

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Návrh synchronního generátoru pro pohon přímoproudou
Kaplanovou turbínou**

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Ondřej WEISS**
Osobní číslo: **E12N0176P**
Studijní program: **N2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Návrh synchronního generátoru pro pohon přímoproudou Kaplanovo turbinou**
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

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

1. Proveďte elektromagnetický návrh stroje S parametry: $S=11000$ kVA, $U=3500$ V, $n=93,75$ ot/min, $m=3$, $\cos\varphi=0,9$, průměr oběžného kola turbíny $D=5,1$ m.
2. Sestrojte zatěžovací charakteristiku a graficky vyjádřete závislost účinnosti na zatížení stroje.
3. Proveďte orientační výpočet oteplení statoru a pólové cívky.
4. Navrhněte konstrukční uspořádání stroje.

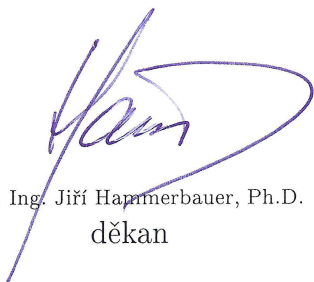
Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:

1. Wiedemann, E., Kellenberger, W.: Konstrukce elektrických strojů, SNTL, 1973
2. Červený, J.: Stavba elektrických strojů, portál ZCU Courseware, 2012
3. Červený, J.: Postup při elektromagnetickém návrhu synchronního stroje, portál ZCU Courseware, 2012
4. Cigánek, L.: Stavba elektrických strojů, SNTL, 1959

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



Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry



V Plzni dne 14. října 2013

Shrnutí

V předkládané práci se zabývám elektromagnetickým návrhem synchronního generátoru pro pohon přímoproudou Kaplanovou turbínou podle zadaných hodnot včetně výpočtu účinnosti v závislosti na zatížení. U stroje se projevuje velký mezipólový rozptylový tok, proto mu je v práci věnována větší pozornost, přičemž je nejprve proveden analytický výpočet a posléze jej porovnávám s numerickou metodou konečných prvků. Dále práce obsahuje zjednodušený tepelný výpočet metodou náhradního tepelného obvodu. Pro názornost uvádím i konstrukční provedení stroje v příčném a podélném řezu.

Klíčová slova

hydroalternátor, elektromagnetický návrh, přímoproudá turbína, vinutí, FEMM, mezipólový rozptyl, účinnost generátoru, konstrukční návrh, magnetizační charakteristika, zatěžovací charakteristika, tepelný výpočet

Abstract

Weiss, Ondřej. Design of a Synchronous Generator Driven by a Tubular Kaplan Turbine. Pilsen, 2014. Master thesis. University of West Bohemia. Faculty of Electrical Engineering. Department of Electric power engineering and Ecology. Supervisor: doc. Ing. Josef Červený, Csc.

This work deals with the electromagnetic design of a synchronous generator driven by a tubular Kaplan turbine according to the specifications, and the calculation of the load dependent efficiency. The design shows a great inter-pole leakage flux. This part is calculated analytically. The results are then compared with the results obtained by the finite element method. Furthermore, a simplified thermal calculation was carried out by the method of substitute thermal circuit. The work contains structural design of the machine in the transverse and longitudinal section.

Keywords

hydrogenerator, electromagnetic design, bulb turbine, winding, FEMM, inter-pole leakage flux, generator efficiency, construction design, magnetization characteristic, load characteristic, thermal calculation

Prohlášení

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

Prohlašuji, že jsem svou závěrečnou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestně právních důsledků vyplývajících z ustanovení § 270 trestního zákona č. 40/2009 Sb.

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

V Plzni dne 5.5.2014

Bc. Ondřej Weiss

.....
podpis

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu práce doc. Ing. Josefu Červenému, CSc., za profesionální přístup, odborné rady a metodické vedení při zpracování. Dále bych rád poděkoval Ing. Karlu Hruškovi, Ph.D., za jeho pomoc při numerickém výpočtu mezipólového rozptylu.

Obsah

Seznam tabulek	3
Seznam obrázků	5
1 Elektromagnetický návrh	9
1.1 Základní hodnoty	9
1.2 Návrh vinutí statoru	10
1.3 Parametry vinutí	12
1.4 Výpočet činitelů vinutí	14
1.5 Essonův činitel využití a délka stroje:	15
1.6 Návrh drážky	15
1.7 Určení odporu a rozptylové reaktance statorového vinutí	18
1.7.1 Délka čel:	19
1.7.2 Odpor jedné fáze	21
1.7.3 Rozptylová reaktance statorového vinutí	22
1.8 Návrh magnetického obvodu	23
1.8.1 Magnetický tok	23
1.8.2 Velikost vzduchové mezery	23
1.9 Magnetické napětí reakce kotvy	24
1.10 Dimenzování magnetického obvodu	25
1.10.1 Hlavní rozměry magnetického obvodu	25
1.10.2 Délka středních siločar magnetického obvodu	26
1.11 Charakteristika naprázdno	26
1.11.1 Magnetizační charakteristika zubové vrstvy	27
1.11.2 Magnetizační charakteristika celého magnetického obvodu	28
1.12 Návrh budícího vinutí	29
1.12.1 Orientační výpočet oteplení budící cívky	31
1.13 Návrh kroužků a kartáčů	32
1.14 Ztráty a účinnost	34
2 Mezipólový rozptyl	37
2.1 Analytická metoda	38
2.2 Metoda konečných prvků	40
2.3 Analytická verze upravená pro potřeby porovnání s MKP	43
2.4 Porovnání výsledků	43
3 Tepelný výpočet	45
3.1 Oteplení induktu	46
3.1.1 Určení ztrát	47
3.1.2 Drážkové rozteče v daných hladinách	47

3.1.3	Měrné tepelné vodivosti λ	48
3.1.4	Součinitelé přestupu tepla α	48
3.1.5	Výpočet tepelných odporů	49
3.1.6	Výpočet oteplení chladiwa na statoru	50
3.1.7	Náhradní tepelný obvod	51
3.2	Oteplení čel	53
4	Zatěžovací charakteristika a závislost zatížení na účinnosti	55
4.1	Zatěžovací charakteristika	55
4.2	Závislost účinnosti na zatížení	56
5	Konstrukční uspořádání	59
6	Závěr	61
7	Literatura	63
8	Přílohy	65

Seznam tabulek

- 1.1 Uspořádání drážky 16
- 1.2 Tabulka pro odhad proudové hustoty ve vodiči (zdroj:[5]) 17
- 1.3 Výběh z drážky v (zdroj:[5]) 20
- 1.4 Procentní hodnota nesyčené synchronní reaktance (zdroj:[5]) 23
- 1.5 Magnetizační charakteristika zubové vrstvy 28
- 1.6 Magnetizační charakteristika celého obvodu 28
- 1.7 Materiálové vlastnosti kovografitu MG 440 32
- 3.1 Použití měrné tepelné vodivosti (zdroj:[5]) 48
- 3.2 Použití součinitelů přestupu tepla (zdroj:[5]) 48
- 4.1 Tabulka závislosti F_b na I_n 56
- 4.2 Závislost účinnosti na zatížení 57
- 8.1 Tabulka určující izolaci proti železu a mezivrstvu v drážce (zdroj:[5]) 67
- 8.2 Doporučené rozměry kartáčů (zdroj:[5]) 67
- 8.3 Vlastnosti kartáčů pro kroužky (zdroj:[5]) 75
- 8.4 Třídy izolací (zdroj:[7]) 76
- 8.5 B-H závislost oceli M350-50A-1 78

Seznam obrázků

- 1.1 Drážka M (zdroj:[7]) 15
- 1.2 Provedení drážky 17
- 1.3 Popis čela vinutí (zdroj:[5]) 19
- 1.4 Označení drážky pro potřeby výpočtu rozptylové reaktance 22
- 1.5 Magnetizační charakteristika 29
- 1.6 Částečný příčný řez strojem 32
- 1.7 Nákres dosedajícího kartáče na kroužek (zdroj:[5]) 33
- 2.1 Popis jednotlivých složek rozptylového toku (zdroj:[5]) 37
- 2.2 Náhradní schéma magnetického toku synchronního stroje (zdroj:[5]) 37
- 2.3 Rozměry mezipólového prostoru (zdroj:[5]) 38
- 2.4 Geometrie s přiřazenými materiály 41
- 2.5 Nameshovaná geometrie 41
- 2.6 Vypočtená geometrie se znázorněnými siločarami a indukcí 42
- 2.7 Cesty pro odečet magnetických toků 42
- 3.1 Vymezený úsek induktu v příčném směru 46
- 3.2 Vymezený úsek induktu v podélném směru 46
- 3.3 Schéma tepelného obvodu 52
- 4.1 Zatěžovací charakteristika 55
- 4.2 Grafické zobrazení účinnosti na zatížení stroje 57
- 8.1 Graf proudové hustoty a indukce ve vzduchové mezeře (zdroj:[5]) 65
- 8.2 Tingleyho schéma 66
- 8.3 Činitel základní harmonické magnetické indukce ve vzduchové mezeře (zdroj:[5]) 68
- 8.4 Deformační činitel magnetického napětí v podélné ose (zdroj:[5]) 69
- 8.5 Deformační činitel magnetického napětí v příčné ose (zdroj:[5]) 70
- 8.6 Nomogram pro určení Carterova činitele na drážkování (zdroj:[5]) 71
- 8.7 Nomogram k určení skutečné indukce v zubech induktu (zdroj:[5]) 72

8.8	Magnetizační charakteristika dynamových plechů (zdroj:[5])	73
8.9	Magnetizační charakteristika konstrukční oceli (zdroj:[5])	74
8.10	Chladihost v proudícím vzduchu (zdroj:[5])	75
8.11	Činitelé povrchových ztrát pólového nástavce (zdroj:[5])	76
8.12	Okótovaný mezipólový prostor pro zjištění rozměrů	77
8.13	Zatěžovací charakteristika	79
8.14	Konstrukční uspořádání v podélném řezu	80
8.15	Konstrukční uspořádání v příčném řezu	81

Úvod

Práce je zaměřena na elektromagnetický návrh hydroalternátoru pro pohon přímoproudou Kaplanovou turbínou. Tato kombinace je poměrně specifická díky prostředí, ve kterém je generátor nainstalován. Jedná se totiž o zvláštní konstrukční variantu turbíny vrtulové a klasické Kaplanovy. Přímoproudá turbína je axiální turbína s pevnými nebo natáčivými lopatkami oběžného kola. Tyto turbíny se vyznačují tím, že vtok i sací trouba jsou téměř sousedé a také shodné s osou rotoru. Při porovnání s běžnými konstrukčními řešeními voda protékající turbínou není nucena měnit směr průtoku. Z toho nutně vyplývá, že umístění turbíny i alternátoru jsou pod vodní hladinou. [1]

U soustrojí lze rozlišovat dva typy provedení:

soustrojí s protékaným alternátorem

soustrojí s obtékaným alternátorem

U protékaného alternátoru je rotorové kolo přímo spojeno s oběžným kolem turbíny a jeho osou proudí voda. Obtékaný alternátor je vestavěn v prodlouženém náboji rozváděcího kola turbíny. Tento náboj je proti stěnám vtokové roury vzepřen radiálními žebry. Obtékané alternátory se stavějí buďto s přímým připojením na turbínu nebo s převodem přes řemenici. [1]

V mém případě budu následující výpočet i konstrukční schéma uvažovat pro soustrojí s obtékaným alternátorem spojený napřímo s turbínou. Charakteristickým rysem tohoto soustrojí je, že proti proudu mají vodotěsné pouzdro, které obsahuje zapouzďřený generátor umístěný na vodorovné ose s turbínou. Tvar pouzdra připomíná žárovku či baňku, proto se toto provedení také jinak nazývá „baňkové“ či „žárovkové.“ Generátor je řízen natáčejícími se vrtulemi, umístěnými na dolním konci „žárovky.“ Na rozdíl od klasické Kaplanovy turbíny, voda na vstupu i výstupu udělá velmi malou změnu směru. Přímoproudé turbíny mají také na rozdíl od Kaplanovy turbíny také větší účinnost a vyšší průtočnost vody. Tyto turbíny jsou nejefektivnějším řešením pro získávání energie z přílivu a tam, kde je velice nízká vodní hladina. Pracují totiž již od spádů 2 m a končí okolo 30 m. Nesporné plus jsou také menší zásahy do krajiny, náročnost stavebních prací klesne zhruba o 25% oproti běžným vodním elektrárnám. Nevýhodou je ovšem obtížnější přístup pro údržbu a vyžadují také speciální cirkulaci vzduchu a chlazení uvnitř prostoru. Současné výkonové rozmezí je poměrně pestré, pohybuje se od 450 kW až do 400 MW. Běžné rozměry rotoru jsou mezi 3 - 8 m. [2, 3, 4]

1 Elektromagnetický návrh

Proveďte elektromagnetický návrh stroje s těmito parametry:

Zdánlivý výkon:	$S = 11000 \text{ kVA}$
Sdružené napětí:	$U_s = 3500 \text{ V}$
Jmenovité otáčky:	$n = 93,75 \text{ ot/min}$
Počet fází:	$m = 3$
Účinník:	$\cos \varphi = 0,9$
Frekvence	$f = 50 \text{ Hz}$
Průměr oběžného kola turbíny:	$D = 5,1 \text{ m}$

1.1 Základní hodnoty

Nejprve je potřeba získat základní údaje o stroji z předem zadaných hodnot:

Fázové napětí:

$$U_f = \frac{U_s}{\sqrt{3}} = \frac{3500}{\sqrt{3}} = 2020,726 \doteq 2021 \text{ V} \quad (1.1)$$

Počet pólů:

$$p = \frac{60 \cdot f}{n} = \frac{60 \cdot 50}{93,75} = 32 \quad (1.2)$$

Počet pólpárů:

$$2p = 64 \quad (1.3)$$

Fázový proud:

$$I = \frac{S}{U_s \cdot \sqrt{3}} = \frac{11 \cdot 10^6}{3,5 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{3}} = 1814,53 \text{ A} \quad (1.4)$$

Dle zadání je vnější průměr $D = 5,1 \text{ m}$, což je průměr pláště turbíny, ale samotný průměr vrtání statoru neznám, proto ho bylo nutné zvolit. Zvolil jsem tedy $D_1 = 4,1 \text{ m}$.

Nyní určím proudovou hustotu z grafu 8.1. Pomocí něj jsem zjistil, že pro tento stroj je proudová hustota $A = 58000 \text{ A/m}$. Vzhledem k dobrému chlazení (stroj je obtékán vodou), lze tuto hodnotu zvýšit. Volím $A = 68000 \text{ A/m}$.

Po určení proudové hodnoty, je nutné ze stejného grafu 8.1 určit indukci ve vzduchové mezeře, a ta je pro 11 MVA stanovena na:

$$B_{\delta} = 0,88 T \quad (1.5)$$

Pro určení činitele pólového krytí, vycházím ze zdroje [5], který udává rozmezí $\alpha = 0,65 - 0,75$, přičemž [6] hodnotu upřesňuje na hodnotu $\alpha = 0,75$ pro pomaloběžné stroje, které se tedy budu držet pro pozdější výpočty.

Mezipólová rozteč na základě stanoveného průměru vrtání statoru je tedy:

$$t_p = \frac{\pi \cdot D_1}{2p} = \frac{\pi \cdot 4,1}{64} = 0,2013 m \quad (1.6)$$

1.2 Návrh vinutí statoru

Mezidrážkovou rozteč volím:

$$t_{d1} = 40 mm \quad (1.7)$$

Počet drážek (pouze orientační):

$$Q = \frac{\pi \cdot D_1}{t_{d1}} = \frac{\pi \cdot 4100}{40} = 322 \quad (1.8)$$

Počet drážek na pól a fázi:

$$q = \frac{Q}{2p \cdot m} = \frac{322}{64 \cdot 3} = 1,677 \quad (1.9)$$

\Rightarrow číslo není celé, a proto je nutné zvolit zlomkové vinutí, dle vztahu $q = \frac{n}{c}$. Také je nutné zachovat stejný počet drážek připadající na každou fázi, tedy $Q_f = \frac{Q}{m} = \frac{2p \cdot m \cdot q}{m} = 2p \cdot q = 2p \cdot \frac{n}{c} = \text{číslo celé}$. Aby se toto dodrželo je nutné, aby c bylo dělitelné 2 (2,4,6,16,...). V mém případě jsou vhodné pouze varianty $c = 4$ nebo $c = 8$. [5]

Pro velikost počtu drážek jsou v úvahu brány tyto možnosti:

1. $q = 1\frac{3}{4} = \frac{7}{4} \rightarrow Q = 2p \cdot m \cdot q = 2 \cdot 32 \cdot 3 \cdot \frac{7}{4} = 336 = 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 7$
2. $q = 1\frac{5}{8} = \frac{13}{8} \rightarrow Q = 2p \cdot m \cdot q = 2 \cdot 32 \cdot 3 \cdot \frac{13}{8} = 312 = 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 13$
3. $q = 1\frac{7}{8} = \frac{15}{8} \rightarrow Q = 2p \cdot m \cdot q = 2 \cdot 32 \cdot 3 \cdot \frac{15}{8} = 360 = 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 5$

Jelikož se statorové plechy pro takto velký stroj nevyrábějí vcelku, ale stator se musí skládat po tzv. segmentech s určitým překladem, musí ještě platit: $Q = k \cdot n_s \cdot Q_{př} \rightarrow k = \text{překladové číslo}$, $n_s = \text{počet segmentů}$, $Q_{př} = \text{počet drážek na překlad}$.

S přihlédnutím ke všem faktům se jeví nejvhodnější varianta č.1, tedy:

$$Q = 336 \quad (1.10)$$

$$q = \frac{7}{4} \quad (1.11)$$

Pokud dosadím do vzorce $Q = 336 = k \cdot n_s \cdot Q_{př} = 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 7 \Rightarrow k = 2$, $n_s = 21$, $Q_{př} = 8$.

Počet závitů v sérii jedné fáze:

$$N_s = \frac{\pi \cdot D_1 \cdot A}{2 \cdot m \cdot I_1} = \frac{\pi \cdot 4,1 \cdot 68000}{2 \cdot 3 \cdot 1814,53} = 80,45 \quad (1.12)$$

Počet vodičů v drážce se určí ze vztahu $n_d = \frac{a_{\approx} \cdot N_s}{p \cdot q}$. Musím ovšem hlídat, aby n_d bylo číslo celé a při uvažování dvouvrstvého vinutí, zároveň i sudé. Pokud se nebude vypočtená hodnota n_d příliš lišit od sudého čísla, zaokrouhlí se n_d na nejbližší celé sudé číslo. Jestliže se ovšem bude vypočtené lišit příliš od zaokrouhleného, je potřeba zvětšit počet paralelních větví a_{\approx} . [5]

$$\begin{aligned} a_{\approx} = 1 \rightarrow n_d &= \frac{a_{\approx} \cdot N_s}{p \cdot q} = \frac{1 \cdot 80,45}{32 \cdot \frac{7}{4}} = 1,436 \doteq 2 \rightarrow \text{příliš velké zaokrouhlení} \\ a_{\approx} = 2 \rightarrow n_d &= \frac{a_{\approx} \cdot N_s}{p \cdot q} = \frac{2 \cdot 80,45}{32 \cdot \frac{7}{4}} = 2,873 \doteq 4 \rightarrow \text{příliš velké zaokrouhlení} \\ a_{\approx} = 3 \rightarrow n_d &= \frac{a_{\approx} \cdot N_s}{p \cdot q} = \frac{3 \cdot 80,45}{32 \cdot \frac{7}{4}} = 4,308 \doteq 4 \rightarrow 3 \text{ paralelní větve nevhodné} \\ a_{\approx} = 4 \rightarrow n_d &= \frac{a_{\approx} \cdot N_s}{p \cdot q} = \frac{4 \cdot 80,45}{32 \cdot \frac{7}{4}} = 5,744 \doteq 6 \rightarrow \text{OK} \end{aligned}$$

Počet vodičů v drážce je tedy:

$$n_d = 6 \quad (1.13)$$

Nyní již mám určený počet vodičů v drážce, k těm je ovšem potřeba nyní přepočítat i skutečný počet závitů v sérii jedné fáze a také obvodovou proudovou hustotu:

$$N_s = \frac{n_d \cdot p \cdot q}{a_{\approx}} = \frac{6 \cdot 32 \cdot \frac{7}{4}}{4} = 84 \text{ závitů} \quad (1.14)$$

$$A = \frac{2 \cdot m \cdot I_1 \cdot N_s}{\pi \cdot D_1} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 1814,53 \cdot 84}{\pi \cdot 4,1} = 71000,4 \text{ A/m} \quad (1.15)$$

1.3 Parametry vinutí

Vinutí je jedna z nejpodstatnějších věcí stroje, pro jeho návrh je potřeba si ujasnit pár jeho vlastností. Standardně se u střídavých strojů uplatňuje tzv. rozstříhané vinutí, což znamená, že se vytvoří fiktivní počet fází m' , zlepšující vlastnosti stroje, respektivelepší se činitel rozlohy a tím i činitel vinutí, ukazující kvalitu navrženého vinutí. Pro $m = 3$ to znamená $m' = 6$. Výhodné je u takovýchto strojů nepoužívat vinutí jednovrstvé, proto volím vinutí dvouvrstvé $2u = 2$, které dovoluje jednodušší montáž, kratší délku čel a zlomkové vinutí. Pro jednodušší zakládání je jako typ vinutí zvoleno vinutí vlnové, nekřížené. [7]

Počet drážek na 1 pól:

$$Q_p = \frac{Q}{2p} = \frac{336}{64} = 5,25 \quad (1.16)$$

Jelikož v návrhu hodlám kvůli svým výhodám využít zkrácení kroku, nyní nastává moment, kdy je potřeba zvolit cívkový krok y_{1d} a z něj posléze určit činitel zkrácení kroku β , který dle [5] by měl být volen v rozmezí $0,8 \div 0,9$. Pouze u turboalternátorů, lze jít s tímto krokem až do hodnoty $\beta = 2/3$. Neoptimálnější je zvolit činitel zkrácení kroku na hodnotu $0,83$, při které vinutí nejlépe tlumí vyšší složky napětí, zejména 5. a 7.harmonickou (3.harmonická je tlumena již vlivem sdruženého třífázového napětí).

Pokud tedy zvolím $\beta = 0,83 \Rightarrow y_{1d} = \beta \cdot Q_p = 0,83 \cdot 5,25 = 4,3575$

Zde ovšem pozor, cívkový krok y_{1d} musí vyjít kladné celé číslo! Nabízí se varianta zvolit nejbližší možná celá čísla, což jsou 4 a 5.

$$\beta = \frac{y_{1d}}{Q_p} = \frac{4}{5,25} = 0,762 \Rightarrow \beta \notin \langle 0,8; 0,9 \rangle$$

$$\beta = \frac{y_{1d}}{Q_p} = \frac{5}{5,25} = 0,952 \Rightarrow \beta \notin \langle 0,8; 0,9 \rangle$$

Jak je vidět z obou případů, ani jedna varianta neleží v optimální intervalu.

Pro další postup návrhu jsem zvolil tyto hodnoty:

$$y_{1d} = 5 \quad (1.17)$$

$$\beta = \frac{y_{1d}}{Q_p} = \frac{5}{5,25} = 0,952 \quad (1.18)$$

Počet cívek ve stroji:

$$K = Q \cdot u = 336 \cdot 1 = 336 \Rightarrow K = Q \quad (1.19)$$

Fiktivní krok na komutátoru se spočte:

$$y_k = \frac{\varepsilon \cdot K \pm a_{ss}}{p},$$

přičemž musí vyjít číslo kladné a celé. V mém případě vinutí uvažuji vlnové a nekřížené, proto $\varepsilon = 1$ a znaménko „ - “. I krok na komutátoru y_k musí být *číslo celé* a je podle toho i vhodně zvolena velikost a_{ss} .

$$a_{ss} = 16 \quad (1.20)$$

$$y_k = \frac{\varepsilon \cdot K \pm a_{ss}}{p} = \frac{1 \cdot 336 - 16}{32} = 10 \quad (1.21)$$

Přední cívkový krok:

$$y_1 = 2u \cdot y_{1d} + 1 = 2 \cdot 1 \cdot 5 + 1 = 11 \quad (1.22)$$

Zadní cívkový krok:

$$y_2 = 2 \cdot y_k - y_1 = 2 \cdot 10 - 11 = 9 \quad (1.23)$$

Počet skupin vinutí:

$$a_{ss} \cdot m' = 16 \cdot 6 = 96 \quad (1.24)$$

Počet skupin vinutí na jednu fázi:

$$\frac{a_{ss} \cdot m'}{m} = \frac{96}{3} = 32 \quad (1.25)$$

Počet cívek ve skupině:

$$\frac{Q}{a_{ss} \cdot m'} = \frac{336}{96} = 3,5 \quad (1.26)$$

Vzhledem k faktu, že počet cívek ve skupině není celé číslo, budou rozstříhané části vinutí mezi sebou vzájemně sériově pospojovány.

V této části návrhu je vhodné pro představu vytvořit Tingleyho schéma, mapující rozložení jednotlivých cívkových stran fází v drážkách induktu (viz. obrázek 8.2).

Schéma je s následujícími parametry:

$$\text{počet řádků } 2p = 64$$

$$\text{počet sloupců } m \cdot n = 3 \cdot 7 = 21$$

$$\text{vyplňuje po kolika sloupcích } c = 4$$

1.4 Výpočet činitelů vinutí

Činitel vinutí ukazuje kvalitu (efektivitu) navrženého vinutí. Lze se k němu dostat několika způsoby, např. analyticky součinem činitele rozlohy s činitelem kroku a z Tingleyho schématu (viz. 8.2). V rámci práce se budu zabývat pouze řešením analytickým.

Výpočet vychází ze vzorečku:

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

kde

ν označuje řád harmonické

n čitatele počtu drážek na pól a fázi ($q = \frac{n}{c}$)

$$k_{v1} = \sin\left(1 \cdot 0,952 \cdot \frac{\pi}{2}\right) \cdot \frac{\sin 1 \cdot \frac{\pi}{6}}{7 \cdot \sin 1 \cdot \frac{\pi}{6 \cdot 7}} = 0,9531 \quad (1.27)$$

$$k_{v3} = \sin\left(3 \cdot 0,952 \cdot \frac{\pi}{2}\right) \cdot \frac{\sin 3 \cdot \frac{\pi}{6}}{7 \cdot \sin 3 \cdot \frac{\pi}{6 \cdot 7}} = -0,6256 \quad (1.28)$$

$$k_{v5} = \sin\left(5 \cdot 0,952 \cdot \frac{\pi}{2}\right) \cdot \frac{\sin 5 \cdot \frac{\pi}{6}}{7 \cdot \sin 5 \cdot \frac{\pi}{6 \cdot 7}} = 0,1818 \quad (1.29)$$

$$k_{v7} = \sin\left(7 \cdot 0,952 \cdot \frac{\pi}{2}\right) \cdot \frac{\sin 7 \cdot \frac{\pi}{6}}{7 \cdot \sin 7 \cdot \frac{\pi}{6 \cdot 7}} = 0,1234 \quad (1.30)$$

$$k_{v11} = \sin\left(11 \cdot 0,952 \cdot \frac{\pi}{2}\right) \cdot \frac{\sin 11 \cdot \frac{\pi}{6}}{7 \cdot \sin 11 \cdot \frac{\pi}{6 \cdot 7}} = 0,0658 \quad (1.31)$$

$$k_{v13} = \sin\left(13 \cdot 0,952 \cdot \frac{\pi}{2}\right) \cdot \frac{\sin 13 \cdot \frac{\pi}{6}}{7 \cdot \sin 13 \cdot \frac{\pi}{6 \cdot 7}} = 0,0481 \quad (1.32)$$

1.5 Essonův činitel využití a délka stroje:

Essonův činitel elektromagnetického využití stroje:

$$C = \frac{\pi^2}{60 \cdot \sqrt{2}} \cdot A \cdot B_\delta \cdot k_{v1} = \frac{\pi^2}{60 \cdot \sqrt{2}} \cdot 71,0004 \cdot 0,88 \cdot 0,9531 = 6,927 \text{ kVA/m}^3 \cdot \text{ot/min} \quad (1.33)$$

Efektivní délka stroje je vypočtena z výkonové rovnice stroje:

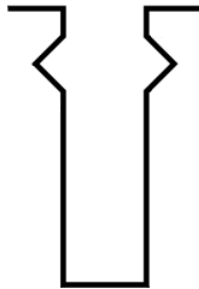
$$l_e = \frac{S}{C \cdot D_1^2 \cdot n} = \frac{11000}{6,927 \cdot 4,1^2 \cdot 93,75} = 1,008 \text{ m} \quad (1.34)$$

Vzhledem k faktu, že stroj je obtékán vodou, je statorový svazek téměř spojen s pláštěm stroje. Svazek je tedy výborně chlazen, není proto nutné do svazku zavádět radiální kanály, mimo jiné zvětšující i délku samotného stroje. Celková délka stroje je tedy:

$$L = l_e = 1,008 \text{ m} \quad (1.35)$$

1.6 Návrh drážky

Volím lichoběžníkovou drážku typu M:



Obrázek 1.1: Drážka M (zdroj:[7])

Drážková rozteč:

$$t_{d1} = \frac{\pi \cdot D_1}{Q} = \frac{\pi \cdot 4100}{336} = 38,33 \text{ mm} \quad (1.36)$$

1. ELEKTROMAGNETICKÝ NÁVRH

Šířka zubu:

$$z_1 = \frac{B_\delta \cdot t_{d1}}{B'_{z1} \cdot k_{Fe}} = \frac{0,88 \cdot 38,33}{1,7 \cdot 0,92} = 21,57 \text{ mm} \quad (1.37)$$

Magnetická indukce v patě zubu B'_{z1} zvolena $1,7 T$ (dle [5])

Činitel plnění železe k_{Fe} zvolen $0,92$ (dle [5])

Šířka drážky:

$$b_d = t_{d1} - z_1 = 38,33 - 21,57 = 16,76 \text{ mm} \quad (1.38)$$

Nejbližší normalizovaná šířka drážky:

$$b_d = 17 \text{ mm} \quad (1.39)$$

Skutečná šířka zubu (přepočtená vzhledem k normalizované šířce drážky):

$$z_1 = t_{d1} - b_d = 38,33 - 17 = 21,33 \text{ mm} \quad (1.40)$$

Vinutí je závitové s 6-ti vodiči v drážce s napětím $3500 V$, které má následující uspořádání vodičů a izolace v drážce:

		Šířka	mm	Hloubka	mm
1	Vyložení drážky	$2 \cdot 0,15$	0,3	$3 \cdot 0,15$	0,45
2	Izolace proti železu	$2 \cdot t_i \rightarrow 2 \cdot 1,8$	3,6	$4 \cdot t_i \rightarrow 4 \cdot 1,8$	7,2
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	$2 \cdot n_d \cdot 0,48 \rightarrow 2 \cdot 6 \cdot 0,48$	5,76
6	Izolace vodičů	$1 \cdot j \cdot 0,37 \rightarrow 1 \cdot 1 \cdot 0,37$	0,37	$n_d \cdot i \cdot 0,37 \rightarrow 6 \cdot 4 \cdot 0,37$	8,88
7	Mezivrstva	-	-	$1 \cdot m_v \rightarrow 1 \cdot 3$	3
8	Σ Izolace		5,73		26,29
9	Vůle na šířku	0,27	0,27	-	-
10	Holý vodič	$j \cdot b_v \rightarrow 1 \cdot 11$	11	$n_d \cdot j \cdot h_v \rightarrow 6 \cdot 4 \cdot 2,5$	60
11	Vložka na dno	-	-	0,5	0,5
12	Vložka pod klín	-	-	0,5	0,5
13	Vůle na hloubku	-	-	0,71	0,71
14	Rozměr drážky bez klínu	-	17	h_2	88
15	Klín + můstek	-	-	$h_o + h_1 \rightarrow 1 + 6$	7
16	Konečný rozměr drážky	b_d	17	h_d	95

Tabulka 1.1: Uspořádání drážky

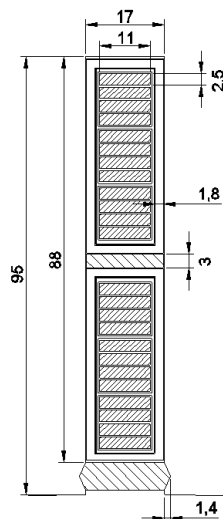
Parametry i, j v tabulce značí rozdělení vodiče na výšku (i) a na šířku (j).

Parametry m_v a t_i se určily z tabulky 8.1

Šířku holého vodiče b_v určím jako rozdíl šířky drážky se součtem izolace a vůle na šířku (položka 8 a 9 v tabulce 1.1):

$$b_v = b_d - \Sigma izolace - 0,27 = 17 - 5,73 - 0,27 = 11 \text{ mm} \quad (1.41)$$

Pro lepší názornost jak drážka bude vypadat, je sestrojen okótovaný obrázek vztahující se k předchozí tabulce 1.1:



Obrázek 1.2: Provedení drážky

Nyní je na řadě stanovit průřez vodiče, kterým se bude plnit drážka. K tomu, aby se ho mohl vypočíst, je nutné zavést fiktivní proudovou hustotu vodiče vycházející z empirického vztahu:

$$\sigma'_{Cu1} = \sqrt{\frac{K}{b_v}} = \frac{210}{11} = 4,37 \text{ A/mm}^2 \quad (1.42)$$

K je určeno z následující tabulky:

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

Tabulka 1.2: Tabulka pro odhad proudové hustoty ve vodiči (zdroj:[5])

Z fiktivní proudové hustoty lze stanovit pouze předběžný průřez vodiče:

$$S'_{Cu1} = \frac{I_1}{a_{st} \cdot \sigma'_{Cu1}} = \frac{1814,53}{4 \cdot 4,37} = 103,8 \text{ mm}^2 \quad (1.43)$$

Předběžná výška vodiče:

$$h'_v = \frac{S'_{Cu1}}{b_v} = \frac{103,8}{11} = 9,44 \text{ mm} \quad (1.44)$$

Protože by při této výšce vznikaly ve vodiči ztráty vlivem skinefektu, přistupuje se k jeho rozdělení na více dílčích (paralelních) vodičů.

Vodič rozdělen na výšku na 4 dílčí vodiče $\Rightarrow i = 4$

na šířku na 1 dílčí vodič $\Rightarrow j = 1$

Vodič jsem na základě tohoto rozdělení zvolil $2,5 \times 11 \Rightarrow S_1 = 27 \text{ mm}^2$

Výsledný průřez vodičů tvořící 1 závit je tedy:

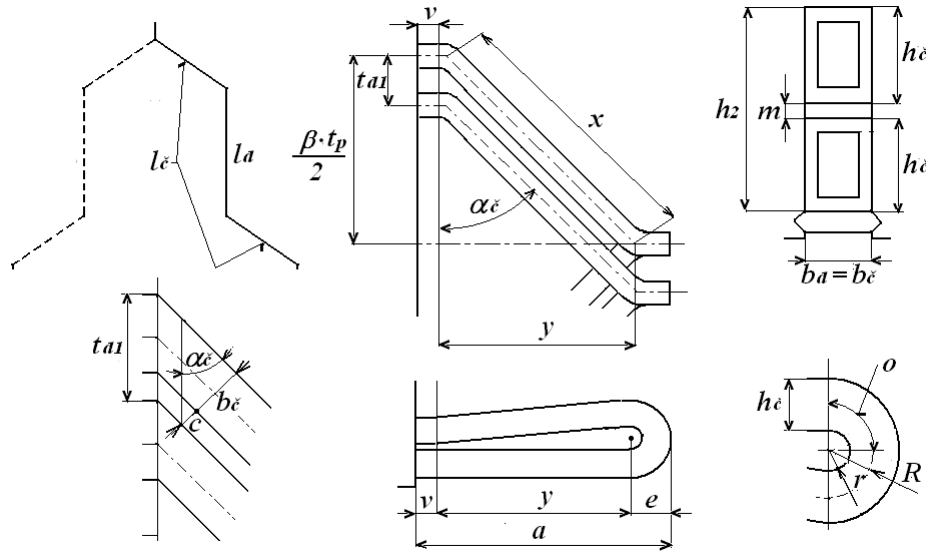
$$S_{Cu1} = j \cdot i \cdot S_1 = 4 \cdot 1 \cdot 27 = 108 \text{ mm}^2 \quad (1.45)$$

Z toho vyplývá skutečná proudová hustota:

$$\sigma_{Cu1} = \frac{I_1}{a_{st} \cdot S_{Cu1}} = \frac{1814,53}{4 \cdot 108} = 4,2 \text{ A/mm}^2 \quad (1.46)$$

1.7 Určení odporu a rozptylové reaktance statorového vinutí

Určení odporu a rozptylové reaktance se musí počítat jednak pro založenou část vinutí v drážkách, tak i pro část vybíhající do čel vinutí na válcové ploše. Při výpočtu rozměrů čel se objevuje množství označení, které jsou pro názornost uvedeny v následujícím obrázku 1.3 :



Obrázek 1.3: Popis čela vinutí (zdroj:[5])

1.7.1 Délka čel:

Úhel sklonu čel:

$$\sin \alpha_{\tilde{c}} = \frac{b_{\tilde{c}} + c}{t_{d1}} = \frac{17 + 5,75}{38,33} = 0,59352 \Rightarrow \alpha_{\tilde{c}} = 36,41^\circ \quad (1.47)$$

Vzdálenost mezi čely:

$$c = 4 + \frac{U_s}{2} = 4 + \frac{3,5}{2} = 5,75 \text{ mm} \quad (1.48)$$

Délka šroubovice:

$$x = \frac{\beta \cdot t_p}{2 \cdot \cos \alpha_{\tilde{c}}} = \frac{0,952 \cdot 201,3}{2 \cdot \cos 36,41} = 119,1 \text{ mm} \quad (1.49)$$

Výška čel přibližně:

$$h_{\tilde{c}} = \frac{1}{2} \cdot (h_2 - m_v) = \frac{1}{2} \cdot (88 - 3) = 42,5 \text{ mm} \quad (1.50)$$

Vnitřní poloměr oka r závisí na více okolnostech - rozměr vodiče, velikost cívek, napětí, požadavek na chlazení čel.

Rozmezí se udává v intervalu $r = (5 \div 20) \text{ mm}$. [5]

Volím:

$$r = 10 \text{ mm} \quad (1.51)$$

Střední poloměr oka:

$$R = r + \frac{h_{\bar{c}}}{2} = 10 + \frac{42,5}{2} = 31,25 \text{ mm} \quad (1.52)$$

Délka oka:

$$o = \frac{\pi \cdot R}{2} = \frac{\pi \cdot 31,25}{2} = 49,1 \text{ mm} \quad (1.53)$$

Výběh cívky z drážky v je závislý na napětí podle této tabulky:

$U_s [kV]$	$\leq 0,6$	3	6	10 ÷ 15
$v [mm]$	10 ÷ 25	35 ÷ 45	50 ÷ 65	80 ÷ 130

Tabulka 1.3: Výběh z drážky v (zdroj:[5])

Pro napětí $U_s = 3,5 \text{ kV}$ je zvoleno $v = 35 \text{ mm}$.

Délka čela:

$$l_{\bar{c}} = 2 \cdot (v + x + o) = 2 \cdot (35 + 119,1 + 49,1) = 406,4 \text{ mm} \quad (1.54)$$

Délka vodiče:

$$l_v = L + l_{\bar{c}} = 1008 + 406,4 = 1414,4 \text{ mm} \quad (1.55)$$

Vyložení čel v podélném směru:

Délka oka:

$$e = h_{\bar{c}} + r = 42,5 + 10 = 52,5 \text{ mm} \quad (1.56)$$

Průmět x do osového směru:

$$y = \frac{\beta \cdot t_p}{2} \cdot \text{tg } \alpha_{\bar{c}} = \frac{0,952 \cdot 201,3}{2} \cdot \text{tg } 36,41 = 70,66 \text{ mm} \quad (1.57)$$

Celkové vyložení v podélném směru:

$$a = v + y + e = 35 + 70,66 + 52,5 = 158,16 \text{ mm} \quad (1.58)$$

1.7.2 Odpor jedné fáze

Elektrický odpor při stejnosměrném proudu:

$$R'_{1/20} = \rho_{Cu} \cdot \frac{2 \cdot l_v \cdot N_s}{a_{st} \cdot S_{Cu1}} = \frac{1}{56} \cdot \frac{2 \cdot 1,4144 \cdot 84}{4 \cdot 108} = 9,82 \cdot 10^{-3} \Omega \quad (1.59)$$

ρ_{Cu} – je měrný elektrický odpor měděného vodiče při teplotě 20°C

Ve stroji ovšem protéká střídavý proud, který nepříznivě ovlivňuje vodič a vzniká tzv. skin efekt, a proto je nutné ho do výpočtů zahrnout.

Náhradní výška vodiče:

$$\xi = 2\pi \cdot h_v \cdot \sqrt{\frac{j \cdot b_v \cdot f}{b_d \cdot \rho}} \cdot 10^{-7} = 2\pi \cdot 2,5 \cdot \sqrt{\frac{1 \cdot 11 \cdot 50}{17 \cdot \frac{1}{56}}} \cdot 10^{-7} = 0,2114 \quad (1.60)$$

Činitel zvýšení elektrického odporu:

$$k_{Cu} = \frac{g^2 - 0,2}{9} \cdot \xi^4 = \frac{(4 \cdot 6)^2 - 0,2}{9} \cdot 0,2114^4 = 0,128 \quad (1.61)$$

g celkový počet vodičů v drážce nad sebou $\Rightarrow g = i \cdot n_d = 4 \cdot 6$

Odpor při střídavém proudu při 20°C:

$$R_{1/20} = (1 + k_{Cu}) \cdot R'_{1/20} = (1 + 0,128) \cdot 9,822 \cdot 10^{-3} = 0,01108 \Omega \quad (1.62)$$

Odpor při střídavém proudu při 75°C:

$$R_{1/75} = 1,22 \cdot R_{1/20} = 1,22 \cdot 0,01108 = 0,0135 \Omega \quad (1.63)$$

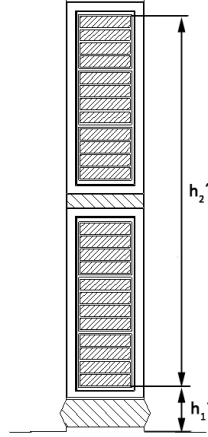
Procentní hodnota úbytku napětí:

$$u_r = \frac{R_{1/75} \cdot I_1}{U_f} \cdot 100 = \frac{0,0135 \cdot 1814,53}{2021} \cdot 100 = 1,212 \% \quad (1.64)$$

1.7.3 Rozptylová reaktance statorového vinutí

h'_2 vzdálenost krajních vodičů v drážce $\Rightarrow h'_2 = 81 \text{ mm}$

h'_1 vzdálenost nejbližšího krajního vodiče od kraje drážky $\Rightarrow h'_1 = 9 \text{ mm}$



Obrázek 1.4: Označení drážky pro potřeby výpočtu rozptylové reaktance

Rozptylová reaktance statorového vinutí:

$$\begin{aligned}
 X_{\sigma} &= \frac{(4\pi)^2 \cdot f \cdot N_s^2}{p \cdot q} \cdot l_e \cdot \left[\left(\frac{h'_2}{3 \cdot b_d} + \frac{h'_1}{b_d} \right) + \frac{l_{\tilde{c}}}{l_e} \cdot q \cdot (0,187 + 0,166 \cdot \frac{t_p}{l_{\tilde{c}}} \cdot \beta) + \right. \\
 &\quad \left. \ln\left(1 + \frac{\pi \cdot z_1}{2 \cdot b_d}\right) \right] \cdot 10^{-7} = \frac{(4\pi)^2 \cdot 50 \cdot 84^2}{32 \cdot 1,75} \cdot 1,008 \cdot \left[\left(\frac{81}{3 \cdot 17} + \frac{9}{17} \right) + \right. \\
 &\quad \left. \frac{0,4064}{1,008} \cdot 1,75 \cdot (0,187 + 0,166 \cdot \frac{0,2013}{0,4064} \cdot 0,952) + \right. \\
 &\quad \left. \ln\left(1 + \frac{\pi \cdot 21,33}{2 \cdot 17}\right) \right] \cdot 10^{-7} = 0,34032 \Omega \quad (1.65)
 \end{aligned}$$

Procentní hodnota úbytku na rozptylové reaktanci:

$$u_{\sigma} = x_{\sigma} = \frac{X_{\sigma} \cdot I_1}{U_f} \cdot 100 = \frac{0,34032 \cdot 1814,53}{2021} = 30,555 \% \quad (1.66)$$

Vycházející procentní hodnota úbytku na rozptylové reaktanci je vysoká oproti tomu co udává [5], kde bych se měl vejít do hodnot okolo 10%. Hodnota 30,555% rozhodně není obvyklá a příliš příznivá, ovšem dá se to přisuzovat poměru relativně vysokého proudu na úkor celkem nízkého napětí. Má to ovšem jednu výhodu, sníží se tím proud nakrátko - v charakteristice naprázdno se proudová přímka položí více do roviny.

1.8 Návrh magnetického obvodu

1.8.1 Magnetický tok

Magnetický tok z rovnice pro indukované napětí:

$$\Phi = \frac{U_f}{4,44 \cdot f \cdot N_s \cdot k_{v1}} = \frac{2021}{4,44 \cdot 50 \cdot 84 \cdot 0,9531} = 0,1137 \text{ Wb} \quad (1.67)$$

Určení magnetického toku z rozměrů stroje a velikosti magnetické indukce ve vzduchové mezeře:

$$\Phi = \frac{2}{\pi} \cdot t_p \cdot l_e \cdot B_\delta = \frac{2}{\pi} \cdot 0,2013 \cdot 1,008 \cdot 0,88 = 0,1137 \text{ Wb} \quad (1.68)$$

Oba způsoby podávají stejné výsledky, hodnota magnetického toku je tedy $\Rightarrow \Phi = 0,1137 \text{ Wb}$.

1.8.2 Velikost vzduchové mezery

Velikost vzduchové mezery je poměrně zásadní parametr ovlivňující celou řadu věcí stroje, jako je například jeho účinnost, velikost budícího proudu, velikost indukce, magnetický odpor. Snahou je mít vzduchovou mezeru co nejmenší, ovšem nesmí být zase příliš malá kvůli možné excentricitě rotoru a jeho uložení, případně nárůstu povrchových ztrát [5]. Vhodné řešení je více než důležité a právě v tomto bodě je zajímavé, jak se dostupné zdroje rozcházejí. Mezera by měla splňovat obecné kritérium $\delta \geq \frac{D_1}{1000}$, tj. $\geq 4,1 \text{ mm}$. Pro ilustraci uvedu 2 příklady:

Volba vzduchové mezery dle [6]:

$$\delta = 0,3 \cdot t_p \cdot \frac{A}{B_\delta} \cdot 10^{-6} = 0,3 \cdot 0,2013 \cdot \frac{71000,4}{0,88} \cdot 10^{-6} = 4,87 \doteq 4,9 \text{ mm} \quad (1.69)$$

Volba vzduchové mezery dle [5]:

$$\delta = 40 \cdot \frac{A \cdot t_p}{B_\delta} \cdot \frac{10^{-6}}{x_d - x_\sigma} = 40 \cdot \frac{71000,4 \cdot 0,2013}{0,88} \cdot \frac{10^{-6}}{92 - 30,555} \doteq 10,6 \text{ mm} \quad (1.70)$$

kde x_d je procentní hodnota nesyčené synchronní reaktance a jelikož ji nemám zadanou, byla zvolena z následující tabulky:

$2p$	2	4	6	8	10	12	16	20	24	28	32	40	56	80	90
x_d	200÷240	170	150	137	127	120	110	105	100	98	97	95	93	92	90

Tabulka 1.4: Procentní hodnota nesyčené synchronní reaktance (zdroj:[5])

Obě metody obecné kritérium splňují, z tohoto hlediska by obě metody prošly. Ovšem díky tomu, že stroj má poměrně vysokou rozptylovou reaktanci oproti běžným hodnotám, nastává zde proto velký rozdíl ve velikostech vzduchové mezery díky tomu, že první metoda (dle [6]) vůbec rozptylovou reaktanci stroje nerespektuje a je proto v mém případě nevhodná. V případech, kdy vychází reaktance x_σ nižší, by se měly obě metody navzájem zpřesňovat. V dalším návrhu budu počítat s mezerou $\delta = 10,6 \text{ mm}$.

Pro zajištění pokud možno plynulého sinusového průběhu výstupního napětí, je nutné zajistit proměnnou vzduchovou mezeru po obvodu stroje. V ose pólového nástavce je mezeza nejmenší, ke krajům se mezeza zvětšuje. Přibližná hodnota zvětšení oproti ose pólu je 1,5x, poměr vychází tedy:

$$\frac{\delta_{max}}{\delta} = 1,5 \quad (1.71)$$

1.9 Magnetické napětí reakce kotvy

Amplituda základní harmonické reakce kotvy:

$$F'_a = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{1}{C_1} \cdot A \cdot t_p \cdot k_{v1} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{1}{1,116} \cdot 71000,4 \cdot 0,2013 \cdot 0,9531 = 5494,7 \text{ A} \quad (1.72)$$

kde C_1 je činitel základní harmonické magnetické indukce ve vzduchové mezeře, který se určil z přílohy 8.3

$$\left. \begin{array}{l} a = 1,2 \\ b = 0,93 \end{array} \right\} C_1 = a \cdot b = 1,116 \quad (1.73)$$

Amplituda základní harmonické magnetického napětí v podélném směru:

$$F_{d1} = C_{d1} \cdot F'_a = 0,90875 \cdot 5494,7 = 4993,31 \text{ A} \quad (1.74)$$

kde C_{d1} je deformační činitel magnetického napětí v podélné ose, který se určil z přílohy 8.4

$$\left. \begin{array}{l} e = 0,815 \\ f = 1,115 \end{array} \right\} C_{d1} = e \cdot f = 0,90875 \quad (1.75)$$

Amplituda základní harmonické magnetického napětí v příčném směru:

$$F_{q1} = C_{q1} \cdot F'_a = 0,6162 \cdot 5494,7 = 3385,8 \text{ A} \quad (1.76)$$

kde C_{q1} je deformační činitel magnetického napětí v příčné ose, který se určil z přílohy 8.5

$$\left. \begin{array}{l} g = 1,56 \\ h = 0,395 \end{array} \right\} C_{q1} = g \cdot h = 0,6162 \quad (1.77)$$

1.10 Dimenzování magnetického obvodu

1.10.1 Hlavní rozměry magnetického obvodu

Předběžná výška pólu:

$$h_p = 0,3 \cdot t_p = 0,3 \cdot 0,2013 = 0,06039 \doteq 60,4 \text{ mm} \quad (1.78)$$

Výška nástavce:

$$h_n = 0,1 \cdot t_p = 0,1 \cdot 0,2013 = 0,0201 = 20,1 \text{ mm} \quad (1.79)$$

Šířka pólu:

$$b_p = \frac{(1 + \nu) \cdot \Phi}{B_p \cdot L_p} = \frac{(1 + 0,15) \cdot 0,1137}{1,4 \cdot 1,008} = 0,0927 = 92,7 \text{ mm} \quad (1.80)$$

ν je předpokládaná poměrná hodnota mezipólového rozptylového toku; $\nu = (0,1 \div 0,2)$

B_p je zvolená magnetická indukce pólu

Šířka pólového nástavce:

$$b_n = \alpha \cdot t_p = 0,75 \cdot 0,2013 = 0,15098 = 151 \text{ mm} \quad (1.81)$$

Výška jha rotoru:

$$h_{jr} = \frac{(1 + \nu) \cdot \Phi}{2 \cdot B_{jr} \cdot L_r} = \frac{(1 + 0,15) \cdot 0,1137}{2 \cdot 1,1 \cdot 1,09} = 0,0545 = 54,5 \text{ mm} \quad (1.82)$$

B_{jr} je zvolená magnetická indukce ve jhu rotoru

L_r je délka rotoru, oproti délce pólu zvětšená s ohledem na prostor pro dosednutí budící cívky

$$L_r = L_p + \Delta l = 1,008 + 0,092 = 1,09 \text{ mm} \quad (1.83)$$

Výška jha statoru:

$$h_{js} = \frac{\Phi}{2 \cdot B_{js} \cdot k_{Fe} \cdot l_e} = \frac{0,1137}{2 \cdot 1,3 \cdot 0,92 \cdot 1,008} = 0,04716 \doteq 47,2 \text{ mm} \quad (1.84)$$

B_{js} je zvolená magnetická indukce ve jhu statoru

1.10.2 Délka středních siločar magnetického obvodu

Pól:

$$l_p = h_p + h_n = 0,0604 + 0,0201 = 0,0805 = 80,5 \text{ mm} \quad (1.85)$$

Jho rotoru:

$$l_r = \frac{\pi \cdot [D_1 - 2 \cdot (\delta + h_p + h_n)]}{4 \cdot p} = \frac{\pi \cdot [4,1 - 2 \cdot (0,0106 + 0,0604 + 0,0201)]}{4 \cdot 32} = 0,0962 = 96,2 \text{ mm} \quad (1.86)$$

Jho statoru:

$$l_s = \frac{\pi \cdot [D_1 + 2 \cdot (h_d + h_{js})]}{4 \cdot p} = \frac{\pi \cdot [4,1 + 2 \cdot (0,095 + 0,0472)]}{4 \cdot 32} = 0,1076 = 107,6 \text{ mm} \quad (1.87)$$

1.11 Charakteristika naprázdno

Sestavení charakteristiky naprázdno předchází výpočet Carterova činitele k_c a magnetického napětí ve vzduchové mezeře. Carterův činitel se zahrnuje proto, neboť respektuje vliv drážkování na induktu (statoru) k_{cd} a vliv radiálních ventilačních kanálů k_{cv} . V mém případě stroj není opatřen chladícími radiálními kanály, a proto je výsledný Carterův činitel roven pouze činiteli respektující vliv drážkování.

Drážky na induktu jsou tvaru M a u nich platí: $b_o = b_d \Rightarrow 17 \text{ mm}$

Činitel respektující drážkování induktu:

$$\frac{b_o}{z_1} = \frac{1}{21,33} = 0,797 \quad \frac{b_o}{\delta} = \frac{17}{10,6} = 1,604$$

- tyto hodnoty jsem zanesl do nomogramu v příloze 8.6 \Rightarrow
 $k_c = k_{cd} = 1,115$

Magnetické napětí na vzduchové mezeře:

$$F_\delta = 0,8 \cdot k_c \cdot \delta \cdot B_\delta \cdot 10^6 = 0,8 \cdot 1,115 \cdot 0,0106 \cdot 0,88 \cdot 10^6 = 8320,58 \text{ A} \quad (1.88)$$

1.11.1 Magnetizační charakteristika zubové vrstvy

Pro co nejpřesnější výsledek je potřeba uvažovat vliv tzv. odlehčení, kdy se zvyšováním sycení se stále více toku dostává do drážky a tím indukce v zubu nenarůstá konstantně. [7]

Níže uváděné vzorce jsou označovány indexem i podle toho, na jaké úrovni induktu se zkoumají hodnoty $\rightarrow i = 1, 2, 3$

Z výše uvedeného vyplývá, že se budu zabývat o 3 úrovně průměru induktu :

$$\begin{aligned} D_{i=1} &= 4100 \text{ mm} \\ D_{i=2} &= D_1 + h_d = 4195 \text{ mm} \\ D_{i=3} &= D_1 + 2 \cdot h_d = 4290 \text{ mm} \end{aligned}$$

Upravím drážkové rozteče pro D_i :

$$t_{di} = \frac{\pi \cdot D_i}{Q} \text{ [mm]} \quad (1.89)$$

Upravím i šířky zubů dle D_i :

$$z_i = t_{di} - b_d \text{ [mm]} \quad (1.90)$$

Činitelé odlehčení zubů u jejich vrcholů:

$$k_{zi} = \frac{t_{di}}{z_i \cdot k_{Fe}} - 1 \text{ [-]} \quad (1.91)$$

Indukce zubů u jejich vrcholů bez odlehčení:

$$B'_{zi} = \frac{B_\delta \cdot t_{di}}{z_i \cdot k_{Fe}} \text{ [T]} \quad (1.92)$$

V tomto bodě se určí skutečná hodnota indukce v zubech B_{zi} pomocí nomogramu z přílohy 8.7. Po odečtení skutečné indukce v dané části zubu, je určena intenzita magnetického pole H_{zi} podle magnetizační charakteristiky dynamových plechů z přílohy 8.8. Po zjištění hodnot intenzity pole v jednotlivých úrovních zubů, byla vždy stanovena souhrnná intenzita pomocí vyváženého průměru [7]:

$$H_{zstř} = \frac{H_{z1} + 4 \cdot H_{z2} + H_{z3}}{6} \text{ [A/m]} \quad (1.93)$$

Jako střední délka siločár zde byla brána hloubka drážky, proto bylo magnetické napětí stanoveno podle vztahu [7]:

$$F_z = H_{zstř} \cdot h_d \text{ [A]} \quad (1.94)$$

1. ELEKTROMAGNETICKÝ NÁVRH

Výsledky jsou zahrnuty v následující tabulce 1.5 :

$D_1 = 4100$	$t_{d1} = 38,33$	$z_1 = 21,33$	$k_{z1} = 0,953$	Φ	$B'_{z1} = 1,719$	$B_{z1} = 1,71$	$H_{z1} = 6600$	$H_{zstř} = 4483, \bar{3}$	$F_z = 425,92$
$D_2 = 4195$	$t_{d2} = 39,22$	$z_2 = 22,22$	$k_{z2} = 0,919$		$B'_{z2} = 1,65$	$B_{z2} = 1,65$	$H_{z2} = 4400$		
$D_3 = 4290$	$t_{d3} = 40,11$	$z_3 = 23,11$	$k_{z3} = 0,887$		$B'_{z3} = 1,586$	$B_{z3} = 1,58$	$H_{z3} = 2700$		
				$1,15 \cdot \Phi$	$B'_{z1} = 1,977$	$B_{z1} = 1,935$	$H_{z1} = 20500$	$H_{zstř} = 15916, \bar{6}$	$F_z = 1512,08$
					$B'_{z2} = 1,898$	$B_{z2} = 1,87$	$H_{z2} = 15800$		
					$B'_{z3} = 1,824$	$B_{z3} = 1,81$	$H_{z3} = 11800$		
				$1,3 \cdot \Phi$	$B'_{z1} = 2,235$	$B_{z1} = 2,11$	$H_{z1} = 47000$	$H_{zstř} = 37916, \bar{6}$	$F_z = 3602,08$
					$B'_{z2} = 2,145$	$B_{z2} = 2,06$	$H_{z2} = 38000$		
					$B'_{z3} = 2,062$	$B_{z3} = 2,01$	$H_{z3} = 28500$		

Tabulka 1.5: Magnetizační charakteristika zubové vrstvy

1.11.2 Magnetizační charakteristika celého magnetického obvodu

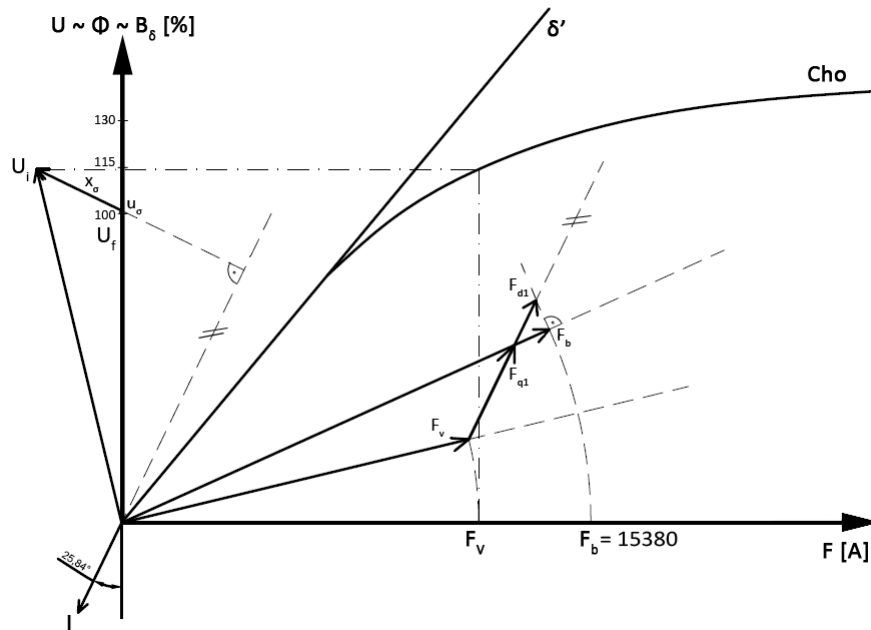
Podobně byla stanovena magnetická napětí pro zadané indukce i v ostatních částech magnetického obvodu. S tím rozdílem, že u součástí rotoru byla intenzita pole stanovena pomocí magnetizační charakteristiky pro konstrukční ocel z přílohy 8.9 oproti dynamovým plechům u statoru. Pro výpočet magnetického napětí, pak byly využity stanovené délky středních siločár. [7]

Výsledky výpočtů jsou zapsány v následující tabulce 1.6 :

		Φ			$1,15 \cdot \Phi$			$1,3 \cdot \Phi$		
		B	H	F	B	H	F	B	H	F
Vzduchová mezera	$\delta = 0,0106\text{ m}$	0,88		8320,58			9568,67			10816,75
Hlava zubu	$k_{z1} = 0,953$	B'_{z1} 1,719 B_{z1} 1,71	6600		1,977 1,935	20500		2,235 2,11	47000	
Střed zubu	$k_{z2} = 0,919$	B'_{z2} 1,65 B_{z2} 1,65	4400		1,898 1,87	15800		2,145 2,06	38000	
Patka zubu	$k_{z3} = 0,887$	B'_{z3} 1,586 B_{z3} 1,58	2700		1,824 1,81	11800		2,062 2,01	28500	
Střední hodnota zubu	$h_z = 0,095\text{ m}$		4483,33	425,92		15916,66	1512,08		37916,66	3602,08
Jádro induktu	$l_{js} = 0,1076\text{ m}$	1,3	630	67,79	1,495	1600	172,16	1,69	6000	645,6
$\Sigma F = F_\delta + F_z + F_{js}$		8814,29			11252,91			15064,43		
Pól	$l_p = 0,0805\text{ m}$	1,4	1600	128,8	1,61	4450	358,23	1,82	13150	1058,58
Jho rotoru	$l_{jr} = 0,0962\text{ m}$	1,1	600	57,72	1,265	950	91,39	1,43	1800	173,16
$\Sigma F = F_p + F_{jr}$		186,52			449,62			1231,74		
$\Sigma F = F_\delta + F_z + F_{js} + F_p + F_{jr}$		9000,81			11702,53			16296,17		

Tabulka 1.6: Magnetizační charakteristika celého obvodu

Pomocí tabulky 1.6 bylo možno sestrojít charakteristiku naprázdno, pomocí níž jsem graficky zjistil hodnotu potřebné velikosti magnetického budícího napětí, které činí $F_b = 15380 \text{ A}$. Charakteristika naprázdno je znázorněna na obrázku 1.5 :



Obrázek 1.5: Magnetizační charakteristika

1.12 Návrh budícího vinutí

Přesahující část pólového nástavce dle vzorce

$$a = \frac{b_n - b_p}{2} = \frac{0,151 - 0,0927}{2} = 29,15 \text{ mm} \quad (1.95)$$

ovšem nepodává vyhovující výsledek. Při použití $a \doteq 29 \text{ mm}$ bych dospěl k příliš velké výšce pólu, konkrétně by celková výška pólu včetně pólového nástavce činila $382,3 \text{ mm}$. Tato výška je ovšem nepřijatelná, proto jsem se rozhodl zvětšit přesahující část na $a = 44 \text{ mm}$, čímž docílím snížení pólu i za cenu snížení volného prostoru mezi póly a horší prostupnosti chladícího vzduchu.

Tloušťku kostičky volím:

$$t_k = 5 \text{ mm} \quad (1.96)$$

Střední délka závitů cívky:

$$l_{bs} = 2 \cdot (L_p + b_p + 2 \cdot a) = 2 \cdot (1,008 + 0,0927 + 2 \cdot 0,044) = 2,3774 \text{ m} \quad (1.97)$$

Předběžný průřez vodiče budící cívky:

$$S'_{Cub} = \frac{\rho_{Cu} \cdot l_{bs} \cdot 2p \cdot F_b}{0,9 \cdot U_b} = \frac{\frac{1}{56} \cdot 2,3774 \cdot 64 \cdot 15380}{0,9 \cdot 220} = 211,05 \text{ mm}^2 \quad (1.98)$$

příčemž zvolené $U_b = 220 \text{ V}$ je vyšší hodnoty z důvodu snahy o co nejmenší průřez cívky a tím i snížení pólu

Uvedený předběžný průřez jsem vyhodnotil a následně počítal pro různé varianty rozměru pásového vodiče, samozřejmě s ohledem na co nejmenší výslednou výšku pólu. Jako nejvhodnější se jeví následující rozměr vodiče:

$$h_v \times b_v = 5,5 \times 38,5 \text{ mm} \quad (1.99)$$

Tomu odpovídá již skutečný průřez vodiče:

$$S_{Cub} = 5,5 \cdot 38,5 = 211,75 \text{ mm}^2 \quad (1.100)$$

Proud procházející budícím vinutím:

$$I_b = \sigma_{Cub} \cdot S_{Cub} = 3,5 \cdot 211,75 = 741,13 \text{ A} \quad (1.101)$$

σ_{Cub} je zvolená proudová hustota ve vodiči (dle [5])

Počet závitů budící cívky:

$$N_b = \frac{F_b}{I_b} = \frac{15380}{741,13} = 20,75 \doteq 21 \text{ závitů} \quad (1.102)$$

Výška cívky:

$$h_c = N_b \cdot (h_v + t_i) = 21 \cdot (5,5 + 0,37) = 123,27 \doteq 123 \text{ mm} \quad (1.103)$$

kde t_i je zvolená oboustranná izolace vodiče (tabulka 8.1)

Výška těla pólu:

$$h_p = h_c + 2 \cdot t_k = 123 + 2 \cdot 5 = 133 \text{ mm} \quad (1.104)$$

1.12.1 Orientační výpočet oteplení budící cívky

Vnější obvod budící cívky:

$$l_{be} = 2 \cdot [L_p + b_p + 4 \cdot a] = 2 \cdot [1,008 + 0,0927 + 4 \cdot 0,044] = 2,553 \text{ m} \quad (1.105)$$

Ochlazovací povrch všech cívek:

$$O_{2pc} = h_c \cdot l_{be} \cdot 2p = 0,123 \cdot 2,553 \cdot 64 = 20,097 \text{ m}^2 \quad (1.106)$$

Odpor všech cívek budícího vinutí:

$$R_{b/75} = 1,22 \cdot \rho \cdot \frac{l_{bs} \cdot N_b \cdot 2p}{S_{Cub}} = 1,22 \cdot \frac{1}{56} \cdot \frac{2,3774 \cdot 21 \cdot 64}{211,75} = 0,3287 \Omega \quad (1.107)$$

Ztráty v budícím vinutí:

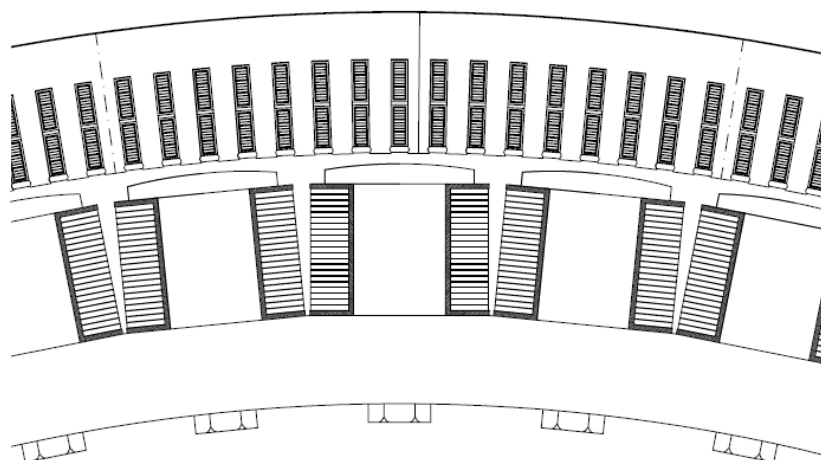
$$\Delta P_{Cub} = R_{b/75} \cdot I_b^2 = 0,3287 \cdot 741,13^2 = 180546,26 \text{ W} \quad (1.108)$$

Oteplení cívky:

$$\Delta \vartheta_{Cub} = \frac{1,18 \cdot \Delta P_{Cub}}{\alpha \cdot O_{2pc}} = \frac{1,18 \cdot 180546,26}{120 \cdot 20,097} = 88,34 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (1.109)$$

α označuje teplotní součinitel přestupu tepla, který se běžně určuje z grafu závisícího na rychlosti proudícího vzduchu (příloha 8.10), kde by se dosáhlo hodnot okolo $\alpha = 90 \text{ W}/^\circ\text{C} \cdot \text{m}^2$ - ovšem v mém případě vzhledem k celkové konstrukci stroje, jež je dobře chlazen okolní vodou, lze zvolit i vyšší, konkrétně $\alpha = 120 \text{ W}/^\circ\text{C} \cdot \text{m}^2$

Vypočtené hodnotě oteplení přísluší použití izolace třídy F, která dovoluje oteplení až 105°C (dle tabulky 8.4).



Obrázek 1.6: Částečný příčný řez strojem

Obrázek ukazuje, že pomyslná osa mezi póly není protnuta, návrh je tedy realizovatelný.

1.13 Návrh kroužků a kartáčů

Vhodné materiály a jejich vlastnosti pro výrobu jsou k nalezení v tabulce 8.3, ze které si vybírám kovografit MG 440 s následujícími vlastnostmi:

přechodové napětí $u_{př}$	0,5 V
maximální proudové zatížení σ_k	18 A/cm ²
maximální obvodová rychlost v_o	20 m/s
měrný tlak p_k	20 kPa
součinitel tření μ	0,15

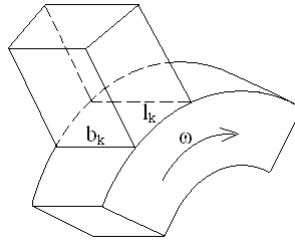
Tabulka 1.7: Materiálové vlastnosti kovografitu MG 440

Celkový průřez kartáčů jedné polaroty:

$$S_k = \frac{I_b}{\sigma_k} = \frac{673,75}{18} = 37,43 \text{ cm}^2 \quad (1.110)$$

Pomocí tabulky 8.2 volím rozměry kartáčů $b_k = 40 \text{ mm}$, $l_k = 20 \text{ mm}$, z čehož plyne průřez:

$$S_{k1} = 8 \text{ cm}^2 \quad (1.111)$$



Obrázek 1.7: Nákres dosedajícího kartáče na kroužek (zdroj:[5])

Počet kartáčů jedné polaroty na obvodu kroužku:

$$i_k = \frac{S_k}{S_{k1}} = \frac{37,43}{8} = 4,67 \doteq 5 \quad (1.112)$$

Počet kartáčů jedné polaroty je 5 a kartáčů obou polarit je tedy $2 \cdot i_k \rightarrow 2 \cdot 5 = 10$

Průměr volného konce hřídele:

$$d_H = 0,135 \cdot \sqrt[3]{\frac{P_{kW}}{n}} = 0,135 \cdot \sqrt[3]{\frac{9900}{93,75}} = 0,638 \text{ m} \quad (1.113)$$

Vnější průměr kroužků:

$$D_k = 1,3 \cdot d_H = 1,3 \cdot 0,638 = 0,829 \text{ m} \quad (1.114)$$

Obvodová rychlost kroužků:

$$v_k = \frac{\pi \cdot D_k \cdot n_{max}}{60} = \frac{\pi \cdot 0,829 \cdot 93,75 \cdot 1,5}{60} = 6,1 \text{ m/s} \quad (1.115)$$

→ z tohoto hlediska je návrh vyhovující, rychlost je menší než konstrukční maximální rychlost 20 m/s použitého kovografitu

Rozteč kartáčů:

$$t_k = \frac{\pi \cdot D_k}{2 \cdot i_k} = \frac{\pi \cdot 0,829}{10} = 0,260 \text{ m} \quad (1.116)$$

→ i po této stránce je návrh vyhovující, rozteč kartáčů je výrazně vyšší než je délka jednoho kartáče l_k

1.14 Ztráty a účinnost

Jouelovy ztráty:

ve vinutí statoru:

$$\Delta P_{Cu1} = m \cdot R_{1/75} \cdot I_1^2 = 3 \cdot 0,0135 \cdot 1814,53^2 = 133347,02 \text{ W} \quad (1.117)$$

v budícím vinutí:

$$\Delta P_{Cub} = 180546,26 \text{ W} \quad (1.118)$$

Ztráty v jádře induktu:

$$\text{ztrátové číslo plechů} \quad \Delta p_{Fe} = 1,8 \text{ W/kg}$$

hmotnost jádra statoru:

$$\begin{aligned} m_{Fej} &= \frac{\pi}{4} \cdot (D_{je}^2 - D_3^2) \cdot l_e \cdot k_{Fe} \cdot \rho_{Fe} = \\ &= \frac{\pi}{4} \cdot (4,384^2 - 4,29^2) \cdot 1,008 \cdot 0,92 \cdot 7800 = 4632,1 \text{ kg} \end{aligned} \quad (1.119)$$

kde

$$D_{je} = D_1 + 2 \cdot (h_d + h_{js}) = 4,1 + 2 \cdot (0,095 + 0,0472) = 4,384 \text{ m} \quad (1.120)$$

ztráty v jádře:

$$\begin{aligned} \Delta P_{Fej} &= 1,8 \cdot \Delta p_{Fe} \cdot B_{js}^2 \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} \cdot m_{Fej} = \\ &= 1,8 \cdot 1,8 \cdot 1,3^2 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1,3} \cdot 4632,1 = 25363,53 \text{ W} \end{aligned} \quad (1.121)$$

Ztráty v zubech induktu:

hmotnost zubů:

$$\begin{aligned} m_{Fesz} &= Q \cdot z_2 \cdot h_d \cdot l_e \cdot k_{Fe} \cdot \rho_{Fe} = \\ &= 336 \cdot 0,02222 \cdot 0,095 \cdot 1,008 \cdot 0,92 \cdot 7800 = 5130,38 \text{ kg} \end{aligned} \quad (1.122)$$

ztráty v zubech:

$$\begin{aligned} \Delta P_{Fesz} &= 2 \cdot \Delta p_{Fe} \cdot B_{z2}^2 \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} \cdot m_{Fesz} = \\ &= 2 \cdot 1,8 \cdot 1,65^2 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1,3} \cdot 5130,38 = 50282,85 \text{ W} \end{aligned} \quad (1.123)$$

Povrchové:

$$\begin{aligned}\Delta P_p &= \frac{\pi}{2} \cdot D_1 \cdot \alpha \cdot L_p \cdot k_o \cdot \left(\frac{Q \cdot n}{10000}\right)^{1,5} \cdot (t_{d1} \cdot \beta \cdot 1000 \cdot B_\delta \cdot k_c)^2 = \\ \frac{\pi}{2} \cdot 4,1 \cdot 0,75 \cdot 1,008 \cdot 4,5 \cdot \left(\frac{336 \cdot 93,75}{10000}\right)^{1,5} \cdot (0,03833 \cdot 0,115 \cdot 1000 \cdot 0,88 \cdot 1,115)^2 \\ &= 2291,35 \text{ W} \quad (1.124)\end{aligned}$$

kde

k_c je Carterův činitel

k_o, β jsou činitelé povrchových ztrát určené z diagramu 8.11

$k_o = 4,5$

$\beta = 0,115$

Mechanické:

$$\Delta P_m = v^{2,5} \cdot D_1 \cdot \sqrt{l_e} = 20,13^{2,5} \cdot 4,1 \cdot \sqrt{1,008} = 7483,82 \text{ W} \quad (1.125)$$

kde v je obvodová rotorová rychlost

$$v = \frac{\pi \cdot D_1 \cdot n}{60} = \frac{\pi \cdot 4,1 \cdot 93,75}{60} = 20,13 \text{ m/s} \quad (1.126)$$

Přídavné:

$$\Delta P_{přid} = 0,003 \cdot S = 0,003 \cdot 11 \cdot 10^6 = 33000 \text{ W} \quad (1.127)$$

Celkové ztráty:

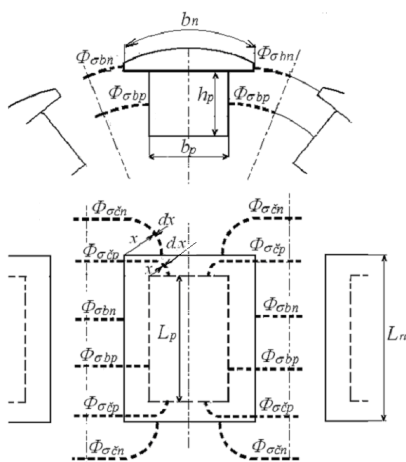
$$\begin{aligned}\Delta P &= \Delta P_{Cu1} + \Delta P_{Cu2} + \Delta P_{Fej} + \Delta P_{Fez} + \Delta P_p + \Delta P_m + \Delta P_{přid} = \\ 133347,02 + 180546,26 + 25363,53 + 50282,85 + 2291,35 + 7483,82 + 33000 &= \\ &= 432314,83 \text{ W} \quad (1.128)\end{aligned}$$

Celková účinnost:

$$\eta = 100 \cdot \left(1 - \frac{P}{P + \Delta P}\right) = 100 \cdot \left(1 - \frac{9900}{9900 + 432,31483}\right) = 95,82 \% \quad (1.129)$$

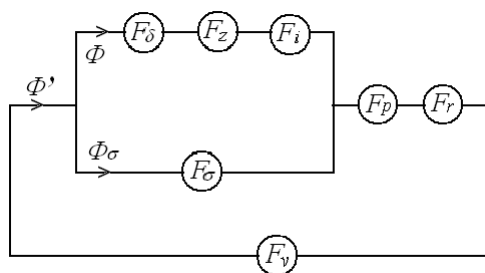
2 Mezipólový rozptyl

Nejprve je nutné ujasnit, o co se vlastně jedná. Kromě hlavního toku Φ podílející se na indukování napětí, který prochází z pólu přes vzduchovou mezeru do zubu statoru, vyskytuje se ovšem i tzv. tok rozptylový Φ_σ , uzavírající se mezi čely a boky pólů, včetně jejich nástavců. Rozptyl zvětšuje nasycení rotoru a tím i potřebnou magnetomotorickou sílu obvodu. Nezpůsobuje však vířivé ztráty, protože se tok nemění. [5][6]



Obrázek 2.1: Popis jednotlivých složek rozptylového toku (zdroj:[5])

Na obr.2.2 je znázornění uspořádání magnetického toku synchronního stroje, kde F_p a F_r jsou úbytky magnetického napětí na pólu a jhu rotoru, kudy protéká celkový magnetický tok Φ' .



Obrázek 2.2: Náhradní schéma magnetického toku synchronního stroje (zdroj:[5])

2. MEZIPÓLOVÝ ROZPTYL

Jak vyplývá z obrázku 2.2, rozptylový tok prochází paralelně s hlavním magnetickým tokem uzavírajícím se přes vzduchovou mezeru, zuby a jádrem induktu. Z tohoto schématu vyplývají vztahy:

$$\Phi' = \Phi + \Phi_{\sigma} = (1 + \nu) \cdot \Phi$$

kde $\Phi_{\sigma} = F_{\sigma} \cdot \Lambda_{\sigma}$

když magnetické napětí na rozptylové vodivosti $F_{\sigma} = F_{\delta} + F_z + F_{js}$

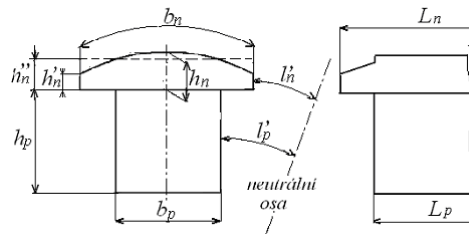
a činitel rozptylu $\nu = \frac{\Phi_{\sigma}}{\Phi}$

Nyní zbývá určit magnetickou vodivost mezipólového prostoru. Podle obr.2.1 indexu u jednotlivých rozptylových toků, „č“ odpovídá čelům a „b“ bokům pólu. Celková rozptylová magnetická vodivost je dána součtem dílčích vodivostí:

$$\Lambda_{\sigma} = 2\Lambda_{\sigma bn} + 2\Lambda_{\sigma bp} + 4\Lambda_{\sigma čn} + 4\Lambda_{\sigma čp} \quad (2.1)$$

2.1 Analytická metoda

Během řešení se využívají rozměrová označení, která se v předchozích početních úkonech nepoužívaly, a proto přikládám názorný obrázek:



Obrázek 2.3: Rozměry mezipólového prostoru (zdroj:[5])

l'_p vzdálenost od neutrální osy k boku pólu měřené na jeho střední výšce

l'_n vzdálenost od neutrální osy k okraji pólového nástavce

h'_n výška okraje pólového nástavce

h''_n střední výška pólového nástavce, která je rovna výšce obdélníka o stejné šířce a ploše pólového nástavce

Výše uvedené rozměry jsem určil pomocí grafického odečtení z nákresu mezipólového prostoru, který je uveden v příloze 8.12.

Určené rozměry:

$$\begin{aligned} h_n &= 20,1 \text{ mm} \\ h'_n &= 14,1 \text{ mm} \\ h''_n &= 18,02 \text{ mm} \\ l'_n &= 24,02 \text{ mm} \\ l''_n &= 49,53 \text{ mm} \\ a' &= 29,15 \text{ mm} \end{aligned}$$

Další potřebné hodnoty:

$$\begin{aligned} L_p &= 1,008 \text{ m} \\ L_n &= L_p + a' = 1,008 + 0,02915 \doteq 1,0372 \text{ m} \\ b_p &= 92,7 \text{ mm} \\ b_n &= 151 \text{ mm} \\ h_p &= 133 \text{ mm} \end{aligned}$$

Rozptylová vodivost mezi boky pólových nástavců:

$$\Lambda_{\sigma bn} = \mu_o \cdot \frac{h'_n \cdot L_n}{l'_n} = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{0,0141 \cdot 1,0372}{0,02402} = 7,594 \cdot 10^{-7} \text{ S} \quad (2.2)$$

Rozptylová vodivost mezi boky pólů:

$$\Lambda_{\sigma bp} = \frac{1}{2} \cdot \mu_o \cdot \frac{h_p \cdot L_p}{l'_p} = \frac{1}{2} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{0,133 \cdot 1,008}{0,04953} = 1,7 \cdot 10^{-6} \text{ S} \quad (2.3)$$

Rozptylová vodivost mezi čely pólových nástavců:

$$\begin{aligned} \Lambda_{\sigma \check{c}n} &= \mu_o \cdot \frac{2}{\pi} \cdot h''_n \cdot \ln\left(\frac{\pi \cdot \frac{b_n}{4} + l''_n}{l''_n}\right) = \\ &= 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{2}{\pi} \cdot 0,01802 \cdot \ln\left(\frac{\pi \cdot \frac{0,151}{4} + 0,02402}{0,02402}\right) = 2,5679 \cdot 10^{-8} \text{ S} \end{aligned} \quad (2.4)$$

Rozptylová vodivost mezi čely pólů:

$$\begin{aligned} \Lambda_{\sigma \check{c}p} &= \frac{\mu_o}{\pi} \cdot h_p \cdot \ln\left(\frac{\pi \cdot \frac{b_p}{4} + l'_p}{l'_p}\right) = \\ &= \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{\pi} \cdot 0,133 \cdot \ln\left(\frac{\pi \cdot \frac{0,0927}{4} + 0,04953}{0,04953}\right) = 4,81 \cdot 10^{-8} \text{ S} \end{aligned} \quad (2.5)$$

Výsledná magnetická vodivost rozptylového toku:

$$\begin{aligned}\Lambda_{\sigma} &= 2 \cdot \Lambda_{\sigma bn} + 2 \cdot \Lambda_{\sigma bp} + 4 \cdot \Lambda_{\sigma \check{c}n} + 4 \cdot \Lambda_{\sigma \check{c}p} = \\ &= 2 \cdot 7,594 \cdot 10^{-7} + 2 \cdot 1,7 \cdot 10^{-6} + 4 \cdot 2,5679 \cdot 10^{-8} + 4 \cdot 4,81 \cdot 10^{-8} = \\ &= 5,2139 \cdot 10^{-6} S \quad (2.6)\end{aligned}$$

Magnetické napětí na rozptylové vodivosti:

$$F_{\sigma} = F_{\delta} + F_z + F_{js} = 8320,58 + 425,92 + 67,79 = 8814,29 A \quad (2.7)$$

Rozptylový magnetický tok:

$$\Phi_{\sigma} = F_{\sigma} \cdot \Lambda_{\sigma} = 8814,29 \cdot 5,2139 \cdot 10^{-6} = 0,045957 Wb \quad (2.8)$$

Činitel rozptylu:

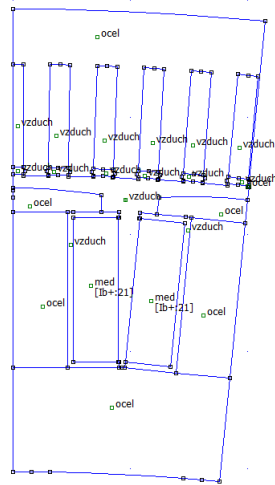
$$\nu = \frac{\Phi_{\sigma}}{\Phi} = \frac{0,045957}{0,1137} = 0,4042 \Rightarrow 40,42\% \quad (2.9)$$

2.2 Metoda konečných prvků

Pro metodu konečných prvků se používá výpočetních programů. Já se rozhodl pro program FEMM, který je bezplatně ke stažení z internetu a plně dostatečný pro mé potřeby. Samotný výpočet předchází vytvoření mezipólového prostoru s danými rozměry, pro jehož vytvoření jsem použil program AutoCAD. Výstupem z něj mi pak byl .dxf soubor, který se následně naimportoval do FEMM. Po načtení geometrie, jsem si definoval okrajovou podmínku pro nulový magnetický potenciál po celém jejím obvodu. Dále jsem nastavil materiály. Ty byly zvoleny 3 - měď na vinutí cívky, ocel pro těla pólů, jho rotoru i statoru a vzduch. Mědi jsem přiřadil elektrickou vodivost $\sigma = 57 S/m$. Typ oceli je uvažován M350-50A-1 a samozřejmě je materiálu přiřazena patřičná B-H závislost (příloha 8.5) včetně toho, aby se jednalo o plech s tloušťkou 0,5 mm.

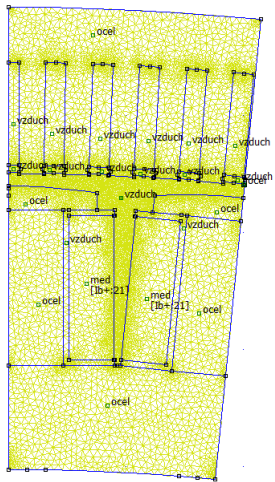
Nastavený budicí proud naprázdno procházející cívkou:

$$I_{bo} = \frac{F_v}{F_b} \cdot I_b = \frac{11580}{15380} \cdot 741,13 = 558,01 A$$



Obrázek 2.4: Geometrie s přiřazenými materiály

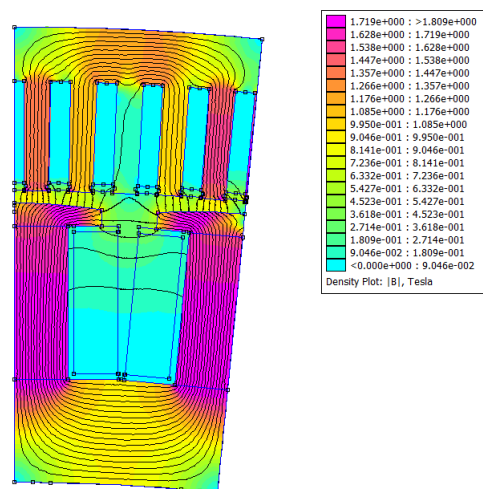
V tuto chvíli již můžu problém diskretizovat tj. vytvořit síť - „nameshovat“.



Obrázek 2.5: Nameshovaná geometrie

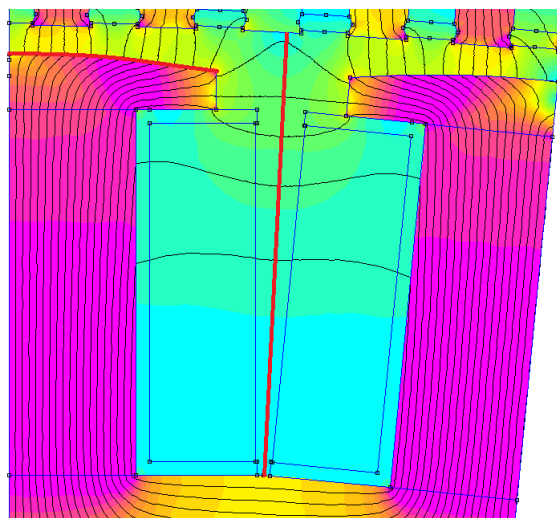
V dalším kroku se problém analyzuje a provádějí se potřebné iterace do doby konvergování k řešení.

2. MEZIPÓLOVÝ ROZPTYL



Obrázek 2.6: Vypočtená geometrie se znázorněnými siločarami a indukcí

Nyní již zbývá odečíst z analýzy hodnoty hlavního magnetického toku a toku rozptylového. To se provede zintegrováním červeně zvýrazněných cest na níže uvedeném obrázku.



Obrázek 2.7: Cesty pro odečet magnetických toků

Zjištěný hlavní magnetický tok: $\Phi = 0,060993 \text{ Wb}$

Zjištěný rozptylový mag. tok: $\Phi_{\sigma} = 0,022763 \text{ Wb}$

Činitel rozptylu:

$$\nu = \frac{\Phi_{\sigma}}{\Phi} = \frac{0,0229042}{0,0616056} = 0,37178 \Rightarrow 37,18\% \quad (2.10)$$

2.3 Analytická verze upravená pro potřeby porovnání s MKP

Rovnice pro celkovou magnetickou rozptylovou vodivost 2.1 je pro mé potřeby nevhodná, neboť chci porovnat přesnost analytické metody s metodou konečných prvků. Nutností je, rovnici pro celkovou magnetickou vodivost upravit, aby výsledky byly co nejvěrnější a mohly tak mezi sebou korespondovat. Protože předloha pro MKP je kreslena v rámci zjednodušení rovinnými souřadnicemi, nebudou se moci zohledňovat čela pólů i pólových nástavců. Řešením je rovnici jednoduše zbavit magnetických rozptylových vodivostí týkajících se čel. Výslednou hodnotu Λ_{σ} to až tak příliš nezmění, vodivosti mezi čely jsou téměř o dva řády menší, ovšem zpřesní to výsledek pro porovnání s MKP. Upravená rovnice vypadá takto:

$$\Lambda_{\sigma} = 2\Lambda_{\sigma bn} + 2\Lambda_{\sigma bp}$$

Potřebné rozptylové vodivosti byly již vyjádřené v rovnicích 2.2 a 2.3. Stačí proto pouze dosadit:

$$\Lambda_{\sigma} = 2 \cdot \Lambda_{\sigma bn} + 2 \cdot \Lambda_{\sigma bp} = 2 \cdot 7,594 \cdot 10^{-7} + 2 \cdot 1,7 \cdot 10^{-6} = 4,9188 \cdot 10^{-6} S \quad (2.11)$$

Magnetické napětí na rozptylové vodivosti zůstává stejné, přepočtený rozptylový magnetický tok nyní vychází:

$$\Phi_{\sigma} = F_{\sigma} \cdot \Lambda_{\sigma} = 8814,29 \cdot 4,9188 \cdot 10^{-6} = 0,043356 \quad (2.12)$$

Upravený činitel rozptylu:

$$\nu = \frac{\Phi_{\sigma}}{\Phi} = \frac{0,043356}{0,1137} = 0,3813 \Rightarrow 38,13\% \quad (2.13)$$

2.4 Porovnání výsledků

Lze prohlásit, že i přes rozdílné přístupy k zjištění rozptylu, jsem se dobral k relevantním výsledkům. Celkový rozptylový tok činí 40,42 % z toku hlavního. Metoda konečných prvků a upravená rovnice magnetických vodivostí rozptylového toku byly provedeny správně, jelikož odchylka obou hodnot činí pouhých 1,03 %. Upravení rovnice z analytické metody opravdu potvrdila, že

2. MEZIPÓLOVÝ ROZPTYL

by neměla mít na výsledek velký vliv, hodnoty analytických řešení jsou mezi sebou odchýleny o 2,29 %. Bohužel se prokázal vysoký mezipólový rozptyl daný výškou samotného pólu, ale i polohou vůči pólu sousednímu.

3 Tepelný výpočet

Negativním důsledkem elektromechanické přeměny je také přeměna části energie v teplo. Nadměrné zvýšení teploty vede ke snížení elektrické a mechanické pevnosti izolace. Účelem tepelných výpočtů je zjistit střední, resp. i maximální oteplení vybraných částí stroje nad teplotu chladiva, vstupujícího do stroje. Nejvíce nás zajímají ty části, které jsou v bezprostředním styku s izolací. Toto oteplení nesmí přesáhnout hodnotu, která odpovídá tepelné odolnosti použité izolace (tabulka 8.4). Podle tepelné odolnosti jsou izolační materiály zařazeny do jednotlivých tříd, jak je v tabulce uvedeno. V tabulce je uvedena maximální teplota a oteplení pro jednotlivé druhy izolací. V případě jejího překročení je třeba upravit ventilační systém nebo snížit ztráty v příslušné částí, to ovšem vede k menšímu využití stroje a znamená to např. větší rozměry, hmotnost a tedy zpravidla i vyšší cenu. [5, 8]

Teplota je stav daného místa nebo objektu, který lze zjistit pomocí nějakého čidla, jako je dotykový teploměr, termočlánek, termistor, apod. [5]

Oteplení je rozdíl teplot, nejčastěji se tím rozumí teplota nad teplotou okolí. ČSN předepisuje tuto teplotu 40°C . Teplota vinutí se ve většině případů zjišťuje z přírůstku elektrického odporu, tím se určí střední hodnota teploty vodičů, která se může lišit od maximální, resp. minimální teploty o $5 \div 10^{\circ}\text{C}$. Získaná hodnota oteplení $\Delta\vartheta$ je pak porovnána s hodnotami z tabulky 8.4 a určí se tak případná kategorie izolace. V elektrických strojích určené převážně pro trvalý chod, se počítá ustálené oteplení, které je spočítáno z odporové metody. [5, 8]

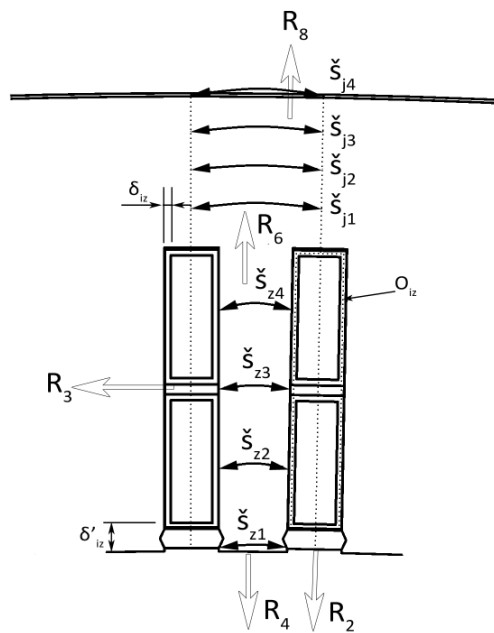
Teplo se bude šířit dvěma způsoby:

Vedením - uplatní se uvnitř látky a je charakterizováno její měrnou tepelnou vodivostí λ [$\text{W}/^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}$]. Jedná se o fyzikální vlastnost látky, která je uvedena ve fyzikálních tabulkách.

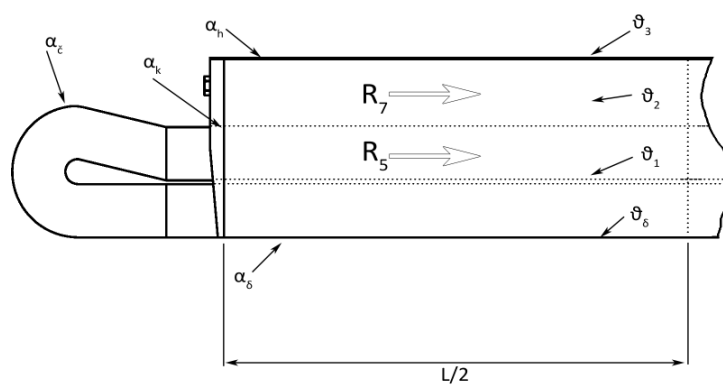
Přestupem tepla - teplo se šíří z povrchu ochlazovaného tělesa do okolního, zpravidla proudícího prostředí. Charakterizuje jej součinitel přestupu tepla α [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$]. Součinitel přestupu tepla není vlastností látky a není proto uváděná v žádných tabulkách. Je závislý na fyzikálních vlastnostech ochlazovacího prostředí, jeho rychlosti, charakteru proudění, tlaku a i na kvalitě povrchu ochlazovaného tělesa. [5, 8]

3.1 Oteplení induktu

Pro určení oteplení na induktu je nutné i definovat nové rozměry, se kterými se bude počítat. Ty jsou pro názornost zobrazeny na následujících obrázcích, včetně naznačení směru toku tepelných odporů.



Obrázek 3.1: Vymezený úsek induktu v příčném směru



Obrázek 3.2: Vymezený úsek induktu v podélném směru

3.1.1 Určení ztrát

Určení rozměru úseku oteplení:

$$l_v = l_{\bar{c}} + L = 0,4064 + 1,008 = 1,4144 \text{ m} \quad (3.1)$$

Ztráty v mědi drážkové části:

$$\Delta P_{Cud} = \Delta P_{Cu1} \cdot \frac{l}{l_v} = 133347,02 \cdot \frac{1,008}{1,4144} = 95032,38 \text{ W} \quad (3.2)$$

Ztráty v jedné drážce vinutí:

$$\Delta P_{Cud1} = \frac{\Delta P_{Cud} + \Delta P_{příd}}{2 \cdot Q} = \frac{95032,38 + 33000}{2 \cdot 336} \doteq 190,53 \text{ W} \quad (3.3)$$

Ztráty v jednom zubu:

$$\Delta P_{Fez1} = \frac{\Delta P_{Fez}}{2 \cdot Q} = \frac{50282,85}{2 \cdot 336} = 74,83 \text{ W} \quad (3.4)$$

Ztráty ve jhu induktu mezi 2 zuby:

$$\Delta P_{Fej1} = \frac{\Delta P_{Fej}}{2 \cdot Q} = \frac{25363,53}{2 \cdot 336} = 37,74 \text{ W} \quad (3.5)$$

3.1.2 Drážkové rozteče v daných hladinách

Při určení drážkových roztečí vycházím z obrázku 3.1.

Rozteče v oblasti zubu:

$$\check{s}_{z1} = \frac{\pi \cdot D_1}{Q} - b_d = \frac{\pi \cdot 4,1}{336} - 0,017 = 21,33 \text{ mm} \quad (3.6)$$

$$\check{s}_{z2} = \frac{\pi \cdot (D_1 + \frac{1}{4} \cdot h_d)}{Q} - b_d = \frac{\pi \cdot (4,1 + \frac{1}{4} \cdot 0,095)}{336} - 0,017 = 21,56 \text{ mm} \quad (3.7)$$

$$\check{s}_{z3} = \frac{\pi \cdot (D_1 + \frac{1}{2} \cdot h_d)}{Q} - b_d = \frac{\pi \cdot (4,1 + \frac{1}{2} \cdot 0,095)}{336} - 0,017 = 21,78 \text{ mm} \quad (3.8)$$

$$\check{s}_{z4} = \frac{\pi \cdot (D_1 + \frac{3}{4} \cdot h_d)}{Q} - b_d = \frac{\pi \cdot (4,1 + \frac{3}{4} \cdot 0,095)}{336} - 0,017 = 22 \text{ mm} \quad (3.9)$$

Rozteče ve jhu induktu:

$$\check{s}_{j1} = \frac{\pi \cdot (D_1 + h_d + \frac{1}{4} \cdot h_{js})}{Q} = \frac{\pi \cdot (4,1 + 0,095 + \frac{1}{4} \cdot 0,0472)}{336} = 39,33 \text{ mm} \quad (3.10)$$

3. TEPELNÝ VÝPOČET

$$\check{s}_{j2} = \frac{\pi \cdot (D_1 + h_d + \frac{1}{2} \cdot h_{js})}{Q} = \frac{\pi \cdot (4,1 + 0,095 + \frac{1}{2} \cdot 0,0472)}{336} = 39,44 \text{ mm} \quad (3.11)$$

$$\check{s}_{j3} = \frac{\pi \cdot (D_1 + h_d + \frac{3}{4} \cdot h_{js})}{Q} = \frac{\pi \cdot (4,1 + 0,095 + \frac{3}{4} \cdot 0,0472)}{336} = 39,55 \text{ mm} \quad (3.12)$$

$$\check{s}_{j4} = \frac{\pi \cdot (D_1 + h_d + h_{js})}{Q} = \frac{\pi \cdot (4,1 + 0,095 + 0,0472)}{336} = 39,66 \text{ mm} \quad (3.13)$$

Šířka izolace mezi vodičem a stěnou drážky:

$$\delta_{iz} = \frac{b_d - b_v}{2} = \frac{17 - 11}{2} = 3 \text{ mm} \quad (3.14)$$

Šířka vzduchové mezery v dané izolaci:

$$\delta_{vzd} = 0,1 \text{ mm} = 0,0001 \text{ m}$$

Šířka izolace mezi vzduchovou mezerou a vodičem:

$$\delta'_{iz} = 9,1 \text{ mm} = 0,0091 \text{ m}$$

Obvod izolace v drážce:

$$O_{iz} = 2 \cdot h_2 + b_d = 2 \cdot 0,088 + 0,017 = 0,193 \text{ m} \quad (3.15)$$

3.1.3 Měrné tepelné vodivosti λ

Suchý vzduch při 40 °C	$\lambda_{vzd} = 0,0262 \frac{W}{K \cdot m}$
Izolace třídy F - mikanit	$\lambda_{iz} = 0,3 \frac{W}{K \cdot m}$
Plechový svazek v příčném směru	$\lambda_{Feq} = 1 \frac{W}{K \cdot m}$
Plechový svazek v podélném směru	$\lambda_{Fed} = 50 \frac{W}{K \cdot m}$
Izolace čel	$\lambda_c = 0,16 \frac{W}{K \cdot m}$
Vrstvička mezi kostrou a svazkem	$\lambda_v = 0,5 \frac{W}{K \cdot m}$

Tabulka 3.1: Použité měrné tepelné vodivosti (zdroj:[5])

3.1.4 Součinitel přestupu tepla α

Ve vzduchové mezeře	$\alpha_\delta = 110 \frac{W}{m^2 \cdot K}$
Hřbet statorového svazku	$\alpha_h = 50 \frac{W}{m^2 \cdot K}$
Čela vinutí	$\alpha_\delta = 90 \frac{W}{m^2 \cdot K}$
Na konci svazku	$\alpha_\delta = 40 \frac{W}{m^2 \cdot K}$

Tabulka 3.2: Použití součinitel přestupu tepla (zdroj:[5])

3.1.5 Výpočet tepelných odporů

Pokud bych chtěl počítat oteplení standartní cestou, musel bych řešit parciální diferenciální rovnice druhého řádu, navíc v prostředí, které je nehomogenní a anizotropní, což je bez použití výpočetní techniky prakticky neřešitelné. Existuje ovšem metoda náhradních tepelných odporů, využívající analogii jako při řešení elektrických obvodů se soustředěnými parametry, kde se mohou uplatnit Kirchhoffovy zákony i zákon Ohmův. Použití náhradních tepelných obvodů umožňuje určovat střední teploty částí elektrického stroje, které se chápou jako homogenní tělesa. Je přirozené, že čím více je prvků ve schématu obvodu (charakterizující jednotlivé části stroje), tím přesnější výpočet bude, ale za cenu větší složitosti při výpočtu. [5, 8]

Odpor z vinutí do vzduchové mezery:

$$R_2 = \frac{\delta'_{iz}}{\lambda_{iz} \cdot b_d \cdot \frac{L}{2}} + \frac{\delta'_{vzd}}{\lambda_{vzd} \cdot b_d \cdot \frac{L}{2}} + \frac{1}{\alpha_\delta \cdot b_d \cdot \frac{L}{2}} =$$

$$\frac{0,0091}{0,3 \cdot 0,017 \cdot \frac{1,008}{2}} + \frac{0,0001}{0,0262 \cdot 0,017 \cdot \frac{1,008}{2}} + \frac{1}{110 \cdot 0,017 \cdot \frac{1,008}{2}} = 5,046 \frac{^\circ C}{W} \quad (3.16)$$

Odpor z vinutí do zubové vrstvy:

$$R_3 = \frac{\delta_{iz}}{\lambda_{iz} \cdot O_{iz} \cdot \frac{L}{2}} + \frac{\delta_{vzd}}{\lambda_{vzd} \cdot O_{iz} \cdot \frac{L}{2}} + \frac{\frac{\check{s}_{z3}}{2}}{3 \cdot \lambda_{Fed} \cdot O_{iz} \cdot \frac{L}{2}} =$$

$$\frac{0,003}{0,3 \cdot 0,193 \cdot \frac{1,008}{2}} + \frac{0,0001}{0,0262 \cdot 0,193 \cdot \frac{1,008}{2}} + \frac{\frac{0,02178}{2}}{3 \cdot 50 \cdot 0,193 \cdot \frac{1,008}{2}} = 0,1427 \frac{^\circ C}{W} \quad (3.17)$$

Odpor ze zubu do vzduchové mezery:

$$R_4 = \frac{\frac{h_d}{2}}{3 \cdot \lambda_{Fed} \cdot \check{s}_{z2} \cdot \frac{L}{2}} + \frac{1}{\alpha_\delta \cdot \check{s}_{z1} \cdot \frac{L}{2}} =$$

$$\frac{\frac{0,095}{2}}{3 \cdot 50 \cdot 0,02156 \cdot \frac{1,008}{2}} + \frac{1}{110 \cdot 0,02133 \cdot 0,504} = 0,875 \frac{^\circ C}{W} \quad (3.18)$$

Odpor ze zubu do svazku:

$$R_5 = \frac{\frac{L}{2}}{3 \cdot \lambda_{Feq} \cdot \check{s}_{z3} \cdot h_d} + \frac{1}{\alpha_k \cdot \check{s}_{z3} \cdot h_d} =$$

$$\frac{\frac{1,008}{2}}{3 \cdot 1 \cdot 0,02178 \cdot 0,095} + \frac{1}{40 \cdot 0,02178 \cdot 0,095} = 93,277 \frac{^\circ C}{W} \quad (3.19)$$

3. TEPELNÝ VÝPOČET

Odpor z plechů zuby do plechů jha:

$$R_6 = \frac{\frac{h_d}{2}}{3 \cdot \lambda_{Fed} \cdot \check{s}_{z4} \cdot \frac{L}{2}} + \frac{\frac{h_{js}}{2}}{3 \cdot \lambda_{Fed} \cdot \check{s}_{j1} \cdot \frac{L}{2}} = \frac{\frac{0,095}{2}}{3 \cdot 50 \cdot 0,022 \cdot \frac{1,008}{2}} + \frac{\frac{0,0472}{2}}{3 \cdot 50 \cdot 0,03933 \cdot \frac{1,008}{2}} = 0,0365 \frac{^\circ C}{W} \quad (3.20)$$

Odpor z plechů jádra do svazku:

$$R_7 = \frac{\frac{L}{2}}{3 \cdot \lambda_{Fed} \cdot \check{s}_{j2} \cdot h_{js}} + \frac{1}{\alpha_k \cdot \check{s}_{j2} \cdot h_{js}} = \frac{\frac{1,008}{2}}{3 \cdot 1 \cdot 0,03944 \cdot 0,0472} + \frac{1}{40 \cdot 0,03944 \cdot 0,0472} = 103,676 \frac{^\circ C}{W} \quad (3.21)$$

Odpor ze hřbetu do okolí:

mezi kostru a svazek je vložena 1 mm vodivé vrstvičky →
 $l = 0,001 \text{ mm}$

$$R_8 = \frac{\frac{h_{js}}{2}}{3 \cdot \lambda_{Fed} \cdot \check{s}_{j3} \cdot \frac{L}{2}} + \frac{l}{\lambda_v \cdot \check{s}_{j4} \cdot \frac{L}{2}} = \frac{\frac{0,0472}{2}}{3 \cdot 50 \cdot 0,03955 \cdot \frac{1,008}{2}} + \frac{0,001}{0,5 \cdot 0,03966 \cdot \frac{1,008}{2}} = 0,1079 \frac{^\circ C}{W} \quad (3.22)$$

3.1.6 Výpočet oteplení chladiva na statoru

Teplota okolí $\Delta\vartheta$ byla zvolena 20 °C.

Průtočné množství chladiva celkem:

$$Q_c = \frac{\Delta P - \Delta P_m}{c_v \cdot \Delta\vartheta} = \frac{432314,83 - 7483,82}{1250 \cdot 20} = 16,99 \text{ m}^3/\text{s} \quad (3.23)$$

přičemž c_v je objemové měrné teplo vzduchu a dle [5] se rovná hodnotě $1250 \text{ W} \cdot \text{s}/^\circ\text{C} \cdot \text{m}^3$

Množství chladiva přes čela:

$$Q_{\check{c}} = \frac{1}{3} \cdot Q_c = \frac{1}{3} \cdot 16,99 = 5,66 \text{ m}^3/\text{s} \quad (3.24)$$

Množství chladiva přes vzduchovou mezeru a póly:

$$Q_{\delta} = \frac{2}{3} \cdot Q_c = \frac{2}{3} \cdot 16,99 = 11,33 \text{ m}^3/\text{s} \quad (3.25)$$

Pro oteplení na rotoru si určím příslušné ztráty:

$$\Delta P_{rot} = \Delta P_{Cub} + \Delta P_p = 180546,26 + 2291,35 = 182837,61 \text{ W} \quad (3.26)$$

Teplotu vstupujícího média uvažuji:

$$\vartheta_{vst} = 40 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (3.27)$$

Oteplení ve vzduchové mezeře:

$$\vartheta_{\delta} = \vartheta_{vst} + \frac{\Delta P_{rot}}{c_v \cdot Q_{\delta}} = 40 + \frac{182837,61}{1250 \cdot 11,33} = 52,91 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (3.28)$$

Oteplení od zubů:

$$\vartheta_1 = \vartheta_{\delta} + \frac{\Delta P_{Fez} + \Delta P_{Cud}}{2 \cdot c_v \cdot Q_{\delta}} = 52,91 + \frac{50282,85 + 95032,38}{2 \cdot 1250 \cdot 11,33} = 58,04 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (3.29)$$

Oteplení v okolí jádra induktu:

$$\begin{aligned} \vartheta_2 = \vartheta_{\delta} + \frac{\Delta P_{Fez} + \Delta P_{Cud} + \frac{1}{2} \cdot \Delta P_{Fej}}{c_v \cdot Q_{\delta}} = \\ 52,91 + \frac{50282,85 + 95032,38 + \frac{1}{2} \cdot 25363,53}{1250 \cdot 11,33} = 64,07 \text{ }^{\circ}\text{C} \end{aligned} \quad (3.30)$$

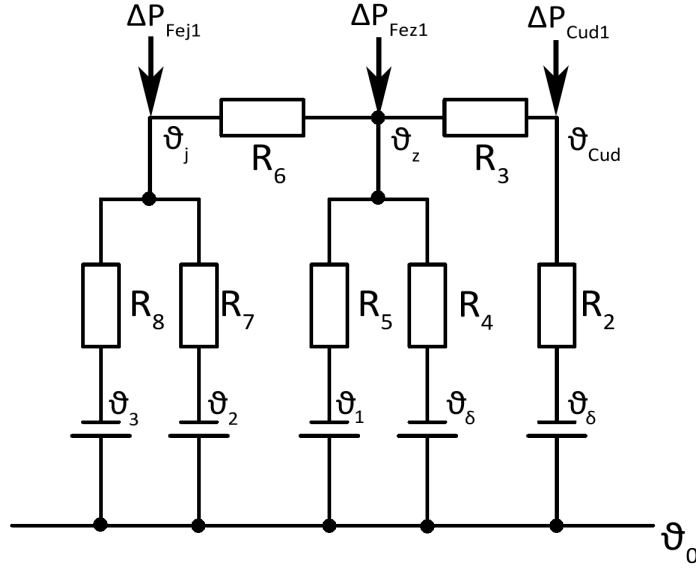
Oteplení na hřbetu induktu:

$$\begin{aligned} \vartheta_3 = \vartheta_{\delta} + \frac{\Delta P_{Fez} + \Delta P_{Cud} + \Delta P_{Fej}}{c_v \cdot Q_{\delta}} = \\ 52,91 + \frac{50282,85 + 95032,38 + 25363,53}{1250 \cdot 11,33} = 64,96 \text{ }^{\circ}\text{C} \end{aligned} \quad (3.31)$$

3.1.7 Náhradní tepelný obvod

Schéma náhradního tepelného obvodu daného úseku, pomáhá při sestavování rovnic, pomocí nichž můžu určit zbývající části oteplení. V tomto případě dostanu 3 rovnice o 3 neznámých, kde využiji analogie metody uzlových napětí I.Kirchhoffova zákona. Pro urychlení jinak zdlouhavého výpočtu, byl použit MATLAB.

3. TEPELNÝ VÝPOČET



Obrázek 3.3: Schéma tepelného obvodu

Ze schématu byly odvozeny následující rovnice:

$$\frac{\vartheta_{Cud} - \vartheta_{\delta}}{R_2} - \frac{\vartheta_{Cud} - \vartheta_z}{R_3} = \Delta P_{Cud1} \quad (3.32)$$

$$\frac{\vartheta_z - \vartheta_{Cud}}{R_3} - \frac{\vartheta_z - \vartheta_{\delta}}{R_4} - \frac{\vartheta_z - \vartheta_1}{R_5} - \frac{\vartheta_z - \vartheta_j}{R_6} = \Delta P_{Fez1} \quad (3.33)$$

$$\frac{\vartheta_j - \vartheta_z}{R_6} - \frac{\vartheta_j - \vartheta_2}{R_7} - \frac{\vartheta_j - \vartheta_3}{R_8} = \Delta P_{Fej1} \quad (3.34)$$

Z rovnic pak byla sestavena matice, nutná pro zadání do MATLABu:

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} & -\frac{1}{R_3} & 0 \\ -\frac{1}{R_3} & \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_6} & -\frac{1}{R_6} \\ 0 & -\frac{1}{R_6} & \frac{1}{R_6} + \frac{1}{R_7} + \frac{1}{R_8} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta P_{Cud1} + \frac{\vartheta_{\delta}}{R_2} \\ P_{Fez1} + \frac{\vartheta_1}{R_5} + \frac{\vartheta_{\delta}}{R_4} \\ P_{Fej1} + \frac{\vartheta_2}{R_7} + \frac{\vartheta_3}{R_8} \end{bmatrix}$$

Teploty vychází následovně:

$$\vartheta_{Cud} = 123,04^{\circ}C \quad (3.35)$$

$$\vartheta_z = 97,84^{\circ}C \quad (3.36)$$

$$\vartheta_j = 90,55^{\circ}C \quad (3.37)$$

Odpovídající hodnoty oteplení získám odečtem od teploty chladícího média na vstupu:

$$\Delta\vartheta_{Cud} = \vartheta_{Cud} - \vartheta_{vst} = 123,04 - 40 = 83,04^\circ C \quad (3.38)$$

$$\Delta\vartheta_z = \vartheta_z - \vartheta_{vst} = 97,84 - 40 = 57,84^\circ C \quad (3.39)$$

$$\Delta\vartheta_j = \vartheta_j - \vartheta_{vst} = 90,55 - 40 = 50,55^\circ C \quad (3.40)$$

Je vidět, že při takto navrženém chlazení dle tabulky 8.4 izolace třídy F vyhovuje, stejně jako u budícího vinutí.

3.2 Oteplení čel

Nejprve vypočtu celkové ztráty v čelech vinutí:

$$\Delta P_{Cu\check{c}} = \Delta P_{Cu1} \cdot \frac{l_{\check{c}}}{l_v} = 133347,02 \cdot \frac{0,4064}{1,4144} = 38314,64 W \quad (3.41)$$

Poté ztráty v jedné cívce čela:

$$\Delta P_{\check{c}1} = \frac{\Delta P_{Cu\check{c}}}{Q} = \frac{38314,64}{336} = 114,03 W \quad (3.42)$$

Obvod čel:

$$O_{\check{c}} = 2 \cdot b_d + 2 \cdot h_2 = 2 \cdot 0,017 + 2 \cdot 0,088 = 0,21 m \quad (3.43)$$

Odpor čel:

$$R_{\check{c}} = \frac{\delta_{iz}}{\lambda_{iz} \cdot O_{\check{c}} \cdot l_{\check{c}}} + \frac{\lambda_{vzd}}{\lambda_{vzd} \cdot O_{\check{c}} \cdot l_{\check{c}}} + \frac{1}{\alpha_{\check{c}} \cdot k \cdot O_{\check{c}} \cdot l_{\check{c}}} = \frac{0,003}{0,3 \cdot 0,21 \cdot 0,4064} + \frac{0,0001}{0,026 \cdot 0,21 \cdot 0,4064} + \frac{1}{90 \cdot 0,8 \cdot 0,21 \cdot 0,4064} = 0,3249 \frac{^\circ C}{W} \quad (3.44)$$

přičemž k je zvolený činitel zakrytí čel závisující na konstrukčním uspořádání (dle [5])

Teplota vstupujícího vzduchu:

$$\vartheta_{o\check{c}} = \frac{\Delta P_{Cu1}}{\frac{\rho}{2} \cdot 1100 \cdot Q_{\check{c}}} + \vartheta_{vst} = \frac{133347,02}{\frac{1,2759}{2} \cdot 1100 \cdot 5,66} + 40 = 33,57 + 40 = 73,57^\circ C \quad (3.45)$$

φ je v tomto případě konstanta pro hustotu vzduchu

3. TEPELNÝ VÝPOČET

Teplota čel vinutí:

$$\vartheta_{\tilde{c}} = \Delta P_{\tilde{c}1} \cdot R_{\tilde{c}} + \vartheta_{o\tilde{c}} = 114,03 \cdot 0,3249 + 73,57 = 110,62^{\circ}\text{C} \quad (3.46)$$

Oteplení čel vinutí:

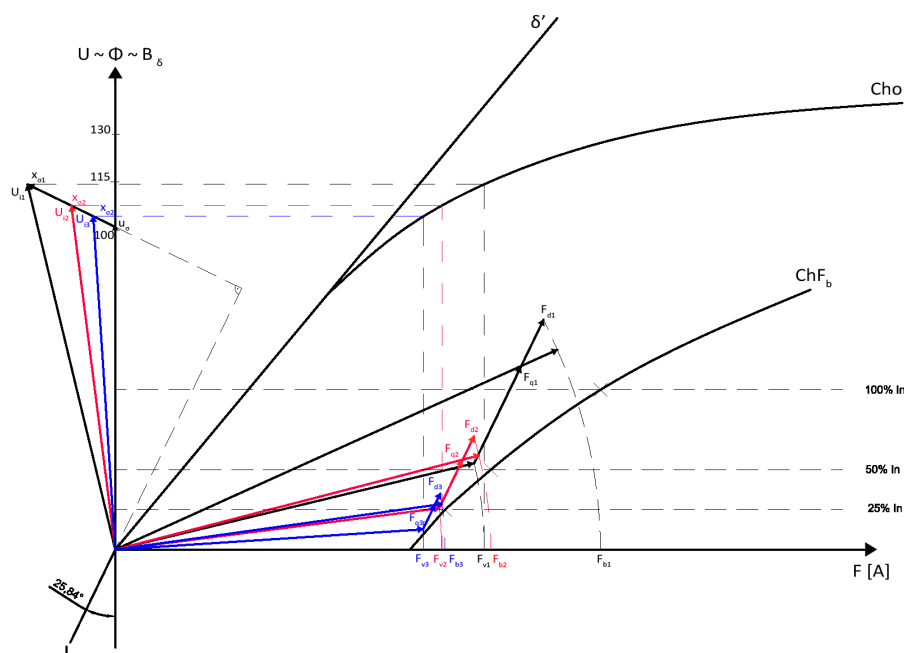
$$\Delta\vartheta_{\tilde{c}} = \vartheta_{\tilde{c}} - \vartheta_{vst} = 110,62 - 40 = 70,62^{\circ}\text{C} \quad (3.47)$$

V případě čel by teoreticky vyhovovala dle tabulky 8.4 třída izolace B, ovšem protože je izolace vinutí průběžná, musí být v drážkové části i čelech izolace stejného typu. Proto se i zde použije izolace třídy F.

4 Zatěžovací charakteristika a závislost zatížení na účinnosti

4.1 Zatěžovací charakteristika

K sestavení využiji magnetizační charakteristiku (viz. obrázek 1.5) a o zatěžovací charakteristiku ji pouze doplním. Základem je tedy mít správně sestavenou magnetizační charakteristiku. Pro vytvoření dostatečné přesnosti postačí 3 body, kterými proložím křivku. Jeden bod bude ležet na hladině plného jmenovitého proudu (100% I_n), druhý na hladině polovičního jmenovitého proudu (50% I_n) a poslední bod bude v místech čtvrtinového proudu (25% I_n). Tomu budou odpovídat i velikosti rozptylových reaktancí (100%, 50%, 25%), přičemž se s nimi bude měnit i velikost a sklon indukovaného napětí. Velikost amplitudy základní harmonické magnetického napětí v podélném i příčném směru také přizpůsobím hladině I_n se kterou počítám a stejným poměrem zmenším. Výsledná zatěžovací charakteristika je označena ChF_b a znázorněna na zmenšeném obrázku níže. V příloze je umístěna v plné velikosti (obrázek 8.13).



Obrázek 4.1: Zatěžovací charakteristika

4.2 Závislost účinnosti na zatížení

Cílem je graficky vytvořit závislost účinnosti na zatížení a to lze pouze za předpokladu vypočtení všech dílčích účinností při daném zatížení. Základem je vždy přepočítat s daným zatížením i konkrétní ztráty, se kterými stroj pracuje.

Vycházím z premisy, která dělí ztráty závislé na zatížení, a které nikoliv. Ztráty jež nejsou závislé na změně zatížení, tj. jsou tedy neustále konstantní, označím jako ztráty naprázdno P_o . Spadají sem ztráty mechanické P_m , ztráty na povrchu pólového nástavce P_p , ztráty ve jhu induktu P_{Fej} a ztráty v zubech P_{Fesz} .

$$P_o = P_{mech} + P_p + P_{Fej} + P_{Fesz} = 85421,55 \text{ W} \quad (4.1)$$

Druhou kategorií jsou ztráty měnící se se zatížením. Kromě ztrát lineárně vzrůstajících (Jouelovy ve vinutí statoru P_{cu1} a přídavných $P_{přid}$) se vyskytují i ztráty v budícím vinutí P_{cub} , které lineárně závislé nejsou. V tomto momentě využiji zatěžovací charakteristiky (obrázek 4.1), kterou jsem si v předchozí části sestavil a bude mě zajímat magnetické budící napětí F_b v jednotlivých úrovních jmenovitého proudu I_n .

I_n [%]	F_b [A]
5	9300
10	9600
20	10100
30	10640
40	11200
50	11800
60	12300
70	12980
80	13600
90	14500
100	15380
110	16600
120	18000
130	19600

Tabulka 4.1: Tabulka závislosti F_b na I_n

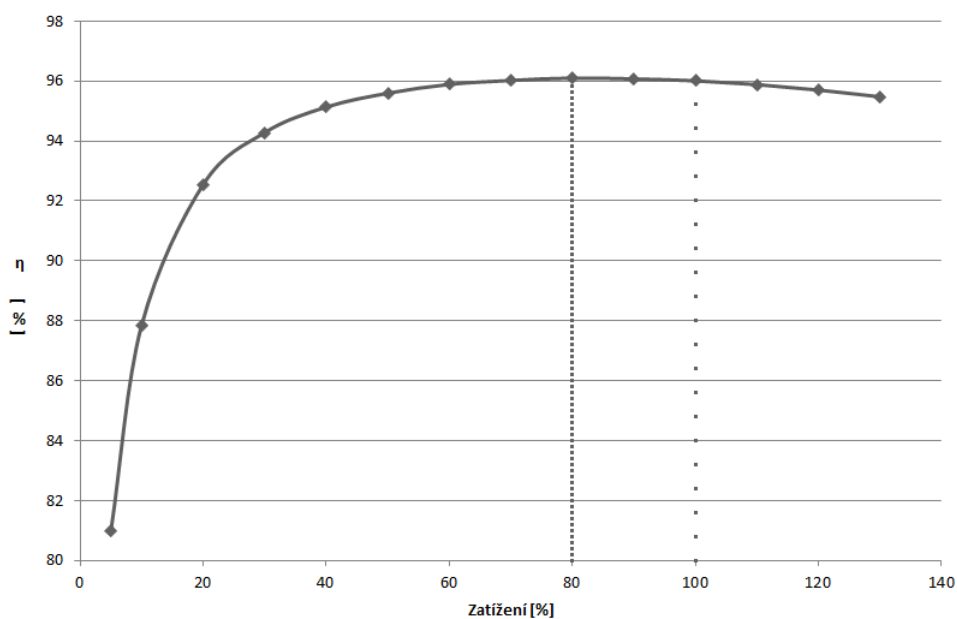
Díky znalosti budícího magnetického napětí F_b jsem sestavil tabulku 4.2,

4. ZATĚŽOVACÍ CHARAKTERISTIKA A ZÁVISLOST ZATÍŽENÍ NA ÚČINNOSTI

sloužící jako zdroj dat pro graf závislosti účinnosti na zatížení (obrázek 4.2).

P [W]	P_{cin} [kW]	$P_{přid}$ [kW]	I_1 [A]	P_{Cu1} [W]	F_b [A]	I_b [A]	P_{Cu2} [W]	$\Sigma P = P_{přid} + P_{Cu1} + P_{Cu2}$ [W]	$\Sigma P + P_c$ [W]	$\Sigma P + P_c + P_{cin}$ [W]	η [%]
5	495	1,65	90,7265	333,368	9300	442,8571	61563,51	66516,878	151968,4	646968,4	80,97867
10	990	3,3	181,453	1333,47	9600	457,1429	68796,082	73429,552	158851,1	1148851	87,85265
20	1980	6,6	362,906	5333,881	10100	480,9524	76148,961	88082,842	173504,4	2153504	92,54389
30	2970	9,9	544,359	12001,2322	10640	506,6667	84509,298	106410,53	191832,1	3161832	94,27993
40	3960	13,2	725,812	21335,5239	11200	533,3333	93639,111	128174,635	213596,2	4173596	95,13137
50	4950	16,5	907,265	33336,7561	11800	561,9018	103940,61	153777,364	239198,9	5189199	95,59356
60	5940	19,8	1088,718	48004,9288	12300	585,7143	112935,76	180740,684	266162,2	6206162	95,88769
70	6930	23,1	1270,717	65310,042	12980	618,0952	125768,14	214208,177	299629,7	7229630	96,02016
80	7920	26,4	1451,624	85342,0956	13600	647,619	138069,91	249812,009	335233,6	8255234	96,09761
90	8910	29,7	1633,077	108011,09	14500	690,4762	156948,53	294659,616	380081,2	9290081	96,06955
100	9900	33	1814,53	133347,02	15380	735	177842,07	344189,094	429610,6	10329611	96,00705
110	10890	36,3	1995,983	161349,9	16600	790,4762	205701,48	403351,378	488772,9	11378773	95,88143
120	11880	39,6	2177,436	192019,715	18000	857,1429	241861,22	473480,939	558902,5	12438902	95,70002
130	12870	42,9	2358,889	225356,471	19600	933,3333	286769,78	555026,219	640447,8	13510448	95,47415

Tabulka 4.2: Závislost účinnosti na zatížení



Obrázek 4.2: Grafické zobrazení účinnosti na zatížení stroje

Z obecného hlediska točivé i netočivé stroje dosahují svých největších účinnosti mezi 70-80%. Jak je z grafu patrné, největší účinnosti je dosaženo v oblasti kolem 80%, což odpovídá předpokladům.

5 Konstrukční uspořádání

Jak už bylo v úvodu naznačeno, je tento stroj obtékán vodou, to znamená naprostou hermetickou utěsněnost proti vodě. Stroj je umístěn v betonovém prostoru a radiálně vyztužen betonovými a ocelovými vzpěrami. Případná údržba se provádí v kobce, je tedy nutné se ke stroji dostat, k tomu slouží dvojice technologický otvorů se žebříky. Jeden pro elektrickou část stroje, druhý vede k ložisku spojení hřídelí a turbíně. Otvory se vede i mazání oleje a výstupní kabely s generovanou elektřinou. V přílohách 8.14, 8.15 je naznačeno, jak by takový stroj mohl vypadat.

6 Závěr

Navrhovaný stroj je specifický svým přímoproudým uspořádáním, kdy je generátor s turbínou spojený do jednoho voděodolného pouzdra. Již z teoretických předpokladů vyplývá, že se jedná o stroj s malým spádem vody a tím i nutně s nízkými otáčivými rychlostmi. Na otáčivé rychlosti je závislý i počet pólů, kterých je v mém v případě 64. S tímto velkým počtem pólů je ovšem malá mezipólová rozteč, díky které je méně prostoru pro proudění chladícího vzduchu a tudíž i horší chlazení uvnitř stroje. Ovšem nespornou výhodou tohoto přímoproudého uspořádání je obtékání pláště vodou, která vytvářené teplo výborně odvádí a stroj ochlazuje.

Elektromagnetický návrh byl proveden standardním způsobem, přičemž hlavní osnovou celé práce je mů zdroj [5]. Dále, co se návrhu týče, potýkal jsem se zde s celou řadou parametrů, které bylo nutné zvolit dle vlastního uvážení nebo po konzultaci s mým vedoucím. Je tedy možné, že stejný typ generátoru by v rukou jiného konstruktéra mohl vypadat odlišně. Jedním z hlavních parametrů, který ovlivnil celý průběh výpočtu bylo vhodné zvolení vnějšího průměru generátoru s ohledem na vlastnosti Kaplanovy turbíny. Na základě zkušeností vedoucího práce je $D_1 = 4,1 m$.

Během návrhu se projevil velký mezipólový rozptyl, který lze přisoudit velké výšce pólu a malému prostoru mezi sousedními póly, a proto jsem se problém snažil více rozebrat. A to porovnáním hodnoty vypočtené analyticky s hodnotou metody konečných prvků, přičemž oba výsledky vycházely s minimální odchylkou (1,03%), lze tedy usoudit že jsou obě metody srovnatelné.

Celková účinnost stroje je na hodnotě 95,82% při jmenovitém zatížení, přičemž největšími ztrátami ze všech, byly Jouelovy v budícím vinutí (41,76%) a následně i ve vinutí statoru (30,84%). Díky tomu, že se tyto ztráty přeměňují v teplo, je věnována jedna kapitola právě oteplení stroje. Chlazení stroje je vhodně navrženo tak, aby se v budícím vinutím, drážkové části statoru i čelech vinutí mohla použít třída izolace F.

Pro úplnost je vypracována závislost účinnosti na zatížení, která vykazuje největší účinnost pro 80-ti procentní zatížení, což splnilo mé teoretické předpoklady, jež jsem se během studia dozvěděl. Tato skutečnost by se v reálu mohla lišit, jelikož výpočet nezahrnuje i další průvodní jevy jako je například oteplení statorového vinutí v závislosti na zvyšování výkonu (proudu).

Na závěr práce je vložený zjednodušený návrh konstrukčního uspořádání, jak by takový stroj mohl vypadat. Elektrická část stroje (stator, rotor, průměr hřídel) je kreslena s přesnými rozměry pocházejících z elektromagne-

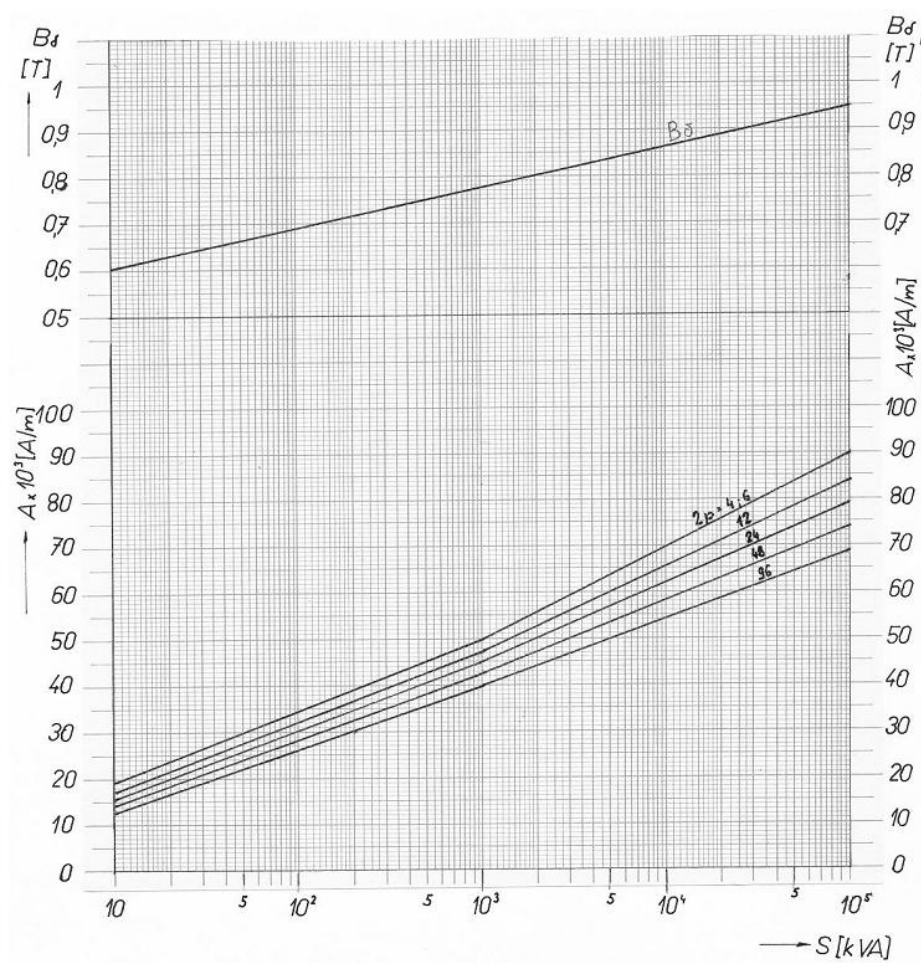
6. ZÁVĚR

tického návrhu, ostatní hlavně strojařské části jsou zakresleny na základě konzultace s vedoucím a prohlížením výkresů již realizovaných strojů obtékaných vodou.

7 Literatura

- [1] WIEDEMANN, E. a W. KELLENBERGER. *Konstrukce elektrických strojů*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1973, 650 s.
- [2] Hydropower Equipment-Bulb Turbine. *Hydrotu engineering* [online]. 2014 [cit. 2014-02-01]. Dostupné z: <http://www.sinohydropower.com/bulb-turbine.html>
- [3] Bulb hydro turbines | Power generation | Alstom. *Alstom Power* [online]. 2014 [cit. 2014-02-01]. Dostupné z: <http://www.alstom.com/power/renewables/hydro/hydro-turbines/bulb-turbines/>
- [4] Bulb Turbines HTE Engineering. *HTE Engineering* [online]. 2014 [cit. 2014-02-01]. Dostupné z: <http://www.hydrotech-eng.com/equipment/turbines/bulb-turbines/>
- [5] ČERVENÝ, Josef. *Přednášky a materiály z předmětů SES1,SES2* [online]. 2014 [cit. 2014-03-31]. Dostupné z: <https://courseware.zcu.cz/wps/portal/predmety/>
- [6] CIGÁNEK, Ladislav. *Stavba elektrických strojů*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1958, 714 s. ISBN 05/34.
- [7] ALTER, Jakub. *Návrh synchronního hydroalternátoru* [online]. Plzeň, 2013 [cit. 2014-02-01]. Dostupné z: <https://portal.zcu.cz/StagPortletsJSR168/KvalifPraceDownloadServlet?typ=1&adipidno=53751>. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [8] KOPYLOV, Igor Petrovič et al. *Stavba elektrických strojů*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1988, 685 s. ISBN 04-532-88.

8 Přílohy



Obrázek 8.1: Graf proudové hustoty a indukce ve vzduchové mezeře (zdroj:[5])

8. PŘÍLOHY

A A'				C C'				B B'			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		13		15		17		19		21	
	23			25		27		29		31	
33	34		35		37		39		41		
43		45		47		49		51			53
55				57		59		61			63
	65			67		69		71		73	
75			77		79		81		83		
85		87		89		91		93			95
	97			99		101		103			105
	107			109		111		113			115
117			119		121		123		125		
127		129		131		133		135			137
	139			141		143		145		147	
	149			151		153		155		157	
159			161		163		165		167		
169		171		173		175		177			179
	181			183		185		187			189
	191			193		195		197			199
201		203		205		207		209			211
211		213		215		217		219			221
	223			225		227		229			231
	233			235		237		239			241
243		245		247		249		251			
253		255		257		259		261			263
	265			267		269		271			273
	275			277		279		281			283
285		287		289		291		293			
295		297		299		301		303			305
	307			309		311		313			315
	317			319		321		323			325
327		329		331		333		335			
337		339		341		343		345			347
	349			351		353		355			357
	359			361		363		365			367
369		371		373		375		377			
379		381		383		385		387			389
	391			393		395		397			399
	401			403		405		407			409
411		413		415		417		419			
421		423		425		427		429			431
	433			435		437		439			441
	443			445		447		449			451
453		455		457		459		461			
463		465		467		469		471			473
	475			477		479		481			483
	485			487		489		491			493
495		497		499		501		503			
505		507		509		511		513			515
	517			519		521		523			525
	527			529		531		533			535
537		539		541		543		545			
547		549		551		553		555			557
	559			561		563		565			567
	571			573		575		577			
579		581		583		585		587			
589		591		593		595		597			599
	601			603		605		607			609
	611			613		615		617			619
621		623		625		627		629			
631		633		635		637		639			641
	643			645		647		649			651
	653			655		657		659			661
663		665		667		669		671			

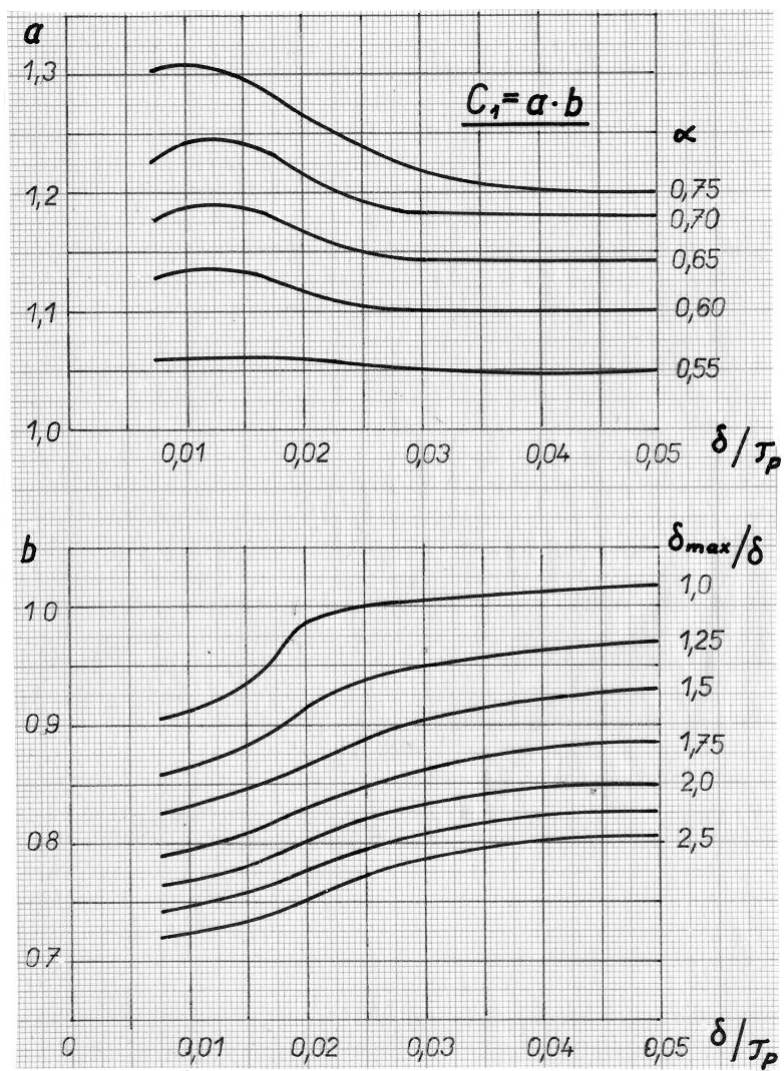
Obrázek 8.2: Tingleyho schéma

Napětí [kV]	Izolace proti železu t_i [mm]				Mezivrstva m_v [mm]
	Obyčejná	Lepší	Typ Semicatherm	Typ Relanex	
0,4 ÷ 1,5	0,45	-	-	-	3
3,0	1,8	1,6	1,4	1,4	3
6,3	3,0	2,7	2,4	1,8	4
10,5	3,5	3,3	3,1	2,8	6
13,8	4,5	4,2	4,0	3,8	6
15,7		4,6	4,4	4,0	7
18,0		5,5	5,0	5,0	7
24,0				6,5	

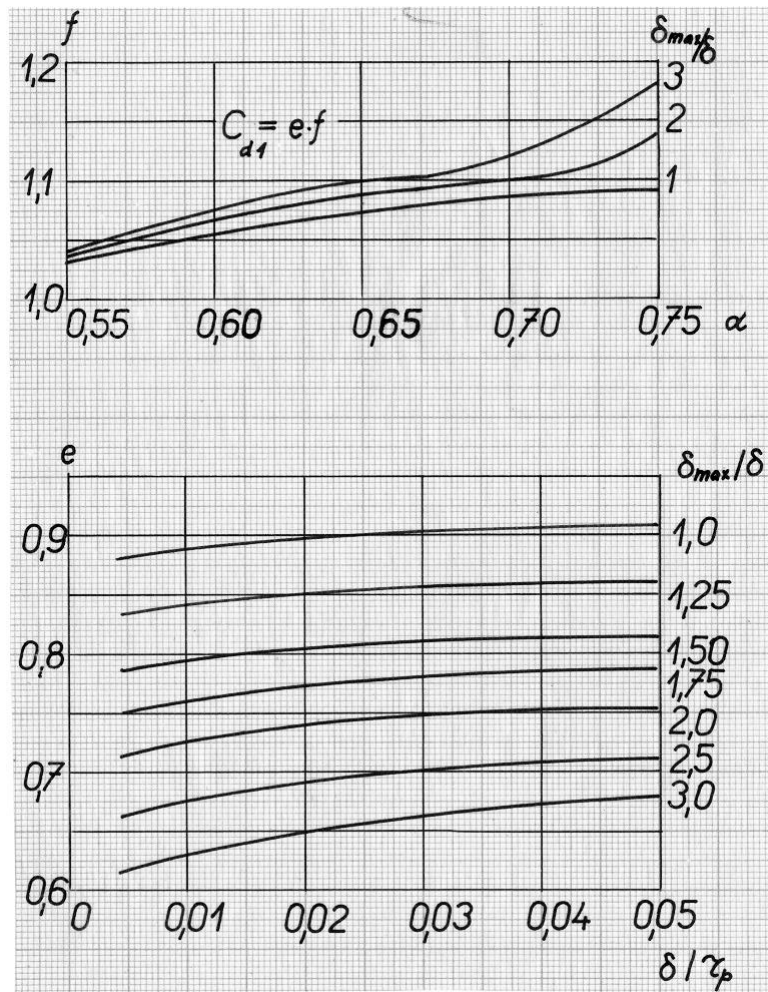
Tabulka 8.1: Tabulka určující izolaci proti železu a mezivrstvu v drážce (zdroj:[5])

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

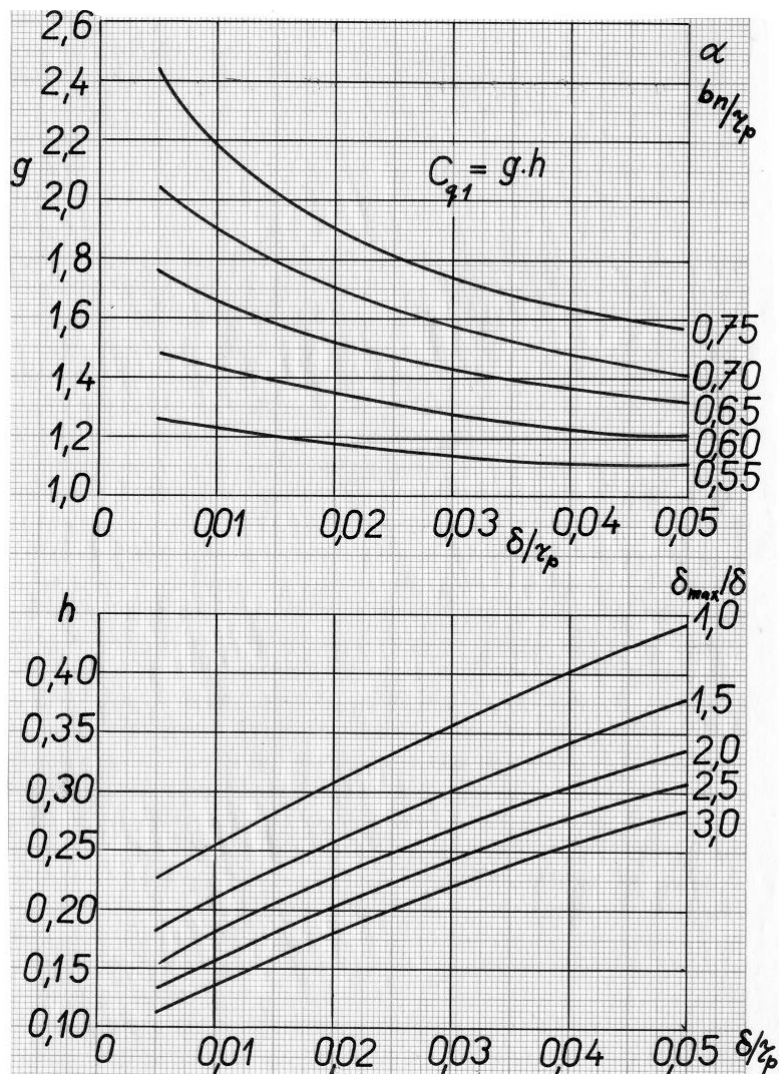
Tabulka 8.2: Doporučené rozměry kartáčů (zdroj:[5])



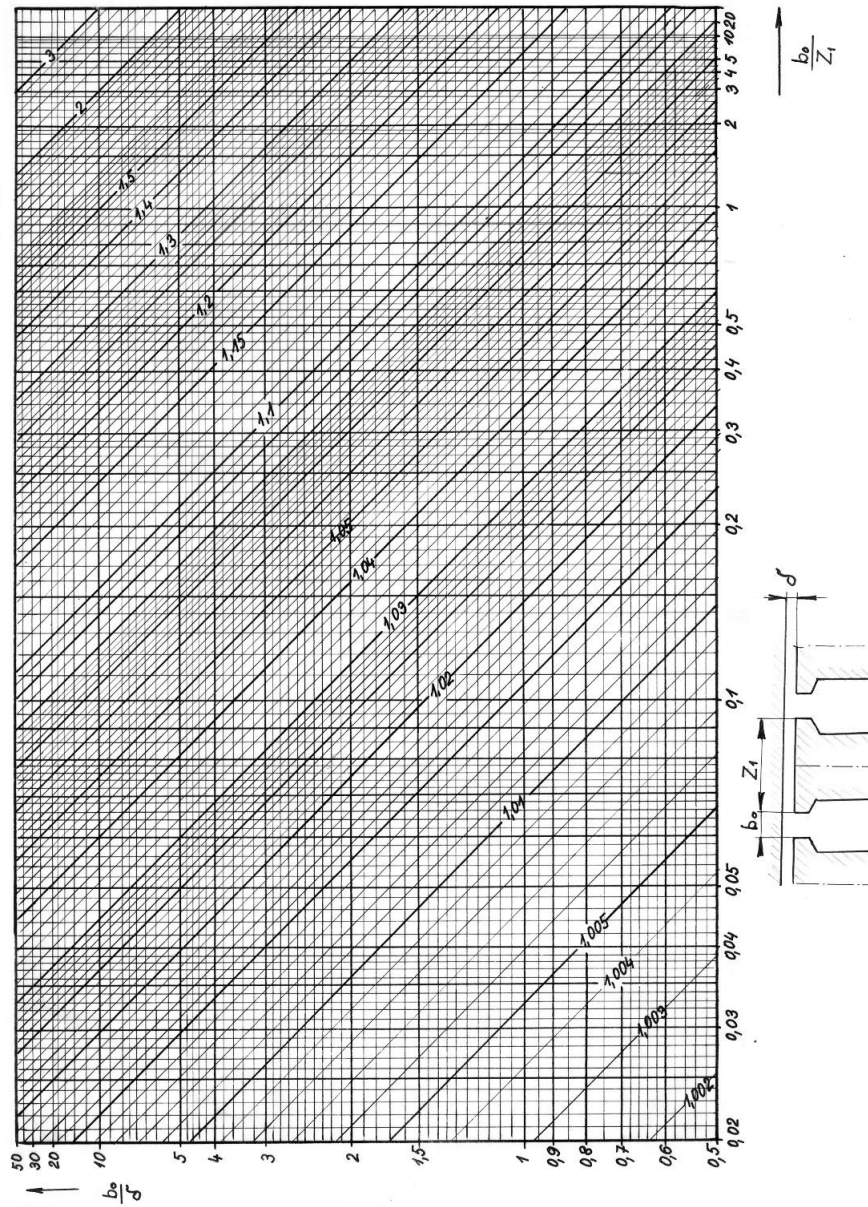
Obrázek 8.3: Činitel základní harmonické magnetické indukce ve vzduchové mezeře (zdroj:[5])



Obrázek 8.4: Deformační činitel magnetického napětí v podélné ose (zdroj:[5])

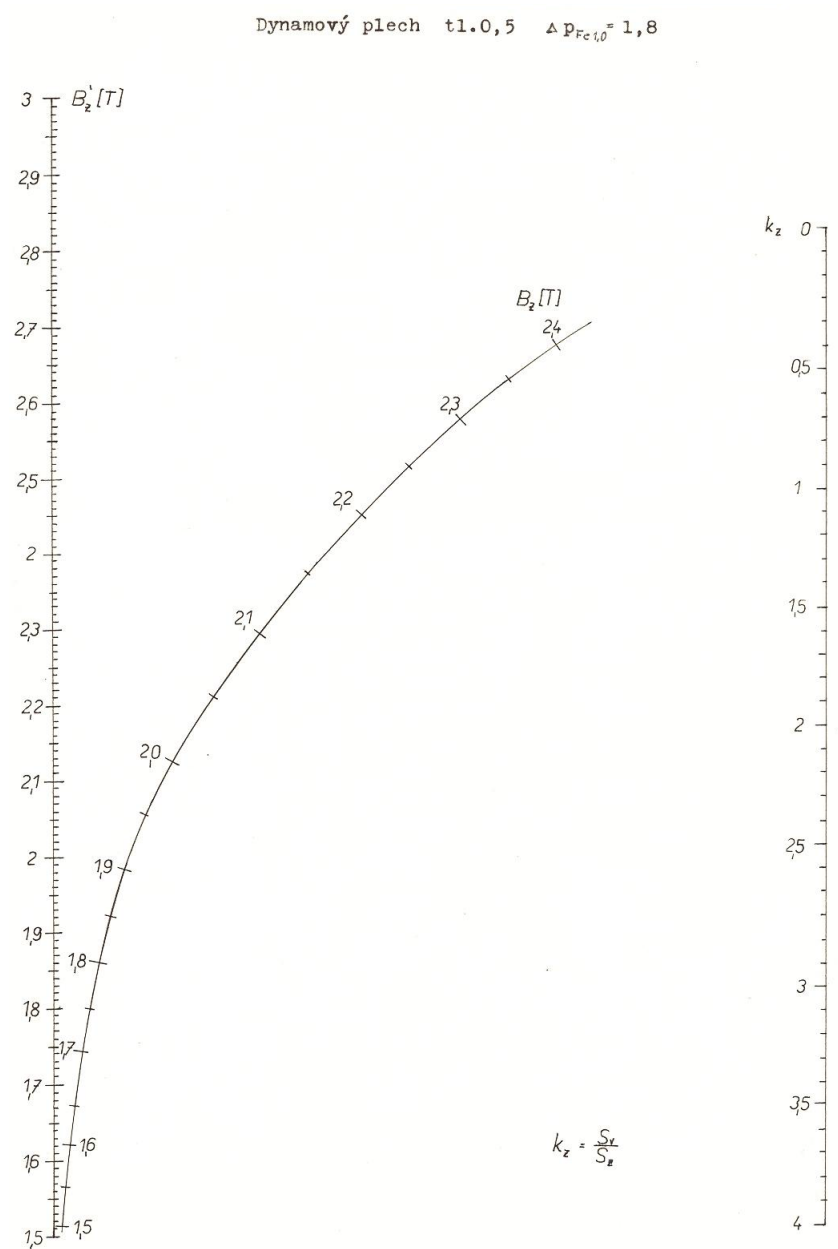


Obrázek 8.5: Deformační činitel magnetického napětí v příčné ose (zdroj:[5])

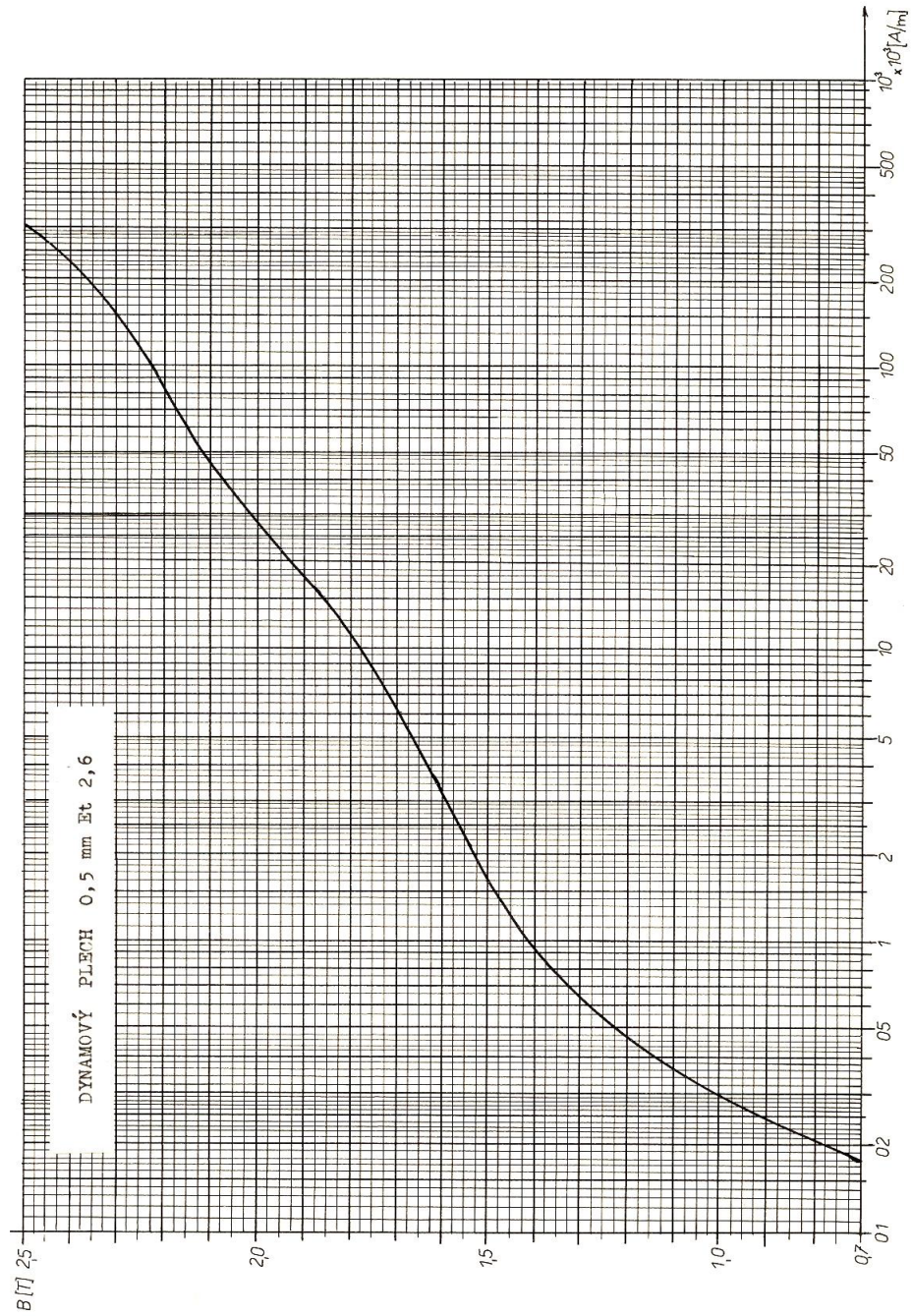


Obrázek 8.6: Nomogram pro určení Carterova činitele na drážkování (zdroj:[5])

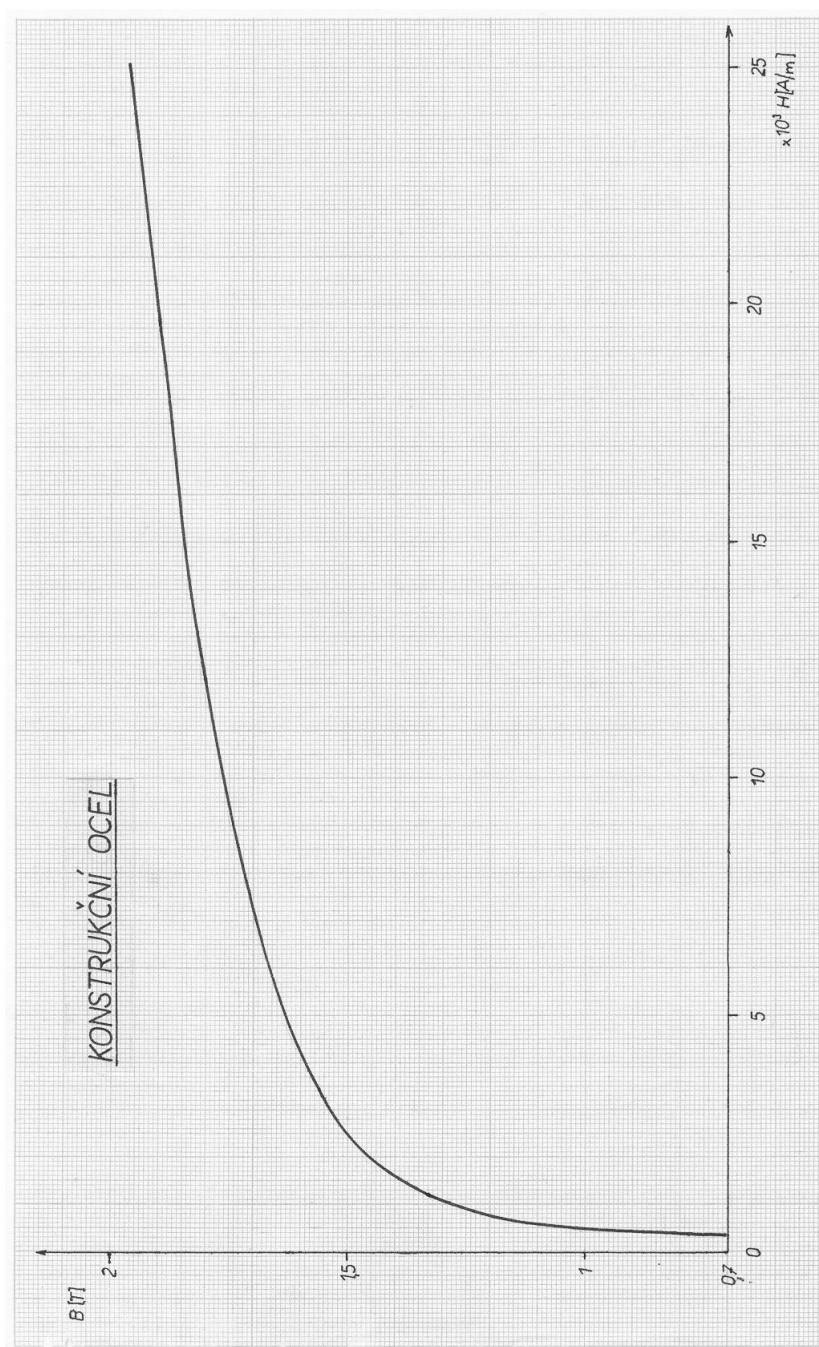
8. PŘÍLOHY



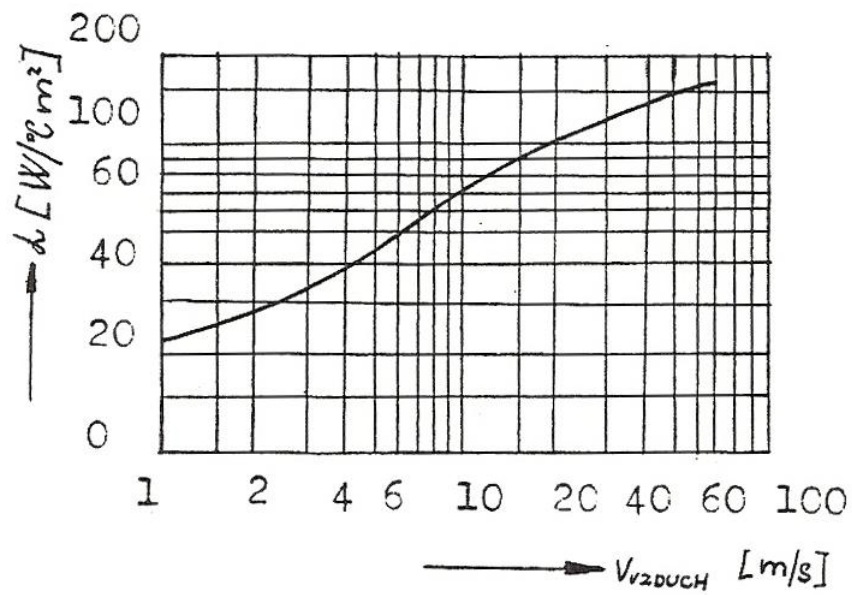
Obrázek 8.7: Nomogram k určení skutečné indukce v zubech induktu (zdroj:[5])



Obrázek 8.8: Magnetizační charakteristika dynamových plechů (zdroj:[5])



Obrázek 8.9: Magnetizační charakteristika konstrukční oceli (zdroj:[5])



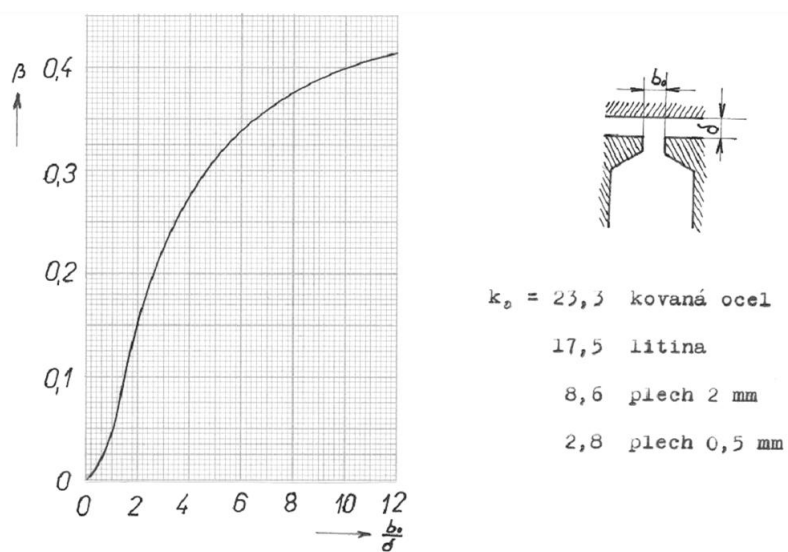
Obrázek 8.10: Chladivost v proudícím vzduchu (zdroj:[5])

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

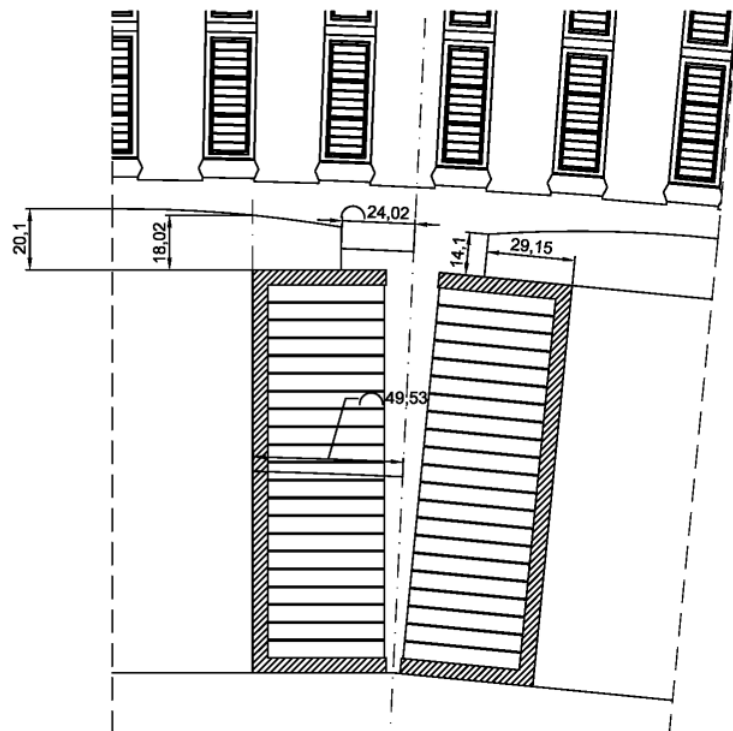
Tabulka 8.3: Vlastnosti kartáčů pro kroužky (zdroj:[5])

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

Tabulka 8.4: Třídy izolací (zdroj:[7])



Obrázek 8.11: Činitelé povrchových ztrát pólového nástavce (zdroj:[5])

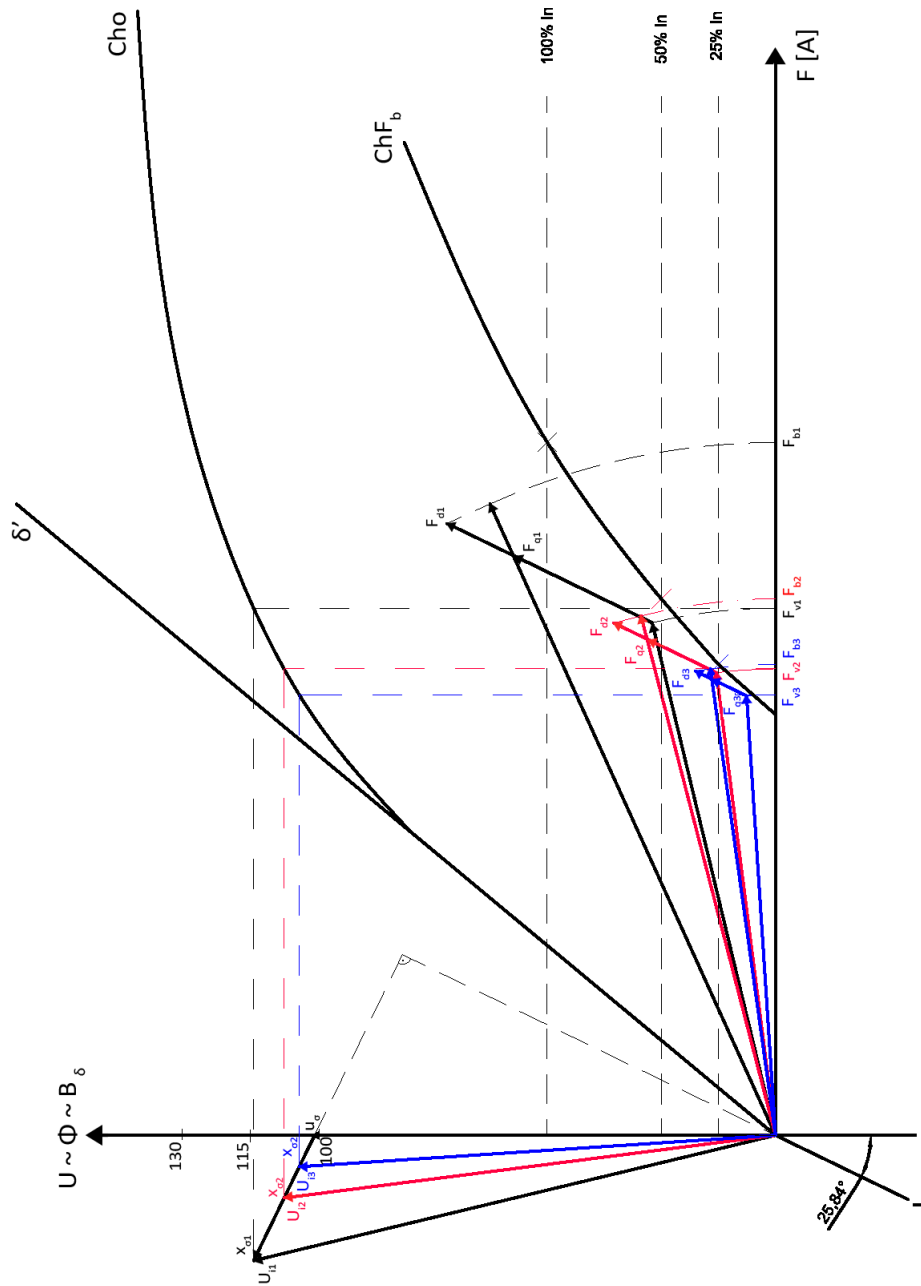


Obrázek 8.12: Okótovaný mezipólový prostor pro zjištění rozměrů

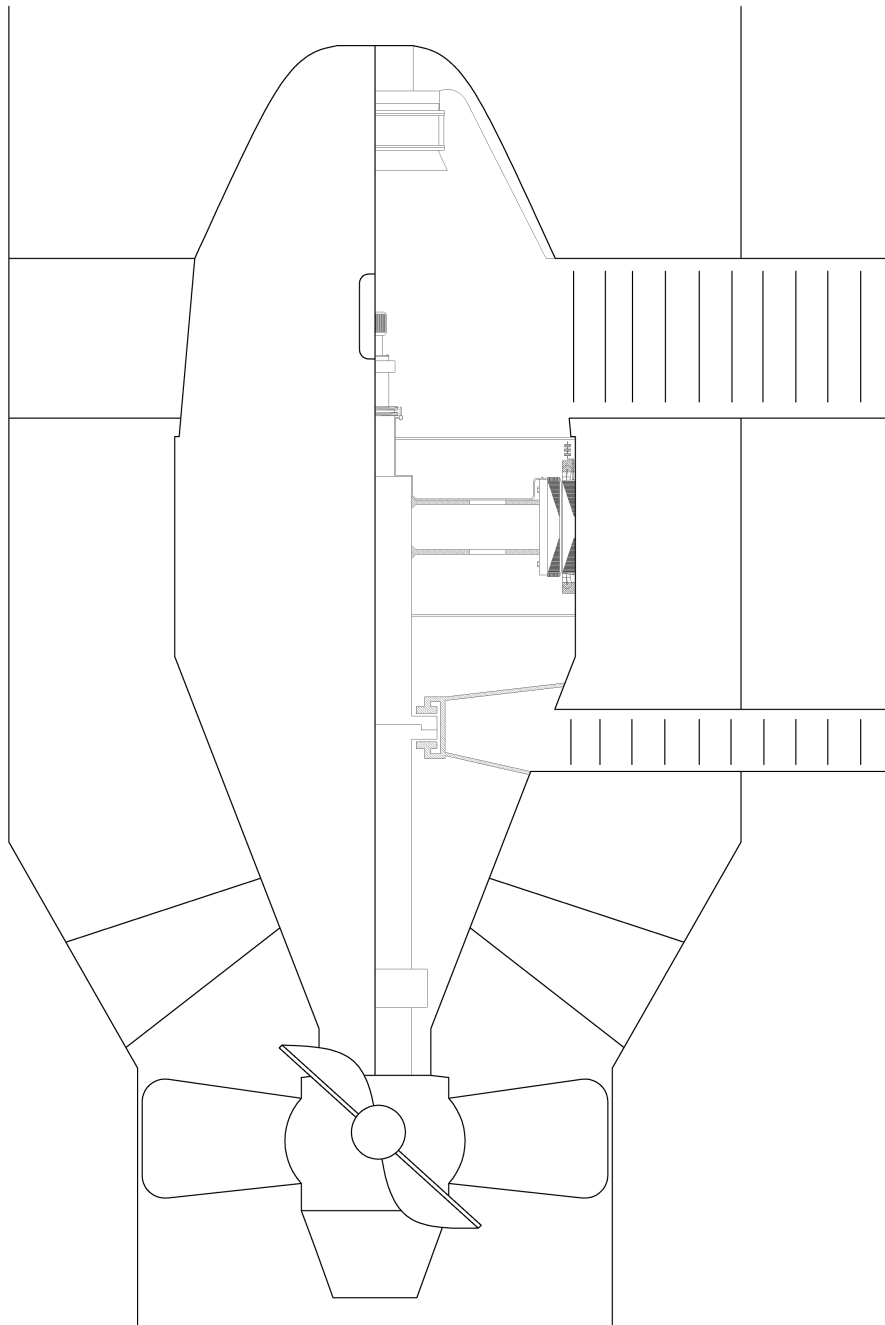
8. PŘÍLOHY

B	H	B	H
0	0	1,45	1750
0,4	67,0	1,50	2500
0,45	72,0	1,55	3540
0,50	77,0	1,60	5000
0,55	83	1,65	7120
0,60	90	1,70	10000
0,65	99	1,75	12500
0,70	109	1,80	15600
0,75	119	1,85	19100
0,80	133	1,90	23900
0,85	147	1,95	30000
0,90	166	2,00	59000
0,95	187	2,05	104000
1,00	217	2,10	149000
1,05	252	2,15	194000
1,10	295	2,20	239000
1,15	344	2,25	284000
1,20	399	2,30	329000
1,25	460	2,35	374000
1,30	585	2,40	419000
1,35	860	2,45	464000
1,40	1230		

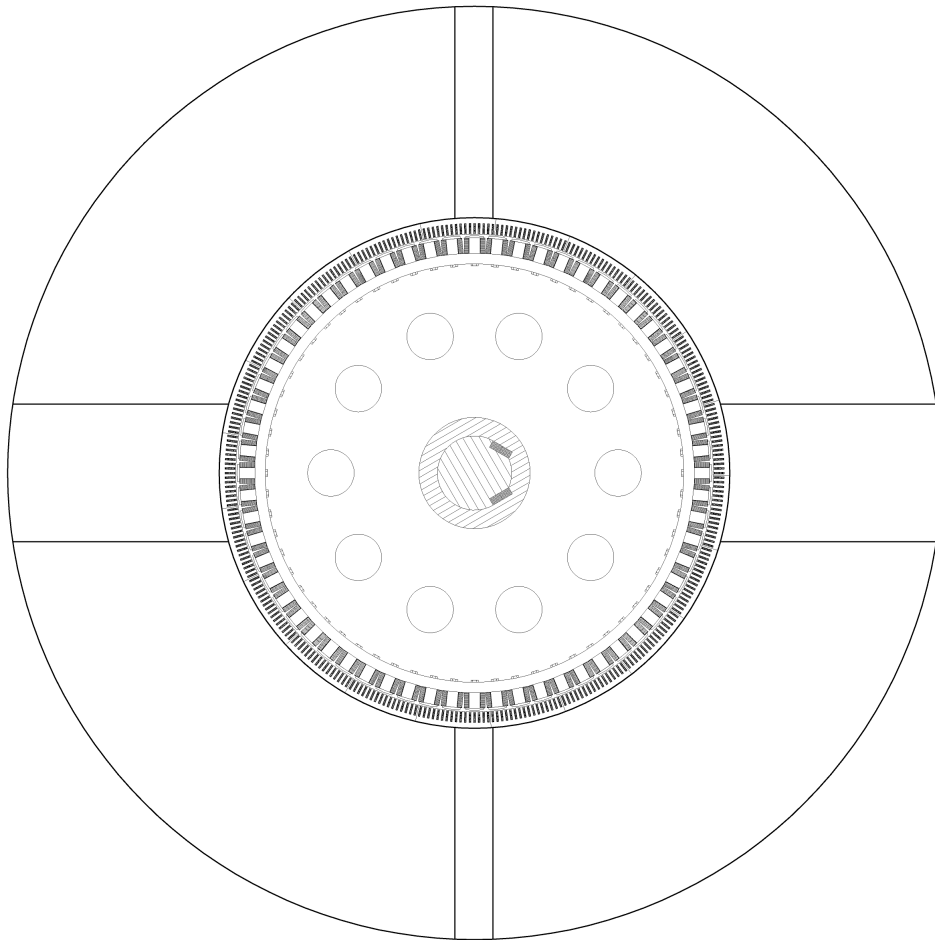
Tabulka 8.5: B-H závislost oceli M350-50A-1



Obrázek 8.13: Zatěžovací charakteristika



Obrázek 8.14: Konstrukční uspořádání v podélném řezu



Obrázek 8.15: Konstrukční uspořádání v příčném řezu