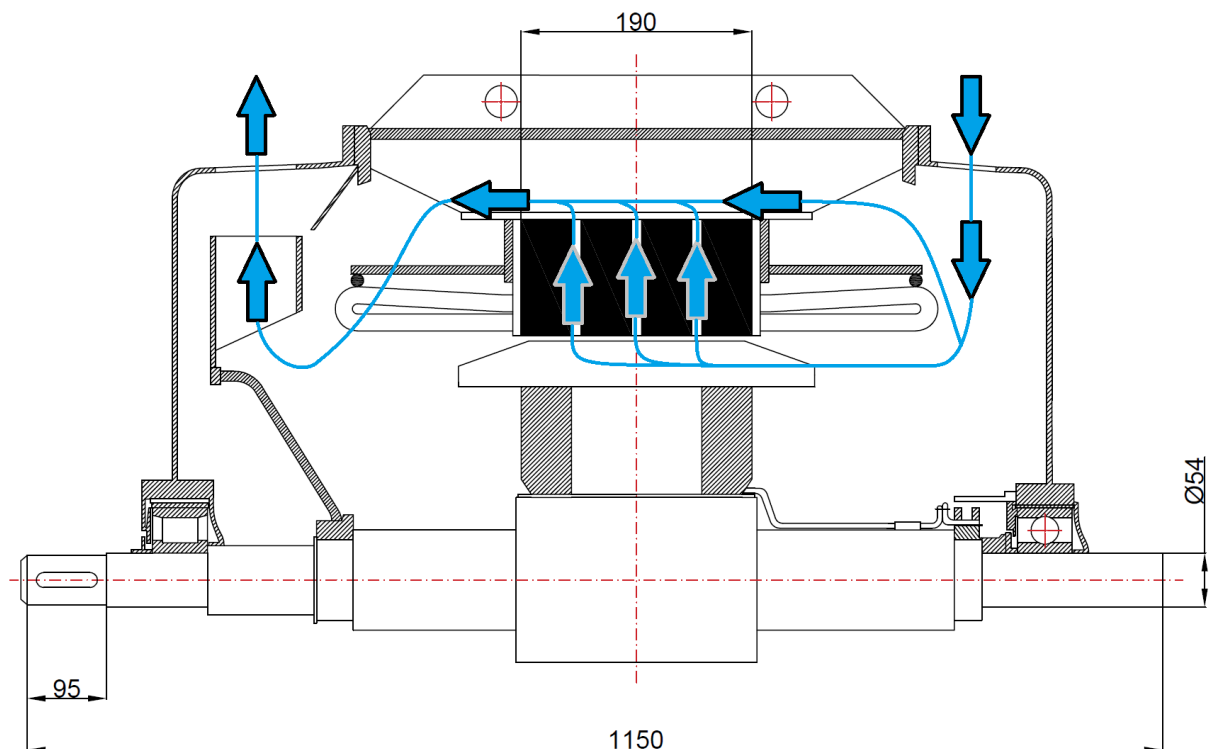
3.6 Konstrukční uspořádání stroje

Pomocí výpočtů v této práci jsem byl schopen vypracovat technické výkresy příčného a podélného řezu mnou navrhnutého synchronního stroje. Tyto výkresy jsem vypracoval v programu AutoCAD 2017 a jsou vloženy v přílohové části na konci mé bakalářské práce (příloha 14 a 15).

3.7 Ventilační systém stroje

Chladicí systém stroje je jeho nedílnou součástí. Je proto nutné vybrat vhodný ventilační systém vzhledem k jeho parametrům.

U mnou navrhnutého stroje navrhuji zamontovaný ventilační systém. Jako chladicí médium je zde použit vzduch, který bude do stroje nasáván pomocí ventilátoru. Charakter vestavěného ventilátoru bude tzv. sací, kde vzduch bude nasáván přes sací otvor, dále bude proudit strojem a ochlazovat jeho aktivní části a následně bude teplý vzduch vyváděn ze stroje ven skrze ventilátor. Tato ventilace má výhodu oproti tlačné v tom, že do stroje vchází chladný vzduch, který není nijak ohříván průchodem přes ventilátor a nesnižuje tak účinnost ventilace. U tlačné ventilace je vzduch do stroje nasáván rovnou přes ventilátor a ten se díky vlastním ztrátám ve ventilátoru rovnou ohřívá (okolo 3 až 7 °C) a účinnost chlazení tak klesá. Dále volím ventilaci radiální, kde proud chladicího vzduchu proudí radiálně vzhledem k ose otáčení skrze radiální ventilační kanálky ($\check{s}_k = 10 \text{ mm}$), které byly vytvořeny během návrhu mezi jednotlivými pakety statorového svazku. Schéma mnou navrhnuté nezávislé radiální sací ventilace se nachází na obrázku 3.



Obrázek 3: Schéma nezávislé radiální sací ventilace

Závěr

Ve své výše vypracované bakalářské práci se zabývám elektromagnetickým návrhem synchronního generátoru s vyniklými póly. Generátor je navržen dle předem stanovených parametrů. Návrh je rozdělen do několika základních částí. V první části se zabývám základními rozměry stroje, které jsou pro další postup výpočtů stěžejní. V další části jsem se věnoval návrhu vinutí induktu (statoru), kde jsem navrhoval parametry vinutí, návrh drážky, kterou jsem zvolil otevřenou obdélníkovou tvaru M a úbytkům napětí na odporu a rozptylové reaktanci statorového vinutí.

Ve třetí části práce jsem se zaměřil na návrh magnetického obvodu, jehož účelem bylo určení rozměrů a sestrojení charakteristiky naprázdno, ze které jsem následně graficky určil hodnotu magnetického budícího napětí. Tato hodnota byla důležitá pro další část mé práce, a to návrhu budícího vinutí. Při návrhu jsem volil cívku vícepolohovou, která zajistila menší průřez vodiče. Z důvodu malého průřezu jsem namísto měděných pásků zvolil kruhové vodiče. Dále jsem při návrhu budícího vinutí musel z důvodu nedostatečného mezipólového prostoru, kdy osa tohoto prostoru protínala cívky, volit cívku vícepolohovou odstupňovanou.

Ve finální části práce jsem se zabýval ztrátami a účinností stroje, jež vyšla 93,2 %, a také návrhu a popisu ventilačního systému stroje. Práce je dále obohacena o konstrukční uspořádání stroje v podobě příčného a podélného řezu, které jsou vypracovány pomocí počítačového programu.

Seznam literatury a informačních zdrojů

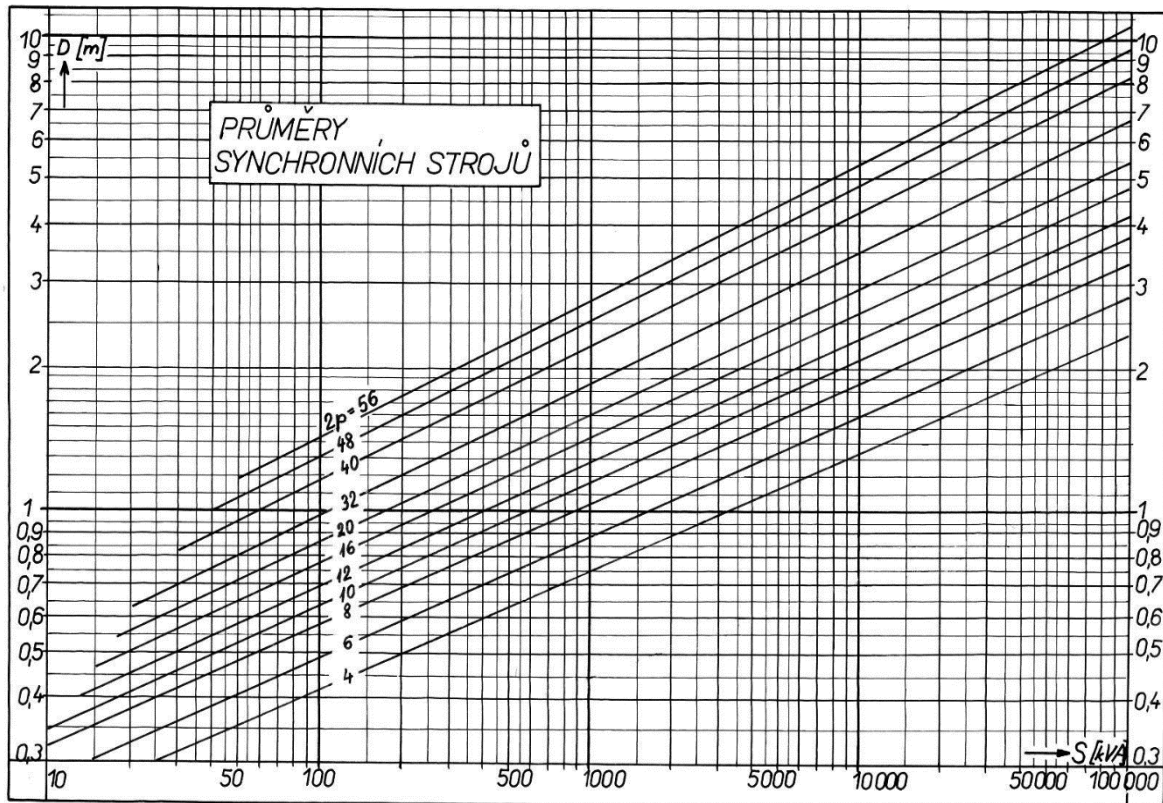
- [1] KOPYLOV, Igor Petrovič a kol. autorů. *Stavba elektrických strojů*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1988. 688 s. ISBN 04-532-88
- [2] CIGANEK, L. *Stavba elektrických strojů*. 1. vyd. Praha SNTL, 1958. 714 s.
- [3] KOČMAN, S., Vrána, V. *Synchronní stroje*. [online]. Cit [2015-03-06]. 4s.
Dostupný z www:
<http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/hgf/elektrotechnika/sylab_synchronni_stroje_bc.pdf>
- [4] Bartoš, V. *Teorie elektrických strojů*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2006. 230 s. ISBN 80-7043-509-7.
- [5] ČERVENÝ, J. *Postup při elektromagnetickém návrhu synchronního stroje*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2010. 19 s.

Seznam příloh

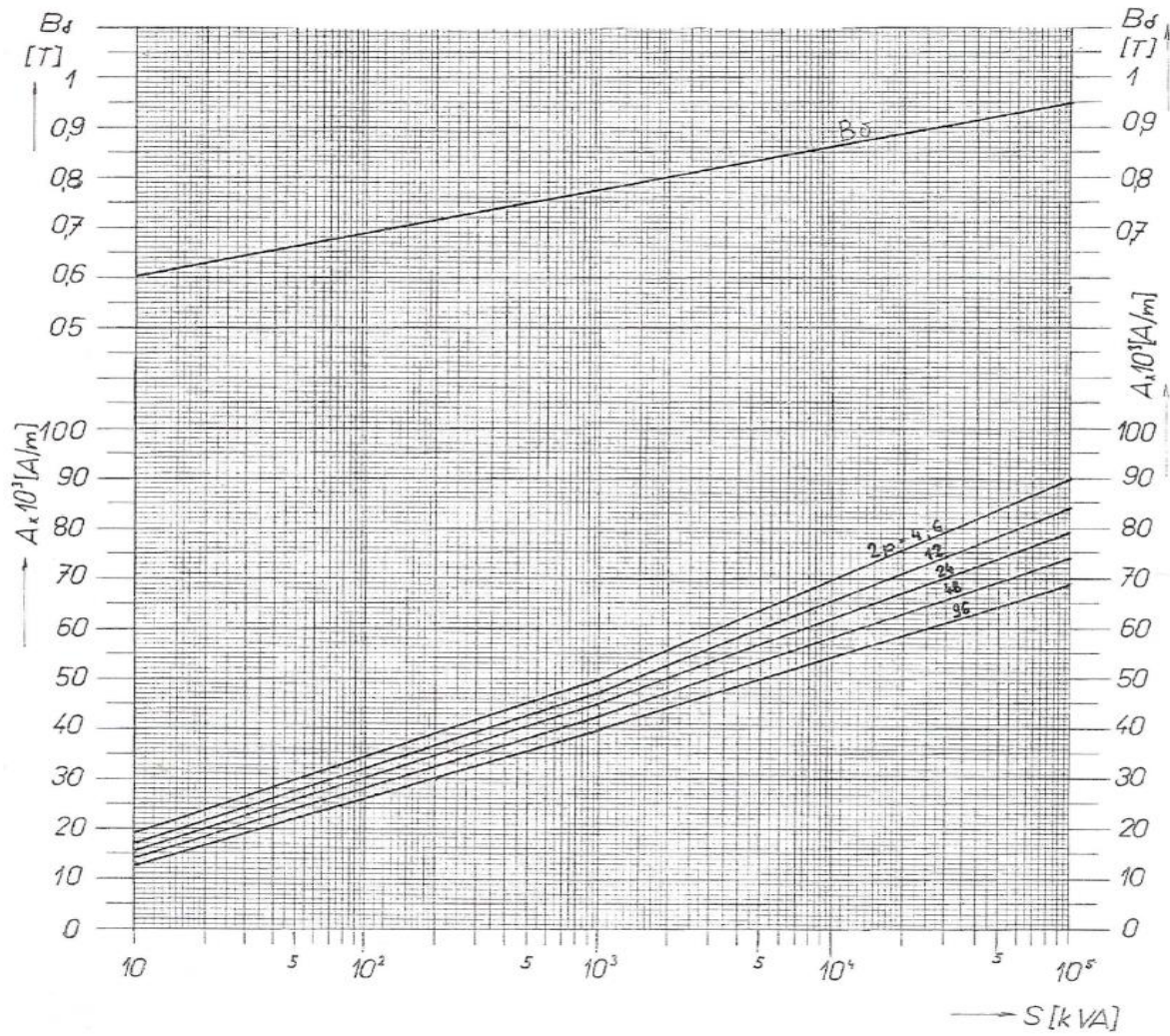
- [1] Graf pro určení průměru induktu stroje
- [2] Graf pro určení lineární proudové hustoty statoru a maximální indukce ve vzduchové mezeře
- [3] Graf pro určení mezidrážkové rozteče v závislosti na mezipólové rozteči
- [4] Tvary statorových drážek
- [5] Tabulka pro určení rozměrů měděných pásů dle ČSN 42 8308-1959
- [6] Graf pro odečtení činitele základní harmonické magnetické indukce
- [7] Graf pro odečtení deformačních činitelů magnetického napětí
- [8] Graf pro odečtení hodnoty Cartérova činitele respektujícího vliv drážkování induktu
- [9] Magnetizační křivka konstrukční oceli
- [10] Magnetizační křivka dynamových plechů
- [11] Nomogram pro určení skutečné indukce v zubech induktu
- [12] Graf pro určení součinitele přestupu tepla
- [13] Graf pro určení činitele povrchových ztrát
- [14] Příčný řez stroje
- [15] Podélný řez stroje
- [16] Vyniklý pól stroje

Přílohy

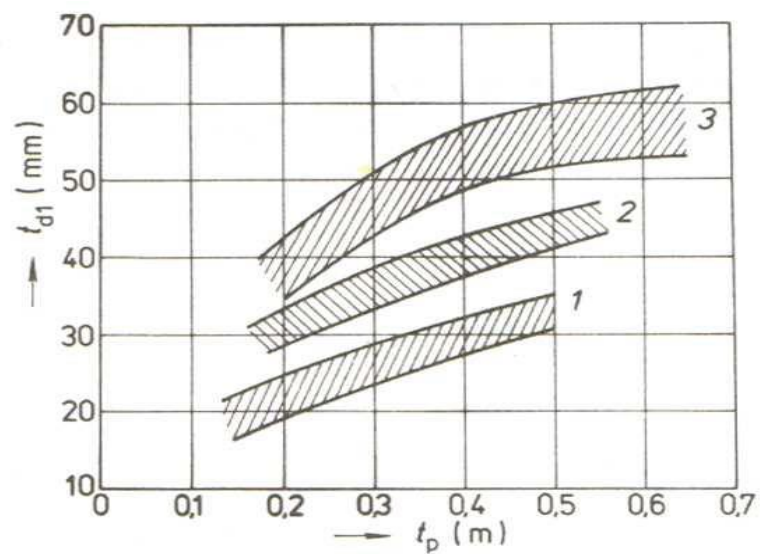
[1] Graf pro určení průměru induktu (statoru) ve vzduchové mezeře (vrtání statoru)



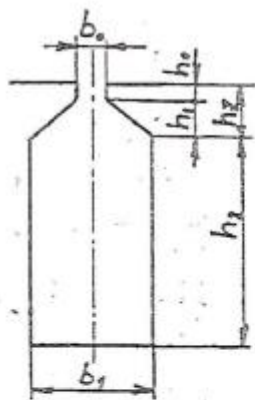
[2] Graf pro určení lineární proudové hustoty statoru a maximální indukce ve vzduchové mezeře



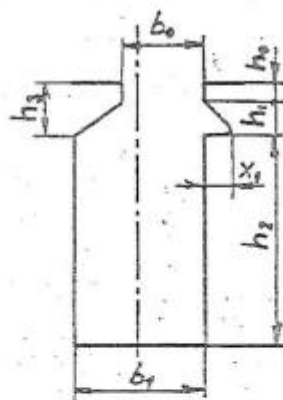
[3] Graf pro určení mezidrážkové rozteče v závislosti na mezipólové rozteči



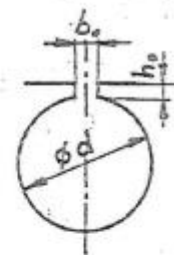
[4] Tvary statorových drážek



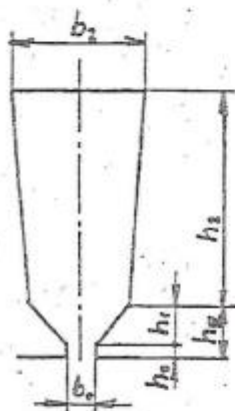
drážka D



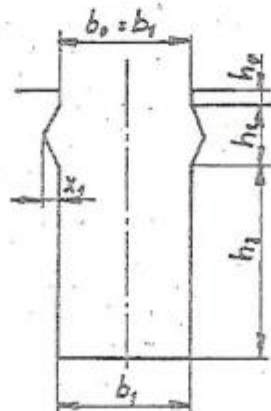
drážka F



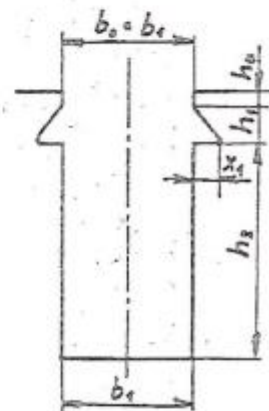
drážka K



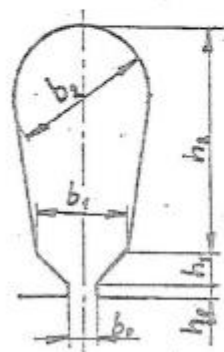
drážka L



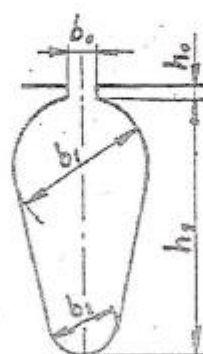
drážka M



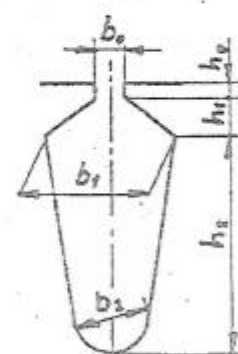
drážka N



drážka S

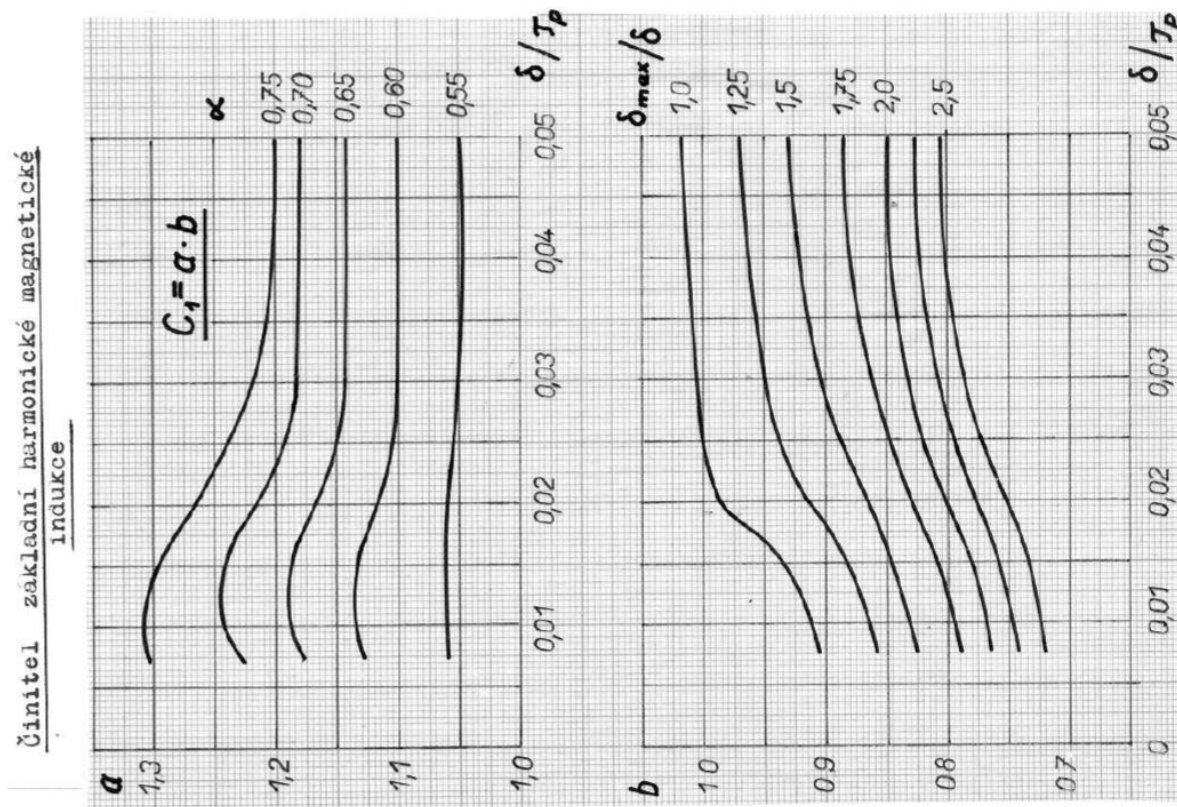


drážka V

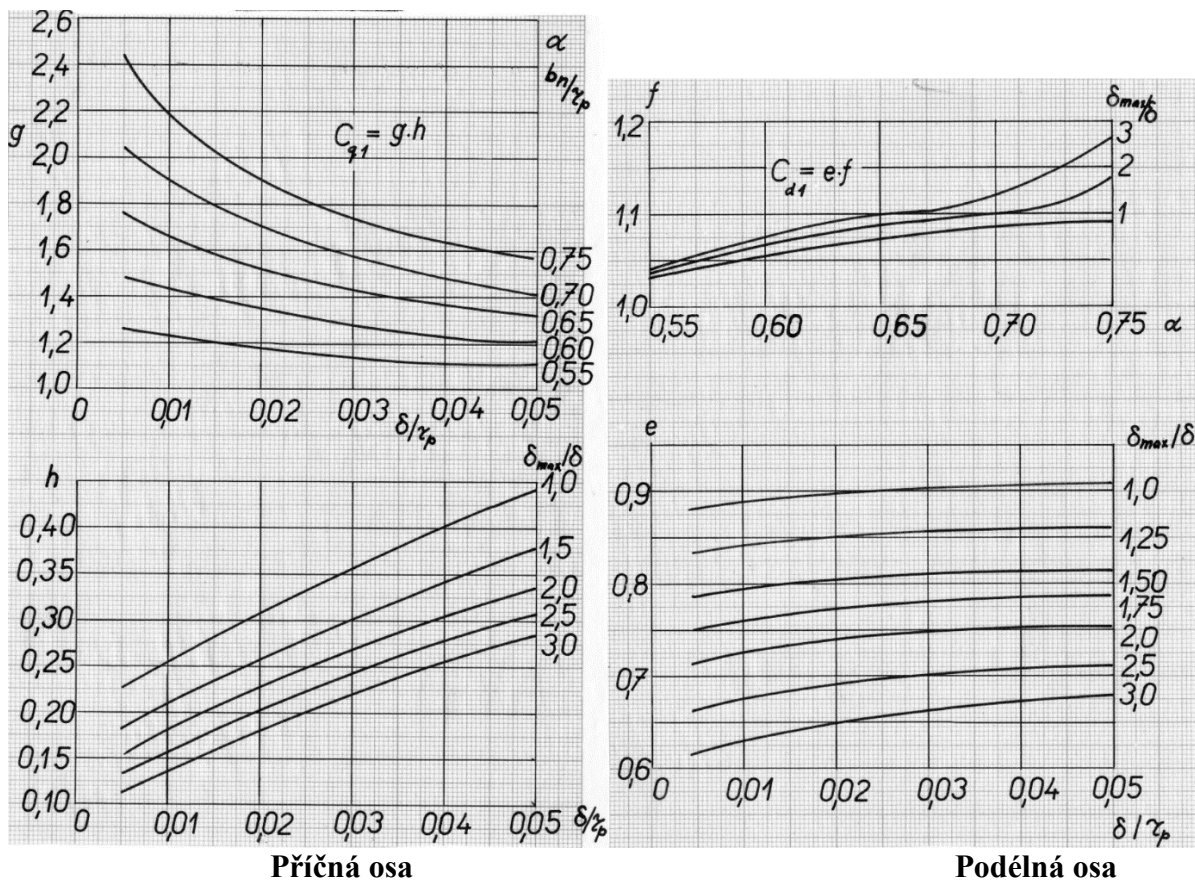


drážka W

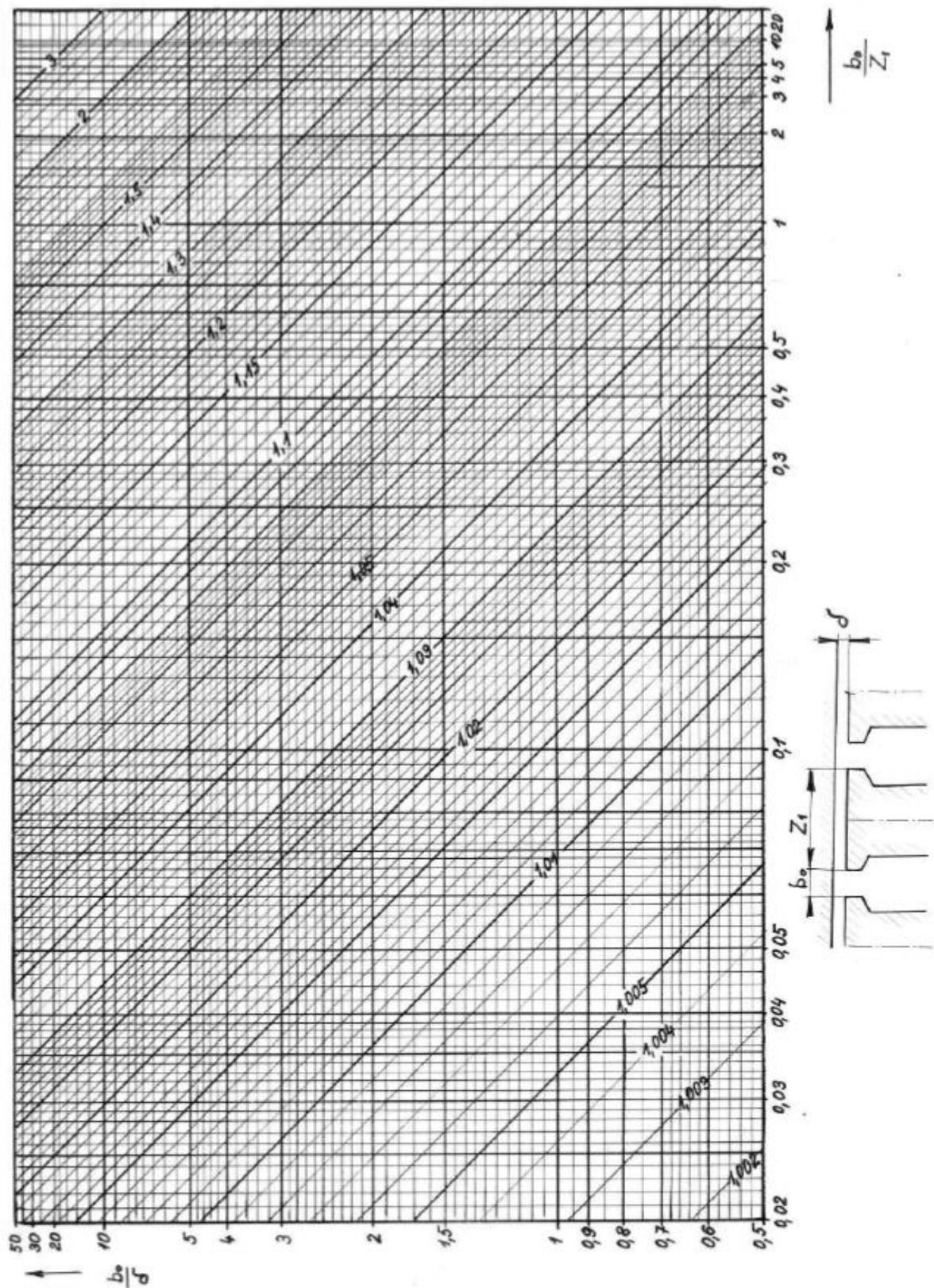
[6] Graf pro odečtení činitele základní harmonické magnetické indukce



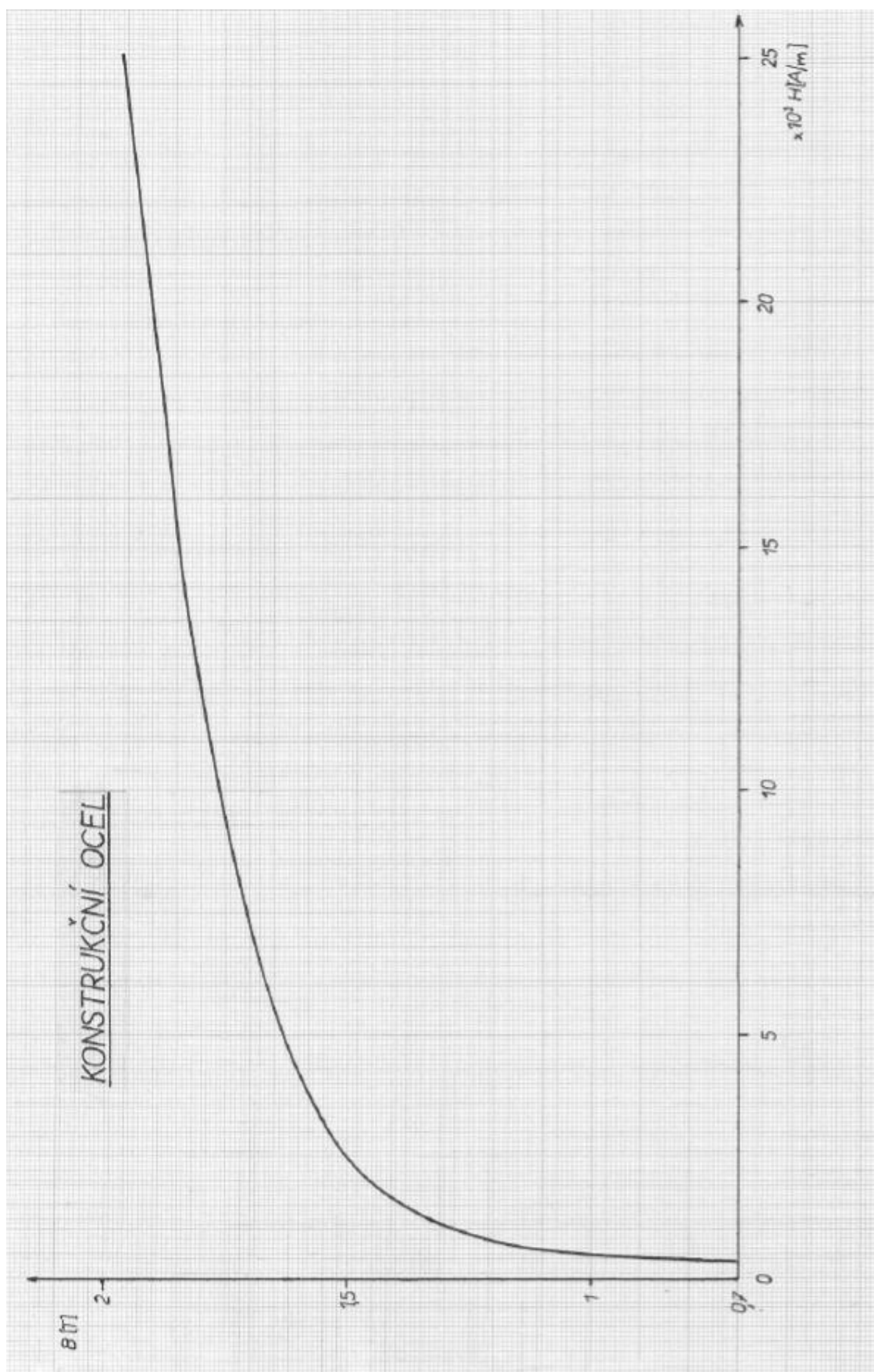
[7] Graf pro odečtení deformačních činitelů magnetického napětí



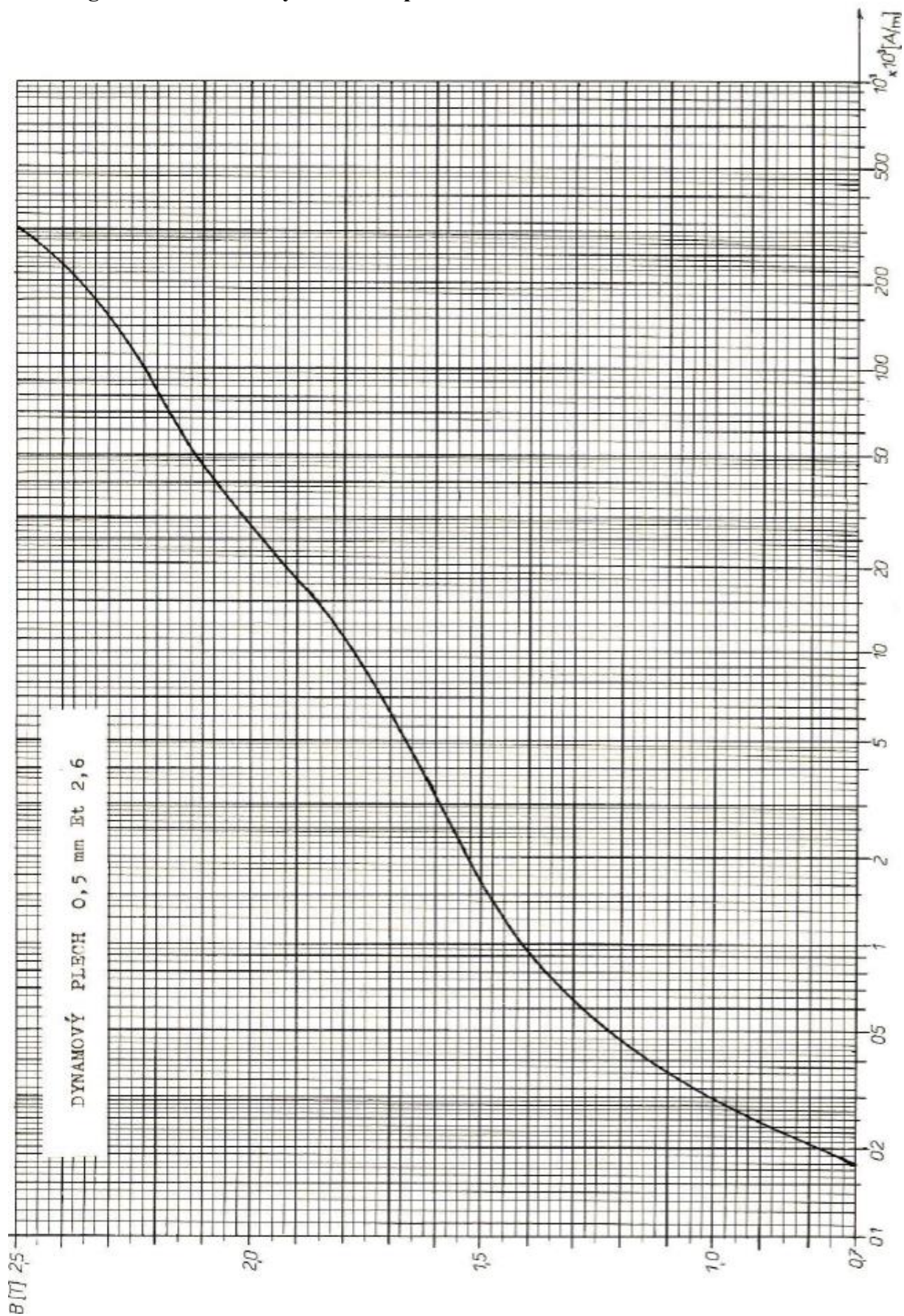
[8] Graf pro odečtení hodnoty Cartérova činitele respektujícího vliv drážkování Induktu



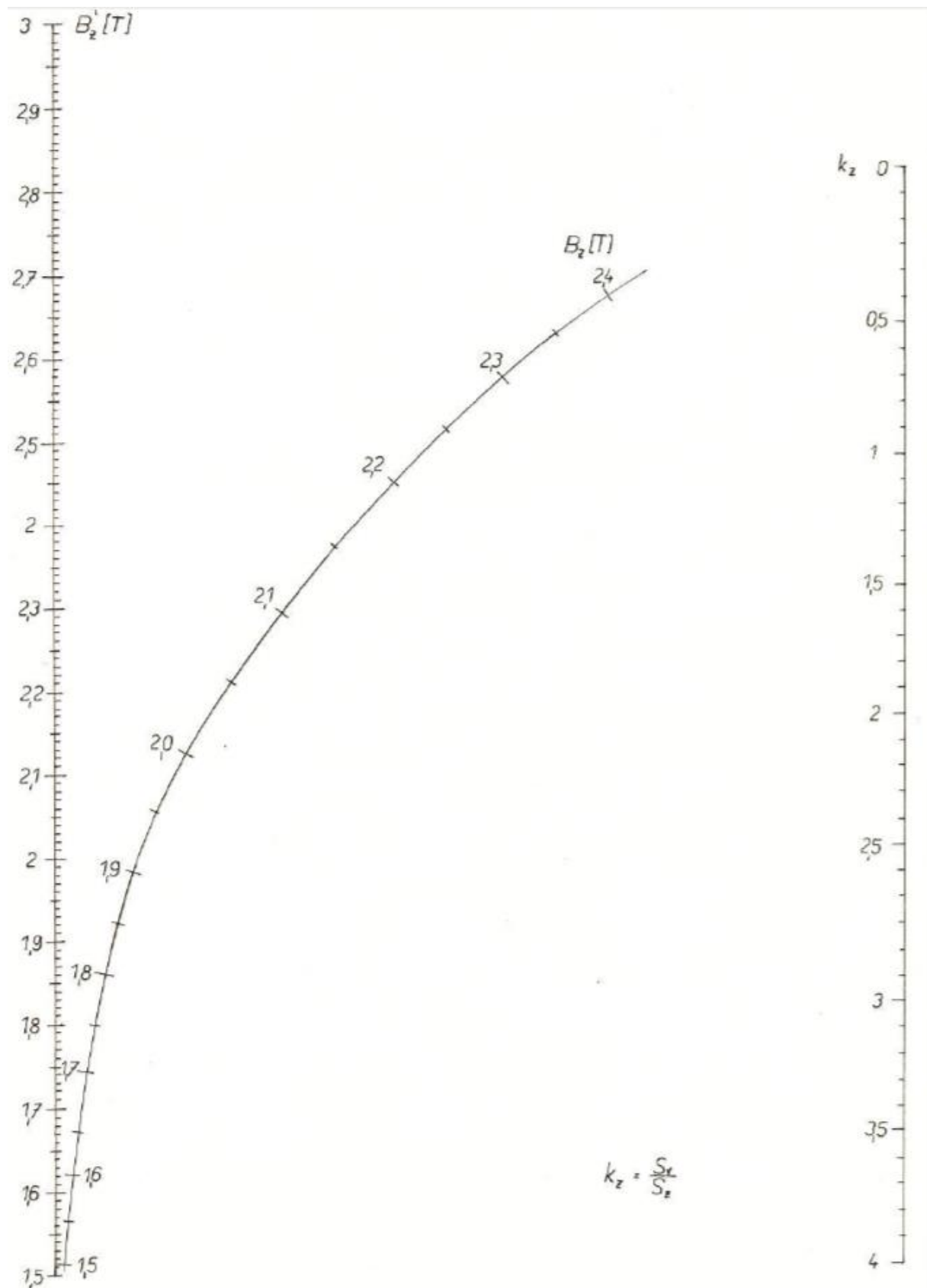
[9] Magnetizační křivka konstrukční oceli



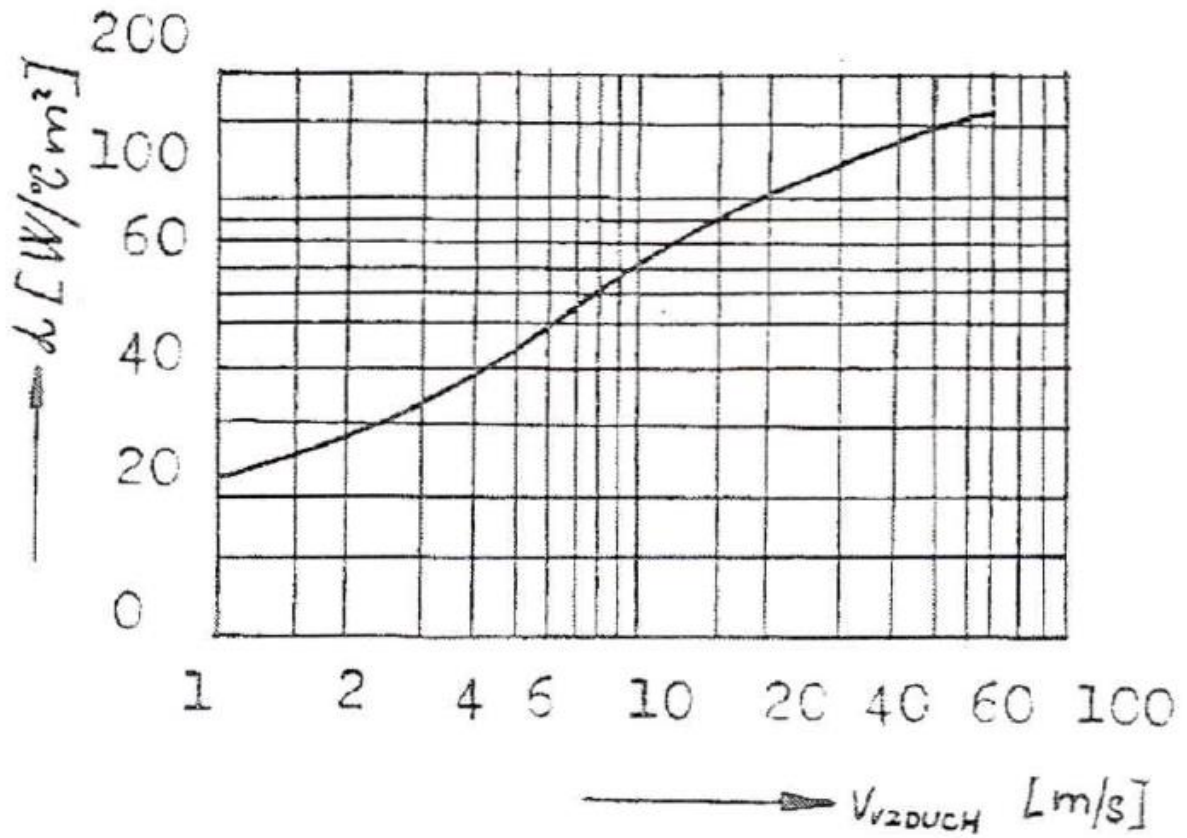
[10] Magnetizační křivka dynamového plechu



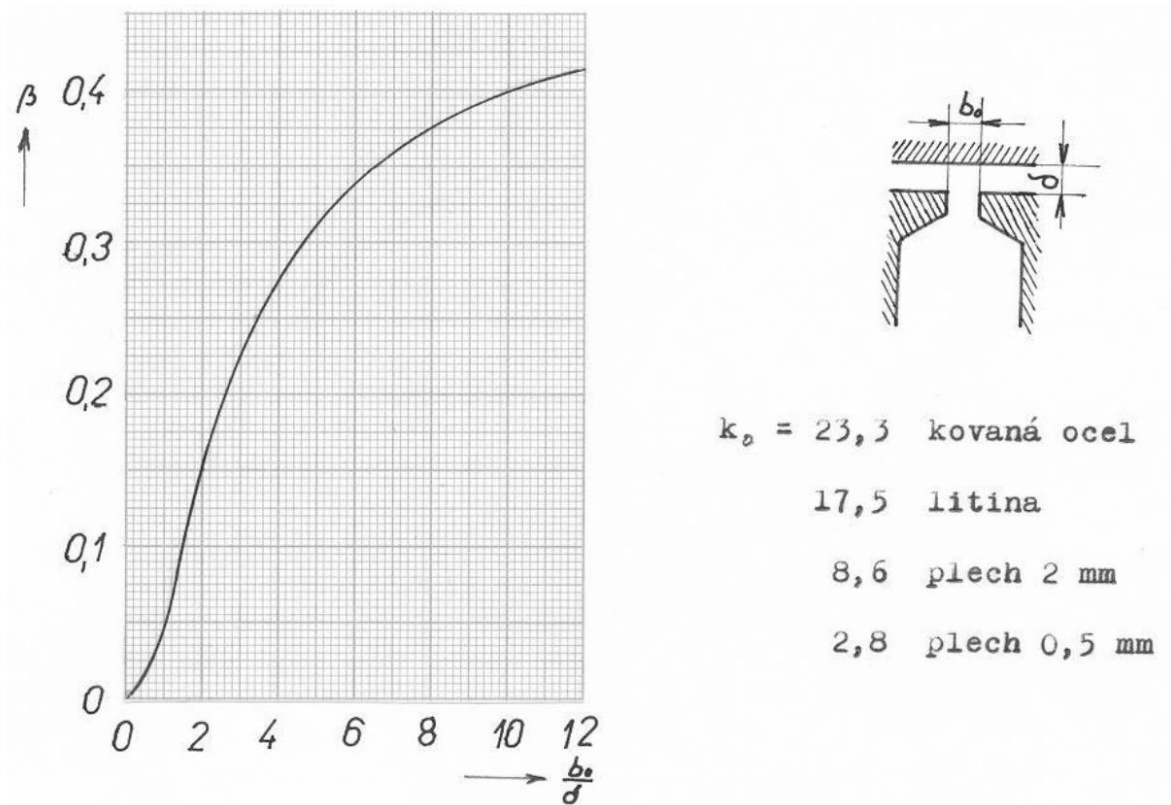
[11] Nomogram k určení skutečné indukce v zubech induktu



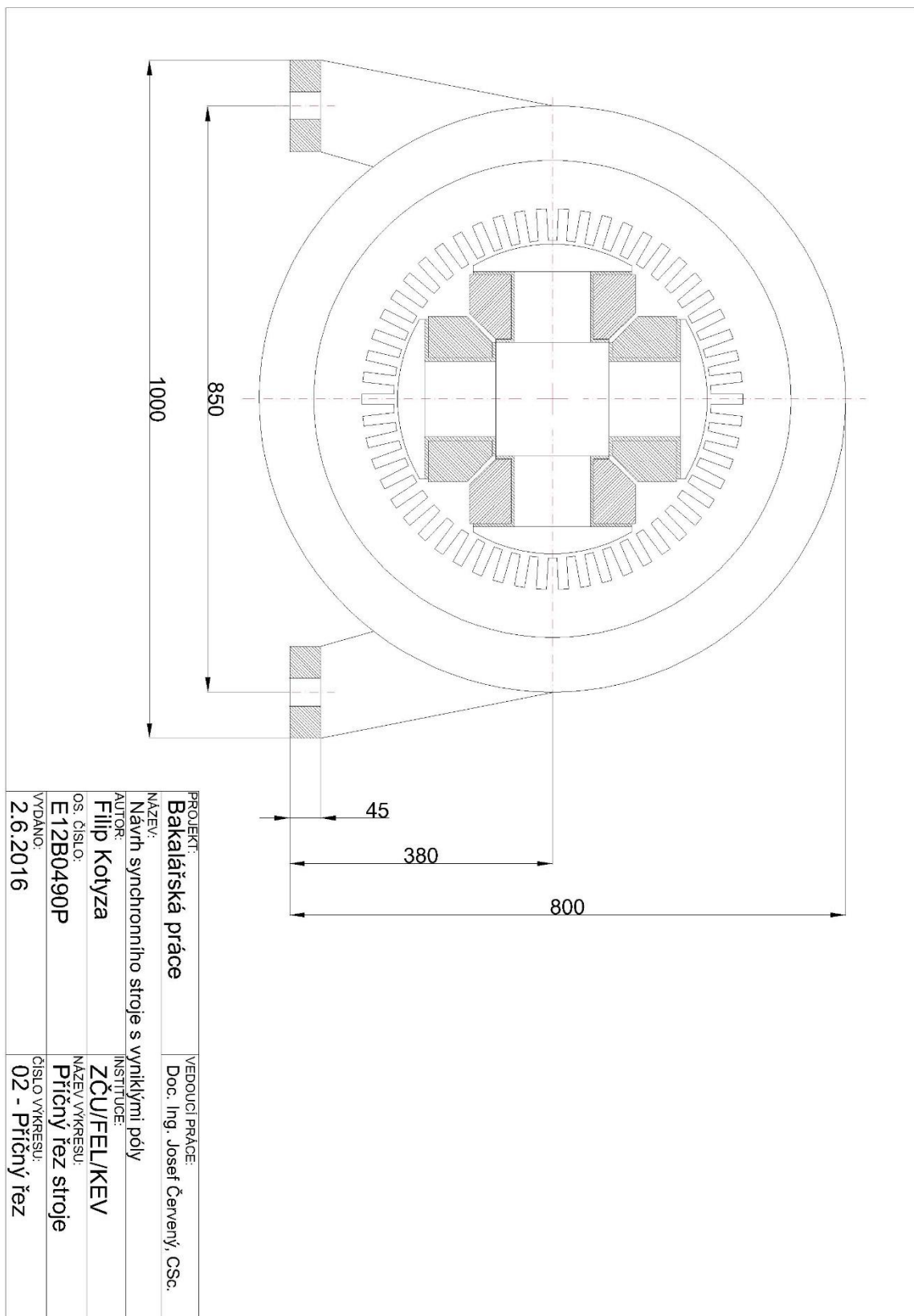
[12] Graf pro určení součinitele přestupu tepla



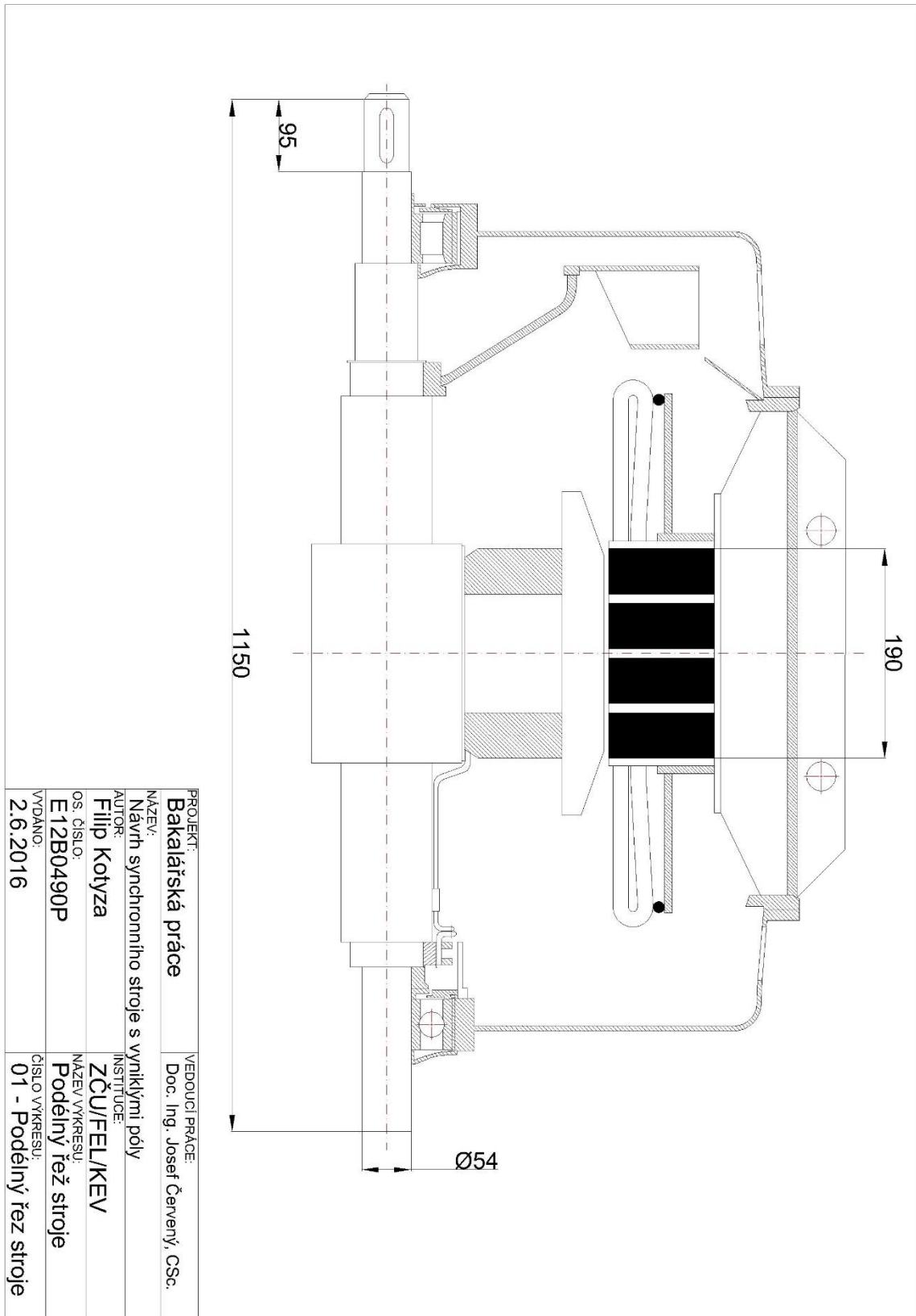
[13] Graf pro určení činitele povrchových ztrát



[14] Příčný řez stroje



[15] Podélný řez stroje



[16] Vyniklý pól stroje

