

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Návrh synchronního hydroalternátoru**

**Bc. Jakub Alter**

**2013**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2012/2013

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jakub ALTER**  
Osobní číslo: **E11N0064P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Průmyslová elektronika a elektromechanika**  
Název tématu: **Návrh synchronního hydroalternátoru**  
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Proveďte návrh synchronního hydroalternátoru pro jmenovité napětí 6000 V, jmenovité otáčky 214 ot/min a výkon 20 MW při účinnosti 0.8 kapacitních.
2. Vhodnost hodnot použitých pro návrh ověřte orientačním tepelným výpočtem.
3. Metodou konečných prvků ověřte správnost návrhu, zejména moment stroje a parametry náhradního schématu.



Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. BAŠTA, J.; CHLÁDEK, J.; MAYER, I.: Teorie elektrických strojů
2. KOPYLOV, I. P. a kol.: Stavba elektrických strojů
3. MEEKER, D. C.: Finite Element Magnetics.

Vedoucí diplomové práce:

**Ing. Karel Hruška, Ph.D.**

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání diplomové práce:

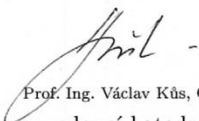
**15. října 2012**

Termín odevzdání diplomové práce:

**9. května 2013**

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



  
Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

## **Anotace**

Předkládaná diplomová práce se zabývá návrhem hydroalternátoru pro použití ve vodních elektrárnách. Práce obsahuje elektromagnetický návrh, zakončený výpočtem účinnosti. Dále obsahuje zjednodušený tepelný výpočet na základě náhradního tepelného obvodu. Závěrem jsou vypočteny parametry náhradního schématu a ověřeny pomocí metody konečných prvků v programu FEMM.

## **Klíčová slova**

Hydroalternátor, vinutí, magnetický obvod, náhradní schéma synchronního stroje, náhradní tepelný obvod, metoda konečných prvků, FEMM, charakteristika na prázdno, momentová charakteristika

**Abstract**

The proposed diploma thesis deals with hydro generator for use in hydroelectric power plants. The work includes electromagnetic calculations finished with calculation of efficiency. It also includes simplified thermal calculations based on equivalent thermal circuit. Finally, the calculated equivalent circuit parameters are verified using finite element method in the FEMM software.

**Key words**

Hydroelectric alternator, winding, magnetic circuit, equivalent circuit of synchronous machine, equivalent thermal circuit, finite element method, FEMM, no-load saturation characteristic, torque characteristics

## **Prohlášení**

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

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

-----  
podpis

V Plzni dne 9.5.2013

Jakub Alter

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Karlu Hruškovi Ph.D. a Ing. Romanu Pechánkovi Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení při zpracování této práce.

## Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>1 ZADÁNÍ ZÁKLADNÍCH PARAMETRŮ</b> .....	<b>12</b>
<b>2 VÝPOČET</b> .....	<b>12</b>
2.1 ZÁKLADNÍ HODNOTY .....	12
2.2 NÁVRH VINUTÍ INDUKTU .....	14
2.2.1 Návrh vinutí .....	14
2.2.2 Výpočet Essonova činitele a délky stroje .....	17
2.2.3 Výpočet drážky statorového vinutí .....	18
2.2.4 Odpor a rozptylová reaktance statorového vinutí .....	20
2.3 NÁVRH MAGNETICKÉHO OBVODU .....	24
2.3.1 Určení magnetického toku .....	24
2.3.2 Velikost vzduchové mezery .....	24
2.3.3 Magnetické napětí reakce kotvy .....	25
2.3.4 Dimenzování magnetického obvodu .....	25
2.3.5 Určení počtu segmentů plechů ve vrstvě statoru .....	26
2.3.6 Charakteristika naprázdno .....	27
2.4 NÁVRH BUDICÍHO VINUTÍ .....	31
2.4.1 Orientační výpočet oteplení budící cívky .....	33
2.4.2 Přenos budícího proudu na rotor: .....	33
2.5 ZTRÁTY A ÚČINNOST .....	35
<b>3 TEPELNÝ VÝPOČET</b> .....	<b>37</b>
3.1 ÚVOD .....	37
3.2 OTEPLENÍ INDUKTU .....	38
3.2.1 Výpočet ztrát .....	38
3.2.2 Určení tepelných odporů .....	38
3.2.3 Výpočet oteplení chladiva na statoru .....	42
3.3 VÝPOČET OTEPLENÍ ČEL VINUTÍ .....	44
3.4 VÝPOČET OTEPLENÍ CHLADIVA NA ROTORU .....	45



<b>4</b>	<b>OVĚŘENÍ PARAMETRŮ METODOU KONEČNÝCH PRVKŮ.....</b>	<b>47</b>
4.1	URČENÍ PARAMETRŮ NÁHRADNÍHO SCHÉMATU A VÝPOČET MOMENTOVÉ CHARAKTERISTIKY .....	47
4.2	VÝPOČET V PROGRAMU FEMM, IMPORT MODELU .....	51
4.2.1	<i>Funkce programu FEMM</i> .....	51
4.2.2	<i>Definování problému</i> .....	51
4.3	VÝSLEDKY ANALÝZY VE FEMM .....	54
4.3.1	<i>Možnosti čtení výsledků</i> .....	54
4.3.2	<i>Výsledky výpočtu</i> .....	55
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>61</b>
	<b>POUŽITÁ LITERATURA.....</b>	<b>63</b>
	<b>PŘÍLOHA.....</b>	<b>64</b>

## Úvod

Úkolem této diplomové práce je v rámci elektromagnetického návrhu určit parametry pro další upřesnění návrhu zadaného synchronního hydroalternátoru. Dále pak, tyto parametry ověřit metodou konečných prvků.

Jedná se o alternátor, na jmenovitých 214 ot  $\text{min}^{-1}$ , tedy 28 pólový s výkonem 25 MVA. Takovéto alternátory se ve vodních elektrárnách, s odpovídajícím instalovaným výkonem v desítkách MW, na území České republiky nevyskytují. Trendem při výstavbě i rekonstrukcích vodních elektráren je použití více soustrojí, což má řadu výhod. Kromě možnosti údržby jednoho soustrojí, zatímco druhé stojí, je to zejména větší efektivita popř. samotná schopnost provozu při nižším stavu vody. V menších elektrárnách (20 či 40 MW) je proto využito alternátorů o menších výkonech. Pro větší elektrárny (nad 100 MW) jsou již použity stroje o větším výkonu.

Návrh elektrických točivých strojů je velmi komplexní problém. Jednotlivé parametry stroje jsou ovlivněny mnoha rozhodnutími projektanta. Návrh často vyžaduje několik upřesnění, než splňuje požadavky zákazníka. Proto vyžadujeme, aby výpočty byly, co možná nejméně časově náročné. V tom nám pomáhá výpočetní technika. Záleží na zákazníkovi, na které parametry bude klást největší důraz. Projektant se obecně drží několika zásad. Stroj by měl být pro daný výkon, co možná nejlehčí a nejmenší. Čím větší obvodová proudová hustota  $A$  a indukce ve vzduchové mezeře  $B_\delta$ , tím je využití objemu stroje lepší. Tyto parametry v sobě zahrnuje Essonův činitel. Výroba musí být co nejméně náročná a co možná nejlacinější. Při výrobě stroje musí být minimalizován odpad materiálu. Stroj musí mít co nejvyšší účinník a především účinnost. U větších strojů se při projektování musí počítat i s jejich přepravou, tedy možnostmi jednoduchého rozmontování na přepravní rozměry a opětovného smontování. Existují i další speciální požadavky. Například u strojů určených do výbušného prostředí je vyžadováno uzavřené provedení.

Elektromagnetický návrh zahrnuje v první řadě určení základních parametrů stroje, jako jmenovitého proudu, počtu pólů, průměru vrtání induktu, pólové rozteči atp., které vycházejí přímo ze zadání. Dále, při návrhu vinutí, je stanoven zejména počet paralelních větví, drážek a závitů v sérii. Navržen je typ vinutí a určena opatření pro omezení výskytu vyšších

harmonických složek. Pro přehled o konstrukci vinutí je vytvořeno Tingleyho schéma a navrženo zapojení vinutí. Poté jsou určeny činitele vyšších harmonických a Essonův činitel. Z výkonové rovnice je stanovena délka stroje a jsou navrženy ventilační kanály. V dalším kroku je blíže definováno vinutí induktu, určeny rozměry drážek a čel vinutí. Následně je vypočtena velikost Jouleových ztrát ve vinutí induktu a ztrát na rozptylové reaktanci. Při návrhu magnetického obvodu je definován magnetický tok, jednotlivé indukce a příslušné rozměry daných částí magnetického obvodu. V této fázi výpočtu je určena zejména velikost vzduchové mezery, magnetické napětí reakce kotvy, charakteristika na prázdno a z ní magnetické napětí potřebné pro vytvoření odpovídajícího indukovaného napětí. Navazuje návrh budicího vinutí, kde je definován budicí proud, budicí napětí, rozměry, počet závitů a odpovídající ztráty. Na závěr jsou určeny ostatní druhy ztrát a vypočtena účinnost.

Orientační tepelný výpočet zde slouží pro určení oteplení jednotlivých částí stroje, a tím k výběru vhodného typu izolačních materiálů, či případné úpravě způsobu ventilace.

Pro ověření parametrů pomocí metody konečných prvků (dále jen MKP) je sestrojen dvojrozměrný náčrt příčného řezu strojem. Parametry pro porovnání s hodnotami vypočtenými pomocí MKP jsou nejprve odvozeny v první části diplomové práce. Pro výpočet různých parametrů v prostředí programu FEMM je model různě upraven. Ověřeny jsou hodnoty indukce v jednotlivých částech magnetického obvodu, magnetický tok, momentová charakteristika a také rozptylová, příčná a podélná synchronní reaktance a odpovídající indukčnosti. V závěru jsou shrnuty výsledky elektromagnetického návrhu a zhodnoceno porovnání s výpočtem pomocí MKP.

## 1 Zadání základních parametrů

Zdánlivý výkon	$S = 25000$	kVA
Sdružené napětí	$U = 6000$	V
Jmenovité otáčky	$n = 214$	ot min <sup>-1</sup>
Maximální otáčky	$n_m = 257$	ot min <sup>-1</sup>
Počet fází	$m = 3$	-
Frekvence	$f = 50$	Hz
Účinnost	$\cos\varphi = 0,8$	-

## 2 Výpočet

### 2.1 Základní hodnoty

Před započítáním návrhu vinutí statoru je třeba získat základní údaje o stroji přímo ze zadaných hodnot.

Činný výkon:

$$P = S \cdot \cos\varphi = 25000 \cdot 0,8 = 20000 \text{ kW} \quad (1)$$

Fázové napětí:

$$U_f = \frac{U}{\sqrt{3}} = \frac{6000}{\sqrt{3}} \cong 3464 \text{ V} \quad (2)$$

Počet pólových dvojic (pólpárů):

$$p = \frac{60f}{n} = \frac{60 \cdot 50}{214} \cong 14 \quad (3)$$

Počet pólů:

$$2p = 28$$

Jmenovitý proud:

$$I_1 = \frac{P_N}{\sqrt{3} \cdot U_N \cdot \cos \varphi} = \frac{20 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 6000 \cdot 0,8} = 2405,626 \text{ A} \quad (4)$$

Úbytek napětí ve stroji:

$$\varepsilon = 0,12 \cdot \sin \varphi = 0,12 \cdot 0,6 = 0,072 \quad (5)$$

[2 str. 492]

Vnitřní výkon:

$$P_i = P(1 + \varepsilon) = 25 \cdot 10^6 \cdot (1 + 0,072) = 26,8 \text{ MVA} \quad (6)$$

Průměr induktu ve vzduchové mezeře (vrtání statoru) byl nejprve určen podle empirického vztahu:

$$D_1 = 0,0216 \cdot (2p)^{0,63} \cdot P_i^{0,19} = 0,0216 \cdot (28)^{0,63} \cdot (26,8 \cdot 10^6)^{0,19} \cong 4,545 \text{ m} \quad (7)$$

[2 str. 492]

Poté byl určen ještě graficky (viz. příloha I) :

$$D_1 = 4,3 \text{ m} \quad (8)$$

Obvodová proudová hustota A byla předběžně stanovena graficky (viz. příloha II):

$$A = 68 \text{ 000 A} \cdot \text{m}^{-1}$$

Indukce ve vzduchové mezeře byla graficky stanovena podle (viz. příloha II):

$$B_\delta = 0,9 \text{ T}$$

Pólová rozteč byla na základě stanoveného průměru vrtání induktu určena:

$$t_p = \frac{\pi D_1}{2p} = \frac{\pi \cdot 4,3}{28} = \frac{43\pi}{280} \cong 0,482 \text{ m}$$

Činitel pólového krytí byl určen:

$$\alpha = 0,75$$

[1,2,4]

## 2.2 Návrh vinutí induktu

### 2.2.1 Návrh vinutí

Návrh počtu drážek byl nejprve proveden výpočtem z drážkové rozteče (viz. příloha III). Hodnoty z tohoto grafu spíše odpovídají konstrukci menších strojů (max.  $D_1 = 3,3$  m).

[1 str. 362]

$$Q_{1\max} = \frac{\pi D_1}{t_{d\min}} = \frac{\pi 4,3}{0,055} \cong 246; \quad Q_{1\min} = \frac{\pi D_1}{t_{d\max}} = \frac{\pi 4,3}{0,065} \cong 207 \quad (9)$$

Po několika neúspěšných výpočtech vinutí statoru, se ukázal být větší počet paralelních větví problematickým. Vycházel zde velký počet vodičů v drážce a díky tomu horší využití drážky. Proto byl počet drážek stanoven na 231, který odpovídá drážkové rozteči 58,5 mm.

Počet drážek na pól a fázi:

U stroje s takovýmto počtem pólů nemůžeme počet drážek na pól a fázi příliš zvyšovat, jelikož by to vedlo k velkému počtu drážek. Počet drážek na pól a fázi byl tedy zvolen zlomkový, abychom omezili velikost a zvýšili řád zubových harmonických. [1]

$$q_1 = \frac{Q_1}{2 \cdot p \cdot m} = \frac{231}{2 \cdot 14 \cdot 3} = \frac{11}{4} \quad (10)$$

Vzhledem k podmínce, že  $\frac{2p}{a \cdot c}$  = celé číslo a  $\frac{Q}{m \cdot a}$  = také c.č., byl určen počet 7 paralelních

větví.  $a = 7$

$$\frac{2p}{a \cdot c} = \frac{28}{7 \cdot 4} = 1 \quad \frac{Q}{m \cdot a} = \frac{231}{3 \cdot 7} = 11 \quad (12) \quad (11)$$

Počet závitů jedné fáze v sérii a počet vodičů v drážce:

$$N_s = \frac{\pi \cdot D_1 \cdot A}{2 \cdot m \cdot I_N} = \frac{\pi \cdot 4,3 \cdot 68000}{2 \cdot 3 \cdot 2405,626} \cong 63,64 \quad (13)$$

Počet vodičů v drážce:

$$n_d = \frac{a_{\text{str}} \cdot N_s}{p \cdot q} = \frac{7 \cdot 63,64}{14 \cdot \frac{11}{4}} \cong 11,57 \quad (14)$$

Volíme nejbližší sudé číslo  $n_d = 12$ .

Po upřesnění tedy vyšly hodnoty:

$$N_s = \frac{p \cdot q \cdot n_d}{a_{stř}} = \frac{14 \cdot \frac{11}{4} \cdot 12}{7} \cong 66 \quad (16)$$

$$A = \frac{2 \cdot m \cdot I_N \cdot N_s}{\pi \cdot D_1} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 2405,626 \cdot 66}{\pi \cdot 4,3} \cong 70519 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1} \quad (15)$$

Pro další návrh vinutí jsou důležité další parametry. Počet matematických fází volíme podle  $m'=6$ . Vinutí jsem zvolil dvojvrstvé  $2u=2$ , což je pro daný druh stroje typické. Dvouvrstvá vinutí umožňují využití nástrojů k potlačení vyšších harmonických (zlomkový počet drážek na pól a fázi a zkrácení kroku). Vinutí bylo zvoleno vlnové, nekřížené, z důvodu snadnější konstrukce. [1]

Počet drážek na pól:

$$Q_p = \frac{Q}{2p} = \frac{231}{28} = 8 + \frac{1}{4} = 8,25 \quad (17)$$

Vinutí bylo navrženo jako zlomkové, za účelem potlačení vyšších harmonických složek indukovaného napětí. Cívkový krok  $y_{1d}$  vinutí volíme se zkrácením  $\beta=0,8$  až  $0,86$  oproti plnému kroku, odpovídajícímu pólové rozteči.

$$y_{1d} = Q_p \cdot 0,86 = 7, \quad \beta = \frac{y_{1d}}{Q_p} = \frac{7}{8,25} = \frac{28}{33} \cong 0,8485 \quad (18) \quad (19)$$

Počet cívek:

$$K = Q \cdot u = 231 \cdot 1 = 231 \quad (20)$$

Fiktivní krok na komutátoru:

$$y_k = \frac{\varepsilon K - a_{stř}}{p} = \frac{231 - 7}{14} = \frac{224}{14} = 16 \quad (21)$$

Přední cívkový krok:

$$y_1 = 2u \cdot y_{1d} + 1 = 2 \cdot 7 + 1 = 15 \quad (22)$$

Zadní cívkový krok:

$$y_2 = 2y_k - y_1 = 2 \cdot 16 - 15 = 17 \quad (23)$$

Počet skupin vinutí:

$$a_{stř} \cdot m' = 42 \quad (24)$$

Počet skupin na jednu fázi:

$$\frac{a_{stř} \cdot m'}{m} = \frac{7 \cdot 6}{3} = 14 \quad (25)$$

Počet cívek ve skupině:

$$\frac{Q}{a_{stř} \cdot m'} = \frac{231}{42} = \frac{11}{2} = 5,5 \quad (26)$$

V tomto místě návrhu bylo vytvořeno Tingleyho schéma (viz. příloha V), které znázorňuje rozložení cívkových stran jednotlivých fází v drážkách induktu. Dále byla nakreslena část pilového schématu a zjednodušeného schématu zapojení (viz. příloha VI), které ukazují zapojení cívkových skupin a paralelních větví ve vinutí. Ve vzorcích (27,28,29) jsou uvedeny parametry Tingleyho schématu.

Počet řádků:

$$2p = 28 \quad (27)$$

Počet sloupců:

$$m \cdot n = 3 \cdot 11 = 33 \quad (28)$$

Schéma je vyplněno po c sloupcích:

$$c = 4 \quad (29)$$

Výpočet činitele zkrácení kroku pro 1. harmonickou:

$$k_{y1} = \sin \frac{1 \cdot \pi \cdot \beta}{2} = \sin \frac{\pi \cdot 0,8485}{2} \cong 0,972 \quad (30)$$

Činitel rozlohy vinutí pro 1. harmonickou:

$$k_{r1} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{m'}\right)}{n \cdot \sin\left(\frac{\pi}{m' \cdot n}\right)} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{6}\right)}{11 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{6 \cdot 11}\right)} \cong 0,955 \quad (31)$$



Činitel vinutí pak získáme:

$$k_{v1} = k_{y1} \cdot k_{r1} = 0,972 \cdot 0,955 \cong 0,928 \quad (32)$$

Po sestavení Tingleyho schématu je možné činitel rozlohy vinutí vypočíst i pomocí něj. Vycházíme přitom z toho, že elektrický úhel mezi fázory sousedních políček schématu je:

$$\alpha_{el} = \frac{180}{\text{šířka}} = \frac{180}{33} = \frac{60}{11} \quad (33)$$

Činitel rozlohy vinutí pak lze pro první harmonickou vypočítat:

$$k_{r1} = \frac{14 \cdot \left[ \cos\left(\frac{30}{11}\right) + \cos\left(\frac{90}{11}\right) + \cos\left(\frac{150}{11}\right) \right] + 7 \cdot \left[ \cos\left(\frac{210}{11}\right) + \cos\left(\frac{270}{11}\right) + \cos\left(\frac{330}{11}\right) + \cos\left(\frac{390}{11}\right) + \cos\left(\frac{450}{11}\right) \right]}{11} =$$

$$k_{r1} \cong 0,9284 \quad (34)$$

Činitel vinutí pro pátou harmonickou:

$$k_{v5} = \sin \frac{5 \cdot \pi \cdot 0,8485}{2} \cdot \frac{\sin\left(5 \cdot \frac{\pi}{6}\right)}{11 \cdot \sin\left(5 \cdot \frac{\pi}{6 \cdot 11}\right)} \cong 0,072 \quad (35)$$

Činitele vinutí pro sedmou až třináctou harmonickou:

$$k_{v7} = -0,013$$

$$k_{v11} = -0,079$$

$$k_{v13} = -0,078$$

[1,4]

## 2.2.2 Výpočet Essonova činitele a délky stroje

Essonův činitel:

$$C = \frac{\pi^2}{60 \cdot \sqrt{2}} \cdot A \cdot B_{\delta} \cdot k_{v1} = \frac{\pi^2}{60 \cdot \sqrt{2}} \cdot 70518 \cdot 0,9 \cdot 0,9284 \cong 6,853 \left[ \frac{kVA \cdot \min}{m^3 \cdot ot} \right] \quad (36)$$

Délka stroje byla odvozena z výkonové rovnice.

$$S = l_e \cdot n \cdot C \cdot D^2 \quad (37)$$

Efektivní délka stroje:

$$l_e = \frac{S}{C \cdot D^2 \cdot n} = \frac{25 \cdot 10^6}{6853 \cdot 4,3^2 \cdot 214} \cong 0,922 \quad (38)$$

Zvolené parametry magnetického obvodu statoru:

$$\begin{aligned} \text{Délka paketu} & \quad l_{pa}=51 \text{ mm} \\ \text{Šířka ventilačního kanálu} & \quad b_{vk}=10 \text{ mm} \end{aligned}$$

Počet 18 paketů byl zvolen na základě vztahu:

$$n_p = \frac{l_e}{l_{pa}} = \frac{0,922}{0,05} = 18,44 \quad (39)$$

Počet ventilačních kanálů:

$$n_{vk}=n_p-1=17 \quad (40)$$

Celková délka induktu:

$$L = l_e + b_{vk} \cdot n_{vk} = 0,922 + 0,01 \cdot 17 = 1,092 \text{ m} \quad (41)$$

Štíhlostní poměr:

$$\lambda = \frac{l_e}{t_p} = \frac{0,922}{0,482} \cong 1,911 \quad (42)$$

[1 str. 360]

[1,4]

### 2.2.3 Výpočet drážky statorového vinutí

Šířka zubu:

$$z_1 = \frac{B_\delta t_{d1}}{B'_{z1} k_{Fe}} = \frac{0,9 \cdot 0,05848}{1,8 \cdot 0,92} = 31,78 \text{ mm} \quad (43)$$

$$\text{Zvolená magnetická indukce v patě zubu} \quad B'_{z1}=1,8 \text{ T}$$

$$\text{činitel plnění železa} \quad k_{Fe}=0,92 \quad [4]$$

Šířka drážky:

$$b_d = t_{d1} - z_1 = 0,05848 - 0,03178 \cong 26,7 \text{ mm} \quad (44)$$

Šířka drážky byla zvolena  $b_d=27$  mm, což je poměrně vysoká hodnota, proto jsem zvolil drážku tvaru "M".

Přepočet šířky zubu:

$$z_1 = 0,5848 - 0,027 = 0,03148 \text{ m} \quad (45)$$

Magnetická indukce v zubu:

$$B_{z1} = \frac{B_{\delta} t_{d1}}{z_1 k_{Fe}} = \frac{0,9 \cdot 0,05848}{0,03148 \cdot 0,92} \cong 1,8173 \text{ T} \quad (46)$$

Parametry odečtené z tabulky pro M drážky: (viz. obrázek 1)

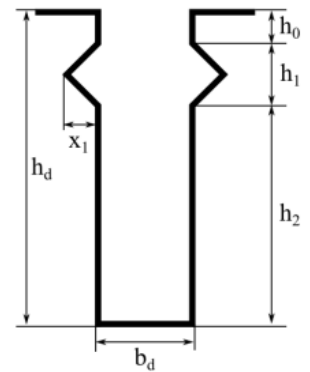
$$b_d = 27 \text{ mm}$$

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

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

$$x_1 = 2,45$$

$$\lambda_e = 0,31$$



Obrázek 1 Rozměry drážky M

Tabulka 1 Odhad proudové hustoty ve vodiči

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

Možná šířka izolovaných vodičů byla spočtena, jako rozdíl šířky drážky a přírůstku izolace.

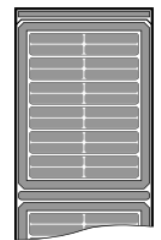
$$b'_{vli} = b_d - \delta_{id} = 27 - 7,56 = 19,4 \text{ mm} \quad (47)$$

Odhad proudové hustoty na základě tabulky (viz. tabulka 1):

$$\sigma_{Cu1} = \sqrt{\frac{K}{b_v}} = \sqrt{\frac{190}{19}} \cong 3,162 \text{ A mm}^{-2} \quad (48)$$

Odhad průřezu vodiče:

$$S'_{Cu1} = \frac{I_N}{a_{stř} \cdot \sigma_{Cu1}} = \frac{2405,63}{7 \cdot 3,162} \cong 108,675 \text{ mm}^2 \quad (49)$$



Obrázek 2 Znázornění uložení vodičů

Byla zvolena varianta s dvakrát dvěma vodiči 9,5 x 3 mm (viz. obrázek 2).

Tabulka 2 Řez drážkou vinutí induktu

Název	Šířka		Hloubka	
Vyložení drážky 1)	2 . 0,15	0,3	3 . 0,15	0,45
Izolace proti železu (trubka)	2 . ti	4,8	4 . ti	9,6
Tmelení	2 . 0,1	0,2	4 . 0,1	0,4
Stažení vodičů	2 . 0,15	0,3	4 . 0,15	0,6
Izolace závitů	2 . 0,48	0,96	2.nd.0,48	11,52
Izolace vodičů 2)	1 . j . 0,5	1	nd . i . 0,5	12
Mezivrstva	-	-	1 . mv	4
Vůle na šířku	0,2 až 0,6	0,44	-	-
Σizolace		7,56		38,57
Holý vodič	j . b	19	nd . i . hv	72
Vložka na dno	-	-	1 . 0,5	0,5
Vložka pod klín	-	-	1 . 0,5	0,5
Vůle na hloubku	-	-	0,4 až 2,0	1,43
Rozměr drážky bez klínu	bd	27	h2	113
Klín + můstek	-	-	h0 + h1	10
Konečný rozměr drážky	bd	27	hd	123

Skutečný průřez jednoho vodiče:

$$S_1 = 27,9 \text{ mm}^2$$

Výsledný průřez vodičů tvořícího jeden závit je:

$$S_{Cu1} = j \cdot i \cdot S_1 = 4 \cdot 27,9 = 111,6 \text{ mm}^2 \quad (50)$$

Skutečná proudová hustota:

$$\sigma_{Cu1} = \frac{I_1}{a_{st} \cdot S_{Cu1}} = \frac{2405,63}{7 \cdot 111,6} \cong 3,079 \text{ A mm}^{-2}. \quad (51)$$

Proudová hustota vyšla s rezervou cca.: 0,083 A mm<sup>-2</sup>

[4]

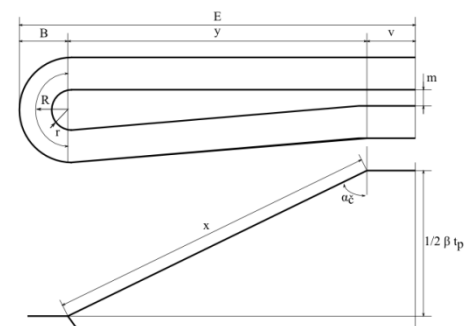
## 2.2.4 Odpor a rozptylová reaktance statorového vinutí

Úhel sklonu čel válcového vinutí:

$$\sin \alpha_\varepsilon = \frac{b_\varepsilon + c}{t_{d1}} = \frac{27 + 7}{58,48} \cong 0,5814 \quad (52)$$

$$\alpha_\varepsilon = \arcsin(0,5814) \cong 35,55^\circ \quad (53)$$

Šířka čel  $b_\varepsilon$  byla zvolena stejná, jako šířka drážky  $b_d$ .



Obrázek 3 Rozměry čela vinutí induktu

Vzdálenost mezi čely:

$$c = 4 + \frac{U [kV]}{2} = 4 + \frac{6}{2} = 7 \text{ mm} \quad (54)$$

Délka části čela mezi výběhem a okem:

$$x = \frac{\beta \cdot t_p}{2 \cos \alpha_\xi} = \frac{0,8485 \cdot 482}{2 \cdot \cos 35,55} \cong 251,6 \text{ mm} \quad (55)$$

Vzdálenost části mezi výběhem a okem:

$$y = \frac{\beta \cdot t_p}{2} \operatorname{tg} \alpha_\xi = \frac{0,8485 \cdot 0,482}{2} \operatorname{tg} 35,55 \cong 146 \text{ mm} \quad (56)$$

Poloměr oka:

$$R = \frac{h_2}{2} + r = \frac{113}{2} + 9,5 = 66 \text{ mm} \quad (57)$$

Délka oka:

$$o = \frac{\pi \cdot R}{2} = \frac{\pi \cdot 66}{2} \cong 104 \text{ mm} \quad (58)$$

Vnější poloměr oka:

$$B = R + \frac{h_2}{2} = 66 + \frac{113}{2} = 123 \text{ mm} \quad (59)$$

Vyložení čel:

$$E = v + y + B = 40 + 143,77 + 150,5 = 334,27 \text{ mm} \quad (334,27 - 354,27) \quad (60)$$

Délka čela:

$$l_\xi = 2(v + x + o) = 2(40 + 251,6 + 104) \cong 0,7905 \text{ m} \quad (61)$$

Délka vodiče:

$$l_v = L + l_\xi = 1,092 + 0,7905 = 1,882 \text{ m} \quad (62)$$

Výběh cívky z drážky „v“, závislý na napětí stroje, je určen podle tabulky (viz. tabulka 3).

Tabulka 3 Výběh z drážky

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

Elektrický odpor pro stejnosměrný proud (bez uvažování skinefektu):

$$R'_{1/20} = \rho_{Cu} \frac{2 \cdot l_v N_s}{a_{st} S_{Cu1}} = \frac{1}{56} \frac{2 \cdot 1,882 \cdot 66}{7 \cdot 111,6} \cong 0,00568 \Omega \quad (63)$$

Měrný odpor měděného vodiče při teplotě 20 °C  $\rho_{Cu}$

Náhradní výška vodiče  $\xi$  byla vypočtena kvůli zahrnutí vlivu povrchového jevu:

$$\xi = 2\pi h_v \sqrt{\frac{j b_v f}{b_d \rho}} 10^{-7} = 2 \cdot \pi \cdot 3 \sqrt{\frac{2 \cdot 9,5 \cdot 50}{27 \cdot \frac{1}{56}} \cdot 10^{-7}} \cong 0,2646 \quad (64)$$

Činitel zvýšení elektrického odporu:

$$k_{Cu} = \frac{g^2 - 0,2}{9} \xi^4 = \frac{24^2 - 0,2}{9} 0,2646^4 \cong 0,314 \quad (65)$$

Konstanta g reprezentuje celkový počet vodičů v drážce nad sebou:

$$g = i \cdot n_d = 2 \cdot 12 = 24 \quad (66)$$

Odpor při průchodu střídavého proudu a teplotě 20 °C:

$$R_{1/20} = (1 + k_{Cu}) \cdot R'_{1/20} = (1 + 0,314) \cdot 0,00568 \cong 7,46 \text{ m}\Omega \quad (67)$$

Odpor při 75 °C byl určen zjednodušeně, vynásobením konstantou 1,22:

$$R_{1/75} = 1,22 \cdot R_{1/20} = 1,22 \cdot 0,00746 = 9,11 \text{ m}\Omega \quad (68)$$

Procentní hodnota úbytku napětí na ohmickém odporu:

$$u_R = \frac{R_{1/75} I_1}{U_f} 100 = \frac{0,00911 \cdot 2405,626}{\frac{6000}{\sqrt{3}}} \cdot 100 \cong 0,632 \% \quad (69)$$

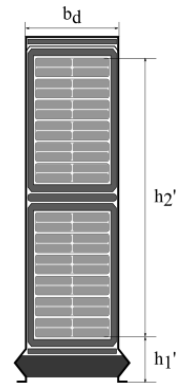
$h'_2$ .... vzdálenost krajních vláken vodičů v drážce

$h'_1$ .... vzdálenost horního krajního vodiče od kraje drážky

$b_d$  .... šířka drážky =  $b_1$

$$h'_1 = \frac{h_{vyl}}{3} + \frac{h_{tr} + h_t + h_{sv}}{4} + h_{izz} + h_{izv} + h_k + h_{rez} + h_0 + h_1 =$$

$$= \frac{0,15}{3} + \frac{9,6 + 0,4 + 0,6}{4} + 0,48 + 0,5 + 0,5 + 1,43 + 10 = 15,71 \text{ mm} \quad (70)$$



Obrázek 4 Schéma drážky

$$h'_2 = mv + (h_{izvc} - 2 \cdot h_{izv}) + (h_{izzc} - 2 \cdot h_{izz}) + \frac{h_{sv} + h_t + h_{tr}}{2} + \frac{h_{vyl}}{3} + n_d \cdot i \cdot h_v \quad (71)$$

$$= 4 + (12 - 2 \cdot 0,5) + (11,52 - 2 \cdot 0,48) + \frac{0,6 + 0,4 + 9,6}{2} + \frac{0,45}{3} + 12 \cdot 2 \cdot 0,5 = 103,01 \text{ mm}$$

Rozptylová indukčnost:

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

$$= \frac{(4 \cdot \pi)^2 \cdot 50 \cdot 66^2}{14 \cdot 2,5} \cdot 0,9 \cdot \left[ \left( \frac{103,01}{3 \cdot 27} + \frac{15,71}{27} \right) + \frac{0,7905}{0,922} \cdot 2,75 \cdot \right. \\ \left. \cdot \left( 0,187 + 0,166 \cdot \frac{0,482}{0,7905} \cdot 0,8485 \right) + \ln \left( 1 + \frac{\pi \cdot 31,48}{2 \cdot 27} \right) \right] \cdot 10^{-7}$$

$$X_\sigma \cong 0,291 \Omega$$

Procentní hodnota úbytku napětí na rozptylové reaktanci:

$$u_\sigma = \frac{X_\sigma I_1}{U_f} 100 = \frac{0,291 \cdot 2405,626}{\frac{6000}{\sqrt{3}}} \cdot 100 \cong 20,24\% \quad (73)$$

Procentní hodnota rozptylové reaktance odpovídá procentnímu úbytku napětí:

$$x_\sigma = u_\sigma \quad (74)$$

## 2.3 Návrh magnetického obvodu

### 2.3.1 Určení magnetického toku

Velikost magnetického toku byla určena z rovnice pro indukované napětí:

$$\Phi = \frac{U_f}{4,44 f N_s k_{v1}} = \frac{6000}{4,44 \cdot 50 \cdot 66 \cdot 0,9284} \cong 0,2547 \text{ Wb} \quad (75)$$

### 2.3.2 Velikost vzduchové mezery

$$\delta = k \frac{At_p}{B_\delta} \cdot \frac{10^{-6}}{x_d - x_\sigma} = 47 \cdot \frac{70518,8 \cdot 0,482}{0,9} \cdot \frac{10^{-6}}{98 - 20,24} \cong 0,02285 \text{ m} \quad (76)$$

Činitel závislý na tvaru pólového nástavce, Carterově činiteli atp.  $k = (43 \div 50)$ ,

Procentní hodnota nesyčené synchronní reaktance (viz. tabulka 4)  $x_d$

**Tabulka 4 Odhad procentní hodnoty podélné reaktance**

2p	2	4	6	8	10	12	16	20	24	28	40	56
$x_d$	200÷220	170	150	137	127	120	110	105	100	98	95	93

Vzduchová mezera byla zvolena:

$$\delta = 23 \text{ mm}$$

Změna velikosti mezery na okrajích pólových nástavců se provádí pro vylepšení tvaru průběhu indukce ve vzduchové mezeře:

$$\frac{\delta_{\max}}{\delta} = 1,5 \quad (77)$$

[4]



### 2.3.3 Magnetické napětí reakce kotvy

Pro stanovení magnetických napětí pole reakce kotvy bylo třeba nejprve určit činitel základní harmonické magnetické indukce ve vzduchové mezeře  $C_1$ . A také určit deformační činitele magnetického napětí v podélné  $C_{d1}$  i příčné ose  $C_{q1}$ . Činitelé byly určeny pomocí konstant odečtených z grafů (viz příloha VII). Konstanty jsou uvedeny v tabulce (viz. Tabulka 5).

**Tabulka 5 Deformační činitelé**

parametr	hodnota	parametr	hodnota	činitel	hodnota
a	1,2	e	0,814	$C_1$	1,1136
b	0,928	f	1,115	$C_{d1}$	0,9076
c	1,1	g	1,58	$C_{q1}$	0,5846
d	0,9496	h	0,37		

Pro odečítání z nomogramů byly stanoveny hodnoty:

$$\delta_{\max} / \delta = 1,5 \quad \delta / t_p = 0,0476 \quad \alpha = 0,75$$

Amplituda základní harmonické reakce kotvy:

$$F'_a = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{1}{C_1} A t_p k_{v1} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{1}{1,1136} \cdot 70518,8 \cdot 0,482 \cdot 0,9284 \cong 12767,876 \text{ A} \quad (78)$$

Amplituda základní harmonické složky magnetického napětí v podélném  $F_{d1}$  a v příčném  $F_{q1}$  směru:

$$F_{d1} = C_{d1} \cdot F'_a = 0,9076 \cdot 12767,876 = 11558,252 \text{ A} \quad (79)$$

$$F_{q1} = C_{q1} \cdot F'_a = 0,5846 \cdot 12767,876 = 7464,1 \text{ A} \quad (80)$$

[4]

### 2.3.4 Dimenzování magnetického obvodu

Výška pólu je zde odhadnuta činitelem 0,3. Dále bude upřesněna při návrhu budicího vinutí:

$$h_p = 0,3 \cdot t_p = 0,3 \cdot 0,482 = 0,145 \text{ m} \quad (81)$$

Výška pólového nástavce:

$$h_n = 0,1 \cdot t_p = 0,1 \cdot 0,482 = 0,048 \text{ m} \quad (82)$$

Šířka pólu:

$$b_p = \frac{(1+\nu) \cdot \Phi}{B_p L_p} = \frac{(1+0,15) \cdot 0,2547}{1,4 \cdot 1,092} = 0,2 \text{ m} \quad (83)$$

Činitel mezipólového rozptylového toku byl určen, jako střední odhad  $\nu = 0,15$ . Běžně se udává v rozmezí  $(0,1 \div 0,2)$ . Délka pólu zde odpovídá délce induktu včetně ventilačních kanálů  $L_p = L$ .

Šířka pólového nástavce:

$$b_n = \alpha \cdot t_p = 0,75 \cdot 0,482 \cong 0,362 \text{ m} \quad (84)$$

Délka rotoru, zvětšená s ohledem na prostor pro dosednutí budící cívky:

$$L_r = L_p + \Delta l = 1,092 + 0,088 = 1,180 \text{ m} \quad (85)$$

$$\text{Přírůstek délky} \quad \Delta l = 0,088 \text{ m}$$

Výška jhu rotoru:

$$h_{jr} = \frac{(1+\nu) \Phi}{2 \cdot B_{jr} \cdot L_r} = \frac{(1+0,15) \cdot 0,2547}{2 \cdot 1,1 \cdot 1,18} \cong 0,1177 \text{ m} \quad (86)$$

$$\text{Magnetická indukce ve jhu rotoru} \quad B_{jr} = 1,1 \text{ T}$$

Výška jádra induktu:

$$h_{js} = \frac{\Phi}{2 \cdot B_{js} \cdot k_{Fe} \cdot l_e} = \frac{0,2547}{2 \cdot 1,3 \cdot 0,92 \cdot 0,922} \cong 0,1155 \text{ m} \quad (87)$$

$$\text{Magnetická indukce ve jhu statoru} \quad B_{js} = 1,3 \text{ T}$$

$$\text{Činitel plnění železa} \quad k_{Fe} = 0,92 \quad [4]$$

### 2.3.5 Určení počtu segmentů plechů ve vrstvě statoru

Nejprve byly navrženy různé varianty počtů segmentů a vzájemně porovnány jejich parametry, jak je doporučeno v literatuře [1 str. 363]. Při 21 segmentech a 11 drážkách na segment nevycházela počet drážek na překlad. Z tohoto důvodu byla zvolena varianta se zlomkovým počtem segmentů na vrstvu, zde by přecházel vždy jeden segment do další vrstvy. Pak by však bylo nutné vyrábět atypické segmenty. To znamenalo návrat k původním 11 drážkám na segment, kde budou pro konstrukci vyrobeny dva typy plechů. Jeden typ bude mít dělicí rovinu v ose zubu, druhý pak v ose drážky.

Podle literatury [1], by bylo 21 segmentů nestandardně mnoho. V této publikaci však vůbec není počítáno s vnějším průměrem statoru  $D_e$  nad 3250 mm v mém případě je již vnitřní průměr  $D_1 = 4300$  mm.

Vnější průměr statoru:

$$D_e = D_1 + 2 \cdot h_d + 2 \cdot h_{js} = 4,3 + 2 \cdot 0,123 + 2 \cdot 0,1155 \cong 4,777 \text{ m} \quad (88)$$

Kontrola na velikost plechů, kvůli vystřížení, výpočtem délky tětiny H:

$$H = D_e \cdot \sin \frac{180}{s_{seg}} = 4,777 \cdot \sin \frac{180}{21} \cong 0,712 \text{ m} \quad (89)$$

[1]

### 2.3.6 Charakteristika naprázdno

Charakteristika na prázdno je závislost součtu magnetických napětí všech částí magnetického obvodu na procentuální velikosti napětí. Abych získal jednotlivá magnetická napětí, určil jsem nejprve délky středních siločar částí magnetického obvodu.

Pól:

$$l_p = h_p + h_n = 0,145 + 0,048 = 0,193 \text{ m} \quad (90)$$

Jho rotoru:

$$l_r = \frac{\pi [D_1 - 2(\delta + h_p + h_n)]}{4p} = \frac{\pi [4,3 - 2 \cdot (0,023 + 0,145 + 0,048)]}{4 \cdot 14} \cong 0,217 \text{ m} \quad (91)$$

Jádro induktu:

$$l_s = \frac{\pi [D_1 + 2(h_d + h_{js})]}{4p} = \frac{\pi [4,3 + 2 \cdot (0,123 + 0,1155)]}{4 \cdot 14} \cong 0,268 \text{ m} \quad (92)$$

S charakteristikou na prázdno se též kreslí charakteristika napětí na vzduchové mezeře. Většina magnetického napětí je soustředěna právě na vzduchovou mezeru. Pro výpočet magnetického napětí na vzduchové mezeře je potřeba nejprve určit Carterův činitel, jenž charakterizuje vliv změny vzduchové mezery na velikost magnetického napětí.

**Carterův činitel respektující vliv drážkování induktu  $k_{cd}$** 

$$\frac{b_0}{z_1} = \frac{27}{31,48} \cong 0,858 \quad (93)$$

$$\frac{b_0}{\delta} = \frac{27}{23} \cong 1,174 \quad (94)$$

Pro otevřenou drážku tvaru M platí  $b_o = b_d$ .

Z nomogramu (viz. příloha VIII) byl činitel určen:  $k_{cd} = 1,088$

**Carterův činitel respektující vliv radiálních ventilačních kanálů  $k_{ck}$** 

$$k_{ck} = \frac{1}{1 + \frac{\delta}{2 + \delta} \cdot \frac{b_{vk} \cdot n_{vk}}{l_e}} = \frac{1}{1 + \frac{23}{2 + 23} \cdot \frac{10 \cdot 17}{922}} \cong 0,9978 \quad (95)$$

Výsledná hodnota Carterova činitele:

$$k_c = k_{cd} \cdot k_{ck} = 1,088 \cdot 0,9978 = 1,0856 \quad (96)$$

Magnetické napětí na vzduchové mezeře:

$$F_\delta = \frac{1}{\mu_0} k_c \delta B_\delta = \frac{1}{4\pi \cdot 10^{-7}} \cdot 1,0856 \cdot 0,023 \cdot 0,9 \cong 17882,43 \text{ A} \quad (97)$$

Dále je třeba určit magnetické napětí v zubové vrstvě. Zde jsem uvažoval vliv tzv. odlehčení, kdy se zvyšováním sycení se stále více toku dostává do drážky a tím indukce v zubu nenarůstá konstantně. Proto jsem k určení skutečné indukce v zubu využil nomogramu (viz příloha IX). Nejprve jsem však musel získat hodnotu činitele odlehčení  $k_{zi}$ .

Upravená šířka zubu pro průměr  $D_i$ :

$$z_i = \frac{D_i \cdot \pi}{Q} - b_d \quad (98)$$

Příklad výpočtu Činitele odlehčení u vrcholu zubu:

$$k_{zi} = \frac{t_{di}}{z_i \cdot 0,92} - 1 = \frac{0,0585}{0,0332 \cdot 0,92} - 1 \cong 1,019 \quad (99)$$

Příklad výpočtu indukce u vrcholu zubu, bez odlehčení, pro 100% napětí:

$$B_{z1}' = \frac{B_{\delta} \cdot t_{d1}}{z_1 \cdot k_{Fe}} = \frac{0,9 \cdot 0,0585}{0,0315 \cdot 0,92} \cong 1,817 \text{ T} \quad (100)$$

Po odečtení "skutečné" indukce v dané části zubu byla určena intenzita magnetického pole  $H_{zi}$ , podle magnetizační charakteristiky plechů M350 (viz. příloha X). Po zjištění hodnot intenzity pole v jednotlivých úrovních zubů byla vždy stanovena souhrnná intenzita pomocí vyváženého průměru (101).

$$H_{zstr} = \frac{H_1 + 4 \cdot H_{z2} + H_{z3}}{6} \quad (101)$$

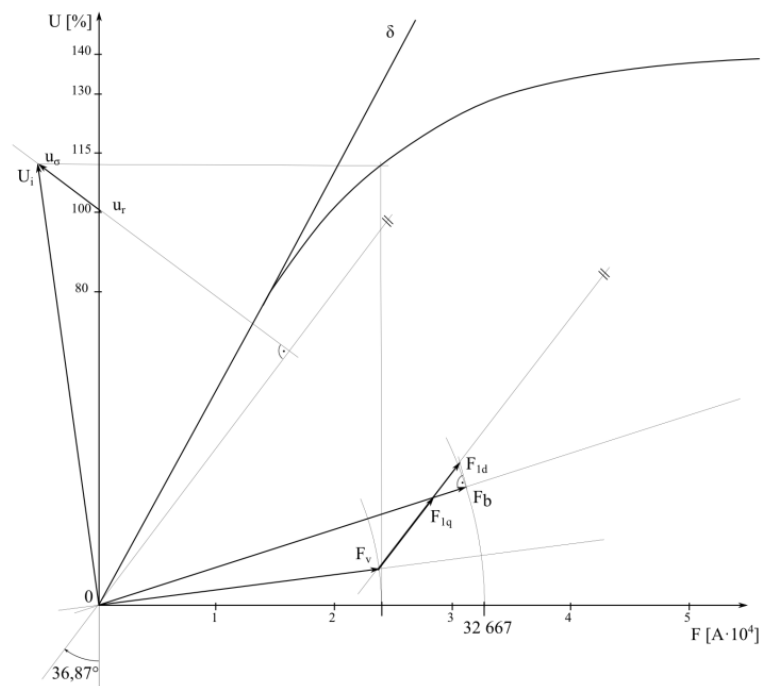
Jako střední délka siločar zde byla brána hloubka drážky, proto bylo magnetické napětí stanoveno podle vztahu (102).

$$F_z = H_{zstr} \cdot h_d \quad (102)$$

Podobně byla stanovena magnetická napětí ze zadaných indukcí i v ostatních částech magnetického obvodu. S tím rozdílem, že u součástí rotoru byla intenzita pole stanovena pomocí magnetizační charakteristiky pro použitou ocel (viz. příloha XI). Pro výpočet magnetického napětí pak byly využity stanovené délky středních siločar. Výsledky výpočtů jsou zapsány v tabulkách (viz. příloha XII).

Pro sestrojení charakteristiky na prázdko bylo nutné určit magnetická napětí pro různé procentuální hodnoty napětí statoru. Další hodnoty jsem získal tak, že jsem vždy indukci pro danou součást vynásobil odpovídajícím činitelem. Zde byla charakteristika sestrojena pro 80, 100, 115, 130 a 140% jmenovitého napětí. Po sestrojení charakteristiky jsem grafickým postupem (viz. příloha XIII) zjistil velikost budícího magnetického napětí  $F_b$  pro jmenovité zatížení a účinník.

$$F_b = 32666 \text{ A}$$



Obrázek 5 Charakteristika na prázdko

[4]

## 2.4 Návrh budicího vinutí

Přesahující část pólového nástavce určuje prostor pro vinutí:

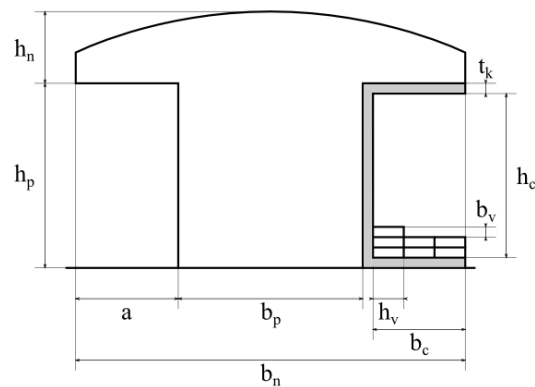
$$a = \frac{b_n - b_p}{2} = \frac{0,361 - 0,2}{2} \cong 0,081 \text{ m} \quad (103)$$

Šířka cívky je dále omezena zvolenou tloušťkou kostičky  $t_{kc} = 0,008 \text{ m}$ :

$$b_c = a - t_{kc} = 0,081 - 0,008 = 0,073 \text{ m} \quad (104)$$

Střední délka závitu cívky:

$$l_{bs} = 2(L_p + b_p + 2a) = 2(1,092 + 0,2 + 2 \cdot 0,081) \cong 2,908 \text{ m} \quad (105)$$



Obrázek 6 Rozměry pólu a vinutí

Pro menší průřez vodiče budicí cívky, bude cívka vícepolohová. Ve svém návrhu jsem postupoval tak, že jsem nejprve zvolil oboustrannou tloušťku izolace  $t_i = 0,0004 \text{ m}$  a poté určil rozměry holých a izolovaných vodičů tak, aby dobře vyplňovali prostor mezi pólovým nástavcem a jhem rotoru.

Tabulka 6 Rozměry vodiče vinutí rotoru

holý vodič	izolovaný vodič
$h_v = 0,023 \text{ m}$	$h_{vi} = 0,0234 \text{ m}$
$b_v = 0,009 \text{ m}$	$b_{vi} = 0,0094 \text{ m}$

Z rozměrů holého vodiče jsem určil průřez:

$$S_{Cub} = h_v \cdot b_v = 0,023 \cdot 0,009 = 207 \text{ mm}^2 \quad (106)$$

Dále jsem zvolil vhodnou proudovou hustotu  $\sigma_{Cub} = 4 \text{ A mm}^{-2}$  a tím jsem mohl určit maximální možný budicí proud  $I_b$ .

$$I_b = S_{Cub} \cdot \sigma_{Cub} = 207 \cdot 4 = 828 \text{ A} \quad (107)$$

Magnetické napětí potřebné k vybuzení daného indukovaného napětí pak udává počet závitů:

$$N_b = \frac{F_b}{I_b} = \frac{32666}{828} \cong 40 \quad (108)$$

Dále jsem vypočetl ostatní parametry vinutí tak, abych mohl upřesnit výšku pólu.

Počet poloh cívky:

$$n'_p = \frac{b_c}{h_{vi}} = \frac{0,073}{0,0234} \cong 3,119 \quad (109)$$

Počet poloh cívky jsem tedy zvolil  $n_p = 12$ .

Tloušťka cívky:

$$b_c = h_{vi} \cdot n_p = 0,0234 \cdot 3 \cong 0,0702 \text{ m} \quad (110)$$

Počet závitů v jedné poloze:

$$N'_{p1} = \frac{N_b}{n_p} = \frac{40}{3} \cong 13 \quad (111)$$

Výška budicí cívky:

$$h_c = N_{p1} b_{vi} = 13 \cdot 0,0094 \cong 0,122 \text{ m} \quad (112)$$

Nový rozměr výšky pólu:

$$h_p = h_c + 2t_k = 0,122 + 2 \cdot 0,008 = 0,138 \text{ m} \quad (113)$$

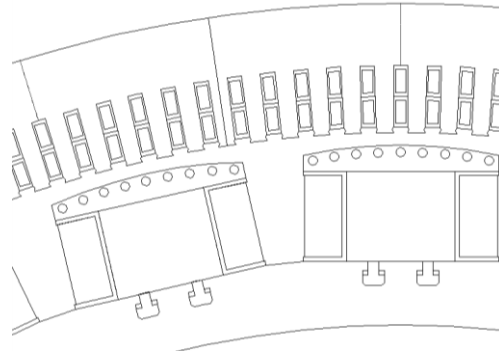
Z vypočtených parametrů lze již jednoduše určit odpor vinutí  $R_b$  a budicí napětí  $U_b$ .

$$R_b = \frac{2p \cdot N_b \cdot \rho_{Cu} \cdot l_{bs}}{S_{Cub} \cdot 0,9} = \frac{28 \cdot 40 \cdot \frac{1}{56} \cdot 2,9077}{207 \cdot 0,9} \cong 0,312 \Omega \quad (114)$$

$$U_b = I_b \cdot R_b = 828 \cdot 0,312 = 258 \text{ V}$$



Část příčného řezu strojem je zobrazena zde (viz. obrázek 7).



Obrázek 7 Výřez nákresu stroje

[4]

#### 2.4.1 Orientační výpočet oteplení budící cívky

Vnější obvod budící cívky:

$$l_{be} = 2 \left[ L_p + b_p + 4(b_c + t_k) \right] = 2 \left[ 1,092 + 0,2 + 4 \cdot (0,0702 + 0,008) \right] \cong 3,209 \text{ m} \quad (115)$$

Střední obvod budící cívky:

$$l_{bsi} = 2 \left[ L_p + b_p + 4 \left( \frac{b_c}{2} + t_k \right) \right] = 2 \left[ 1,092 + 0,2 + 4 \cdot \left( \frac{0,0702}{2} + 0,008 \right) \right] \cong 2,929 \text{ m} \quad (116)$$

Odpor všech cívek budícího vinutí:

$$R_{b/75} = 1,22 \cdot R_b = 1,22 \cdot 0,312 \cong 0,381 \Omega \quad (117)$$

Ztráty v budícím vinutí:

$$\Delta P_{Cub} = R_{b/75} \cdot I_b^2 = 0,381 \cdot 828^2 \cong 261088 \text{ W} \quad (118)$$

[4]

#### 2.4.2 Přenos budícího proudu na rotor:

Pro přenos budícího proudu na rotor jsem zvolil elektrografitové kartáče. V následující tabulce jsou shrnuty parametry kartáčů, které poskytuje výrobce.

Tabulka 7 Parametry kartáčů

Přechodové napětí	$u_{př}$ [V]	2,09
Maximální proudové zatížení	$\sigma_k$ [Amm <sup>-2</sup> ]	0,1
Maximální obvodová rychlost	$v_o$ [ms <sup>-1</sup> ]	40
Měrný tlak	$p_k$ [kPa]	18
Součinitel tření	$\mu$ [-]	0,15

Celkový průřez kartáčů jedné polaroty

$$S_k = \frac{I_b}{\sigma_k} = \frac{828}{0,1} = 8280 \text{ mm}^2 \quad (119)$$

Podle doporučených rozměrů kartáčů jsem zvolil rozměr  $b_k = 40 \text{ mm}$  a  $l_k = 40 \text{ mm}$ . Tomu při použití šesti kartáčů odpovídá průřez:

$$S_{k1} = b_k \cdot l_k \cdot n_k = 40 \cdot 40 \cdot 6 = 9600 \text{ mm}^2 \quad (120)$$

Délka v osovém směru stroje, která určuje šířku kroužku	$b_k$
Délka v obvodovém směru	$l_k$
Počet kartáčů jedné polaroty	$n_k$

Pro kontrolu proveditelnosti konstrukce a obvodové rychlosti kroužků jsem ještě provedl následující výpočty.

Průměr volného konce hřídele

$$d_H = 0,135 \sqrt[3]{\frac{P_{kW}}{n}} = 0,135 \sqrt[3]{\frac{20000}{214}} \cong 0,61 \text{ m} \quad (121)$$

Vnější průměr kroužků:

$$D_k = 1,3 \cdot d_H = 1,3 \cdot 0,61 = 0,8 \text{ m} \quad (122)$$

Obvodová rychlost kroužků:

$$v_k = \frac{\pi D_k n_{\max}}{60} = \frac{\pi \cdot 0,8 \cdot 257}{60} \cong 10,72 \text{ ms}^{-1} \quad (123)$$

Rychlost je menší než uvedená maximální hodnota  $40 \text{ ms}^{-1}$ .

Rozteč kartáčů:

$$t_k = \frac{\pi D_k}{2 \cdot \frac{S_k}{S_{k1}}} = \frac{\pi \cdot 0,8}{2 \cdot \frac{8280}{9600}} \cong 1,45 \text{ m} \quad (124)$$

Konstrukce je možná, rozteč kartáčů je výrazně větší, než je délka jednoho kartáče.

## 2.5 Ztráty a účinnost

Jouleovy ztráty ve vinutí statoru:

$$\Delta P_{Cu} = m R_{1/75} I_1^2 = 3 \cdot 0,0091 \cdot 2405,626^2 \cong 158031,18 \text{ W} \quad (125)$$

Jouleovy ztráty v budícím vinutí:

$$\Delta P_{Cub} = R_{b/75} \cdot I_b^2 = 0,381 \cdot 828^2 \cong 261088,2 \text{ W} \quad (126)$$

Pro výpočet ztrát v železe je třeba nejprve určit jeho hmotnost. Ve vzorci (127) se jedná o hmotnost jha induktu.

$$m_{Fej} = \frac{\pi}{4} (D_e^2 - D_s^2) l_e k_{Fe} \rho_{Fe} = \frac{\pi}{4} (4,777^2 - 4,5^2) \cdot 0,922 \cdot 0,92 \cdot 7650 \cong 10973,3 \text{ kg} \quad (127)$$

$$\text{Hustota materiálu plechů M350-50A} \quad \rho_{Fe} = 7650 \text{ Kg m}^{-3}$$

Ztráty v železe jádra induktu jsem tedy určil:

$$\Delta P_{Fej} = 2 \cdot \Delta p_{Fe} \cdot B_{js}^2 \left( \frac{f}{50} \right)^{1,3} m_{Fej} = 2 \cdot 1,8 \cdot 1,3^2 \cdot \left( \frac{50}{50} \right)^{1,3} \cdot 567,4 \cong 3452 \text{ W} \quad (128)$$

$$\text{Ztrátové číslo plechů} \quad \Delta p_{Fe} = 1,5 \text{ W/kg}$$

Hmotnost zubů statoru:

$$m_{Fez} = Q \cdot z_2 \cdot h_d \cdot l_e \cdot k_{Fe} \cdot \rho_{Fe} = 231 \cdot 0,0332 \cdot 0,123 \cdot 0,922 \cdot 0,92 \cdot 7650 \cong 6112,45 \text{ kg} \quad (129)$$

$$\text{Střední šířka zubu (viz. Příloha XII)} \quad z_2$$

Ztráty v zubech statoru:

$$\Delta P_{Fez} = 2 \cdot \Delta p_{Fe} \cdot B_{z2}^2 \cdot \left( \frac{f}{50} \right)^{1,3} \cdot m_{Fez} = 2 \cdot 1,5 \cdot 1,711 \cdot 1^{1,3} \cdot 6112,45 \cong 23714,7 \text{ W} \quad (130)$$

$$\text{Střední indukce v zubu (viz. Příloha XII)} \quad B_{z2}$$

Povrchové ztráty:

$$\begin{aligned} \Delta P_p &= \frac{\pi}{2} D_1 \alpha L_p k_0 \left( \frac{Qn}{10000} \right)^{1,5} (t_{d1} \cdot \beta \cdot 1000 \cdot B_\delta \cdot k_c)^2 = \\ &= \frac{\pi}{2} \cdot 4,3 \cdot 0,75 \cdot 1,092 \cdot 4,6 \cdot \left( \frac{231 \cdot 214}{10000} \right)^{1,5} \cdot (0,05848 \cdot 0,06 \cdot 1000 \cdot 0,9 \cdot 1,0856)^2 \cong 3287 \text{ W} \end{aligned} \quad (131)$$

Carterův činitel (96)

$k_c$

Činitele povrchových ztrát (viz. příloha XIV)

$\beta = 0,06$   $k_0 = 4,6$

Obvodová rychlost rotoru:

$$v = \frac{\pi D_1 n}{60} = \frac{\pi \cdot 4,3 \cdot 214}{60} = 48,2 \text{ ms}^{-1} \quad (132)$$

Mechanické ztráty:

$$\Delta P_m = v^{2,5} D_1 \sqrt{L_p} = 48,2^{2,5} \cdot 4,3 \cdot \sqrt{1,092} \cong 72407,22 \text{ W} \quad (133)$$

Přídavné ztráty:

$$\Delta P_{přid} = 0,003 \cdot S = 0,003 \cdot 25 \cdot 10^6 = 75000 \text{ W} \quad (134)$$

Celkové ztráty jsem poté určil jednoduše, jako součet všech ztrát:

$$\begin{aligned} \Delta P &= \Delta P_{Cu} + \Delta P_{Cub} + \Delta P_{Fej} + \Delta P_{Fez} + \Delta P_p + \Delta P_m + \Delta P_{přid} = 158031,18 + 261088,2 + \\ &+ 50071,2 + 23714,7 + 3287,02 + 72407,22 + 75000 \cong 643599,52 \text{ W} \end{aligned} \quad (135)$$

Účinnost:

$$\eta = 100 \left( \frac{P}{P + \Delta P} \right) = 100 \left( \frac{20000}{20000 + 643,59952} \right) \cong 96,88 \% \quad (136)$$

[1,4]

## 3 Tepelný výpočet

### 3.1 Úvod

Tepelný výpočet je určen ke stanovení oteplení jednotlivých částí stroje. Ověřujeme, zda teploty daných částí nepřesahují odolnost zvolené třídy izolace (viz tabulka).

**Tabulka 8 Třídy izolací**

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

Pokud bychom chtěli tepelný výpočet provést standardním způsobem, dostali bychom se na parciální diferenciální rovnice druhého řádu. Dané prostředí je nehomogenní a anizotropní, proto jsou zde tyto rovnice prakticky neřešitelné. Pro tepelný výpočet tedy používáme numerických metod či, jako v tomto případě, náhradních tepelných obvodů. Použití náhradních tepelných obvodů umožňuje změnu diferenciálních rovnic na rovnice diferenční a možnost použít zákonitosti platící analogicky v elektrických obvodech. Rozhodující je zde velikost prvků náhradního obvodu. Čím menší prvek, tím větší je počet uzlů náhradního obvodu, což znamená vyšší přesnost ale zároveň vyšší obtížnost řešení.

[4]

### 3.2 Oteplení induktu

Výpočet byl proveden pro část magnetického obvodu odpovídající jedné drážkové rozteči a polovině rozteče radiálního ventilačního kanálu. Při tomto výpočtu se uvažovala pouze drážková část vinutí. Nejprve byly určeny ztráty.

#### 3.2.1 Výpočet ztrát

Ztráty v drážkové části vinutí:

$$\Delta P_d = \Delta P_{Cu} \frac{L}{l_v} = 158031 \cdot \frac{1,092}{1,882} \cong 91672 \text{ W} \quad (137)$$

Ztráty v čelech vinutí:

$$\Delta P_\varepsilon = \Delta P_{Cu} \frac{l_\varepsilon}{l_v} = 158031 \cdot \frac{0,7905}{1,882} \cong 66359 \text{ W} \quad (138)$$

Ztráty v daném elementu – vinutí:

$$\Delta P_{d1} = \frac{\Delta P_d + \Delta P_{přid}}{2 \cdot Q \cdot n_p} = \frac{91672 + 75000}{2 \cdot 231 \cdot 18} \cong 20 \text{ W} \quad (139)$$

Ztráty v daném elementu – zub:

$$\Delta P_{z1} = \frac{\Delta P_{Fez}}{2 \cdot Q \cdot n_p} = \frac{23715}{2 \cdot 231 \cdot 18} \cong 2,85 \text{ W} \quad (140)$$

Ztráty v daném elementu - jádro induktu:

$$\Delta P_{j1} = \frac{\Delta P_{Fej}}{2 \cdot Q \cdot n_p} = \frac{50071}{2 \cdot 231 \cdot 18} \cong 6,02 \text{ W} \quad (141)$$

[4]

#### 3.2.2 Určení tepelných odporů

Nejprve byly určeny drážkové rozteče v daných hladinách.

Příklad výpočtu ve jhu:

$$S_{j2} = \frac{\pi \cdot \left( D_1 + h_d + \frac{h_{jr}}{2} \right)}{Q} = \frac{\pi \cdot \left( 4,3 + 0,123 + \frac{0,1177}{2} \right)}{231} \cong 0,061 \text{ m} \quad (142)$$

Příklad výpočtu rozteče v zubové části:

$$S_{z2} = \frac{\pi \cdot \left( D_1 + \frac{h_d}{4} \right)}{Q} - b_d = \frac{\pi \cdot \left( 4,3 + \frac{0,123}{4} \right)}{231} - 0,027 \cong 0,0319 \text{ m} \quad (143)$$

**Tabulka 9 Rozměry roztečí os drážek induktu**

Index	Hladina	Rozteč v zubu [m]	Hladina	Rozteč ve jhu [m]
S <sub>1</sub>	D <sub>1</sub>	0,0315	1/4h <sub>jr</sub>	0,0606
S <sub>2</sub>	1/4h <sub>d</sub>	0,0319	1/2h <sub>jr</sub>	0,061
S <sub>3</sub>	1/2h <sub>d</sub>	0,0323	3/4h <sub>jr</sub>	0,0614
S <sub>4</sub>	3/4h <sub>d</sub>	0,0327	h <sub>jr</sub>	0,0618

Rozteč ventilačních kanálů:

$$t_{vk} = l_{pa} + b_{vk} = 0,051 + 0,01 = 0,061 \text{ m} \quad (144)$$

Šířka izolace mezi vodičem a stěnou drážky:

$$\delta_{iz1} = \frac{b_d - b_v}{2} = \frac{0,027 - 0,0095}{2} \cong 0,0088 \text{ m} \quad (145)$$

Hloubka izolace mezi vodičem a vzduchovou mezerou:

$$\delta_{iz2} = h'_1 \cong 0,0157 \text{ m}$$

Nepřesnost uložení je, v závislosti na použité technologii a tloušťce izolace, zohledněna součtem vzduchových mezer mezi jednotlivými vrstvami. Nejčastěji bývá použita tloušťka

$$\delta_{vzd} = 0,0001 \text{ m}. \quad [4]$$

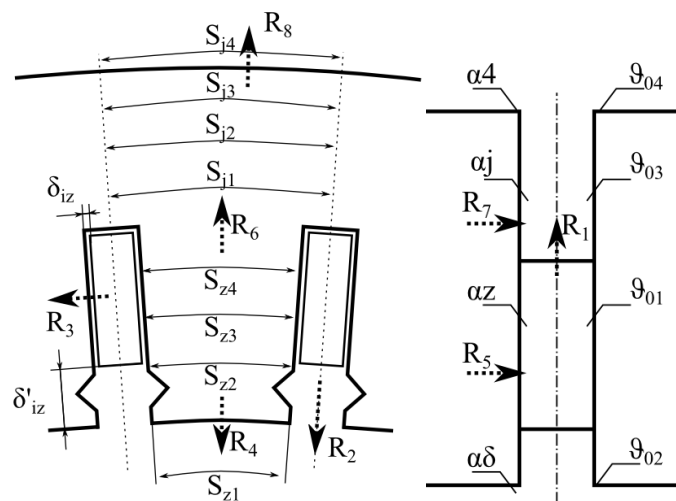
Obvod izolace v drážce:

$$O_{iz} = 2 \cdot h_2 + b_d = 2 \cdot 0,113 + 0,027 = 0,253 \quad (146)$$

Pro výpočet odporů byly podle předchozích zkušeností určeny konstanty měrné tepelné vodivosti  $\lambda$  a součinitele přestupu tepla  $\alpha$  (viz tabulka).

Značka	Popis	Hodnota [ $\text{W } ^\circ\text{C}^{-1}\text{m}^{-1}$ ]
$\lambda_{iz}$	hodnota pro izolaci	0,3
$\lambda_{vzd}$	vzduch pro 20°C	0,026
$\lambda_{Feq}$	plechový svazek v kolmém směru	1
$\lambda_{Fed}$	plechový svazek v podélném směru	40
Značka	Popis	Hodnota [ $\text{W } ^\circ\text{C}^{-1}\text{m}^{-2}$ ]
$\alpha_j$	jho - radiální ventilační kanál	60
$\alpha_z$	zub - radiální ventilační kanál	70
$\alpha\delta$	vzduchová mezera	80
$\alpha_s$	vnější poloměr statoru	66

[1,4]



Obrázek 8 Rozměry a tepelné odpory pro výpočet oteplení na induktu

Odpor z vinutí do ventilačního kanálu:

$$\begin{aligned}
 R_1 &= \frac{\delta_{iz1}}{\lambda_{iz} \cdot O_{iz} \cdot \frac{b_{vk}}{2}} + \frac{\delta_{vzd}}{\lambda_{vzd} \cdot O_{iz} \cdot \frac{b_{vk}}{2}} + \frac{1}{\alpha_z \cdot O_{iz} \cdot \frac{b_{vk}}{2}} = \\
 &= \frac{0,00875}{0,3 \cdot 0,253 \cdot \frac{0,01}{2}} + \frac{0,0001}{0,026 \cdot 0,253 \cdot \frac{0,01}{2}} + \frac{1}{70 \cdot 0,253 \cdot \frac{0,01}{2}} \cong 37,39 \text{ } ^\circ\text{CW}^{-1}
 \end{aligned} \tag{147}$$



Odpor z vinutí do vzduchové mezery:

$$R_2 = \frac{\delta_{iz2}}{\lambda_{iz} \cdot b_d \cdot \frac{t_{vk}}{2}} + \frac{\delta_{vzd}}{\lambda_{vzd} \cdot b_d \cdot \frac{t_{vk}}{2}} + \frac{1}{\alpha_\delta \cdot b_d \cdot \frac{t_{vk}}{2}} = \quad (148)$$

$$= \frac{0,0157}{0,3 \cdot 0,027 \cdot \frac{0,061}{2}} + \frac{0,0001}{0,026 \cdot 0,027 \cdot \frac{0,061}{2}} + \frac{1}{80 \cdot 0,027 \cdot \frac{0,061}{2}} \cong 83,44 \text{ } ^\circ\text{CW}^{-1}$$

Odpor z vinutí do zubu:

$$R_3 = \frac{\delta_{iz1}}{\lambda_{iz} \cdot O_{iz} \cdot \frac{l_{pa}}{2}} + \frac{\delta_{vzd}}{\lambda_{vzd} \cdot O_{iz} \cdot \frac{l_{pa}}{2}} + \frac{\frac{S_{z3}}{2}}{3 \cdot \lambda_{Fed} \cdot O_{iz} \cdot \frac{l_{pa}}{2}} = \quad (149)$$

$$= \frac{0,0088}{0,3 \cdot 0,253 \cdot \frac{0,051}{2}} + \frac{0,0001}{0,026 \cdot 0,253 \cdot \frac{0,051}{2}} + \frac{\frac{0,0323}{2}}{3 \cdot 40 \cdot 0,253 \cdot \frac{0,051}{2}} \cong 5,14 \text{ } ^\circ\text{CW}^{-1}$$

Odpor ze zubu do vzduchové mezery:

$$R_4 = \frac{\frac{h_z}{2}}{3 \cdot \lambda_{Fed} \cdot S_{z2} \cdot \frac{l_{pa}}{2}} + \frac{1}{\alpha_\delta \cdot S_{z1} \cdot \frac{l_{pa}}{2}} = \frac{\frac{0,123}{2}}{3 \cdot 40 \cdot 0,0319 \cdot \frac{0,051}{2}} + \frac{1}{80 \cdot 0,0315 \cdot \frac{0,051}{2}} \cong 16,2 \text{ } ^\circ\text{CW}^{-1} \quad (150)$$

Odpor ze zubu do ventilačního kanálu:

$$R_5 = \frac{\frac{l_{pa}}{2}}{3 \cdot \lambda_{Feq} \cdot S_{z3} \cdot h_z} + \frac{1}{\alpha_z \cdot S_{z3} \cdot h_z} = \frac{\frac{0,051}{2}}{3 \cdot 1 \cdot 0,0323 \cdot 0,123} + \frac{1}{70 \cdot 0,0323 \cdot 0,123} \cong 5,73 \text{ } ^\circ\text{CW}^{-1} \quad (151)$$

Odpor z plechů zubu do plechů jádra:

$$R_6 = \frac{\frac{h_z}{2}}{3 \cdot \lambda_{Fed} \cdot S_{z4} \cdot \frac{l_{pa}}{2}} + \frac{\frac{h_{js}}{2}}{3 \cdot \lambda_{Fed} \cdot S_{j1} \cdot \frac{l_{pa}}{2}} = \frac{\frac{0,123}{2}}{3 \cdot 40 \cdot 0,0327 \cdot \frac{0,051}{2}} + \frac{\frac{0,1155}{2}}{3 \cdot 40 \cdot 0,0606 \cdot \frac{0,051}{2}} \cong 0,93 \text{ } ^\circ\text{CW}^{-1} \quad (152)$$

Odpor z plechů jádra do ventilačního kanálu:

$$R_7 = \frac{\frac{l_{pa}}{2}}{3 \cdot \lambda_{Feq} \cdot S_{j2} \cdot h_{js}} + \frac{1}{\alpha_j \cdot S_{j2} \cdot h_{js}} = \frac{\frac{0,051}{2}}{3 \cdot 1 \cdot 0,061 \cdot 0,1155} + \frac{1}{60 \cdot 0,061 \cdot 0,1155} \cong 3,58 \text{ } ^\circ\text{CW}^{-1} \quad (153)$$

Odpor z plechů jádra na vnější obvod jádra statoru:

$$R_8 = \frac{\frac{h_{js}}{2}}{3 \cdot \lambda_{Fed} \cdot S_{j3} \cdot \frac{l_{pa}}{2}} + \frac{1}{\alpha_s \cdot S_{j4} \cdot \frac{l_{pa}}{2}} = \frac{0,1155}{2} + \frac{1}{66 \cdot 0,0618 \cdot \frac{0,051}{2}} \cong 9,93 \text{ } ^\circ\text{CW}^{-1} \quad (154)$$

[4]

### 3.2.3 Výpočet oteplení chladiva na statoru

Průtočné množství chladiva  $Q$  bylo určeno z celkových ztrát, zmenšených o ventilační ztráty.

$$Q = \frac{\Delta P - \Delta P_m}{c_v \cdot \Delta \vartheta} = \frac{695379 - 72407}{1250 \cdot 20} \cong 24,92 \text{ m}^3\text{s}^{-1} \quad (155)$$

Do statoru se dostanou zhruba dvě třetiny celkového množství chladiva  $Q_s$ . Zbývající chladivo proudí kolem čel vinutí.

$$Q_s = \frac{2}{3} \cdot Q = \frac{2}{3} \cdot 24,92 \cong 16,613 \text{ m}^3\text{s}^{-1} \quad (156)$$

Pro výpočet oteplení od rotoru je třeba určit příslušné ztráty  $\Delta P_r$ .

$$\Delta P_r = \Delta P_{Cub} + \Delta P_p = 313306 + 2849 = 316155 \text{ W} \quad (157)$$

Teplota vstupujícího chladicího média

$$\vartheta_{vst} = 40 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Oteplení ve vzduchové mezeře

$$\vartheta_\delta = \vartheta_{vst} + \frac{\Delta P_r}{c_v \cdot Q_s} = 40 + \frac{316155}{1250 \cdot 16,613} \cong 13,89 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (158)$$

Oteplení od zubu kanálu

$$\vartheta_1 = \vartheta_\delta + \frac{\Delta P_{Fez} + \Delta P_{Cud}}{2 \cdot c_v \cdot Q_s} = 13,89 + \frac{23715 + 158031}{2 \cdot 1250 \cdot 16,61} \cong 18,66 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (159)$$

Oteplení od jádra induktu

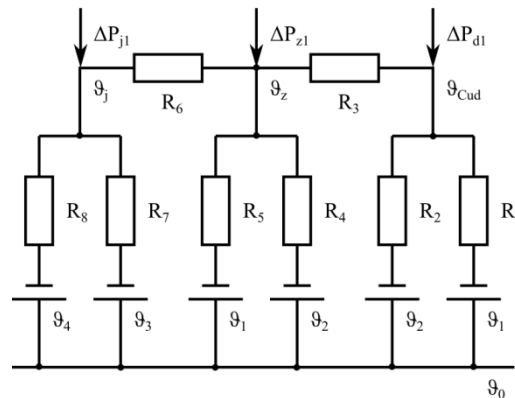
$$\vartheta_2 = \vartheta_\delta + \frac{\Delta P_{Fez} + \Delta P_{Cud} + \frac{1}{2} \Delta P_{Fej}}{c_v \cdot Q_s} = 13,89 + \frac{23715 + 158031 + \frac{50071}{2}}{1250 \cdot 16,61} \cong 24,75 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (160)$$

Oteplení na výstupu z kanálu

$$\vartheta_3 = \vartheta_\delta + \frac{\Delta P_{Fez} + \Delta P_{Cud} + \Delta P_{Fej}}{c_v \cdot Q_s} = 13,89 + \frac{23715 + 158031 + 50071}{1250 \cdot 16,61} \cong 26,06 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (161)$$

### Řešení náhradního tepelného obvodu

Nejprve byl sestaven náhradní tepelný obvod vybraného úseku induktu (viz. obrázek 9). Poté bylo třeba určit zbývající teploty v uzlech schématu. Za tímto účelem byla sestavena soustava tří lineárních rovnic o třech neznámých.



Obrázek 9 Náhradní tepelný obvod

$$\Delta P_{d1} = \frac{\vartheta_{cud} - \vartheta_1}{R_1} + \frac{\vartheta_{cud} - \vartheta_\delta}{R_2} + \frac{\vartheta_{cud} - \vartheta_z}{R_3} = \quad (162)$$

$$20,04 = \frac{\vartheta_{cud} - 58,66}{37,39} + \frac{\vartheta_{cud} - 53,89}{83,44} + \frac{\vartheta_{cud} - \vartheta_z}{5,14}$$

$$\Delta P_{z1} = \frac{\vartheta_z - \vartheta_{cud}}{R_3} + \frac{\vartheta_z - \vartheta_\delta}{R_4} + \frac{\vartheta_z - \vartheta_1}{R_5} + \frac{\vartheta_z - \vartheta_j}{R_6} = \quad (163)$$

$$2,85 = \frac{\vartheta_z - \vartheta_{cud}}{5,14} + \frac{\vartheta_z - 53,89}{16,2} + \frac{\vartheta_z - 58,66}{5,73} + \frac{\vartheta_z - \vartheta_j}{0,93}$$

$$\Delta P_{j1} = \frac{\vartheta_j - \vartheta_z}{R_6} + \frac{\vartheta_j - \vartheta_2}{R_7} + \frac{\vartheta_j - \vartheta_3}{R_8} = \quad (164)$$

$$6,02 = \frac{\vartheta_j - \vartheta_z}{0,93} + \frac{\vartheta_j - 64,75}{3,58} + \frac{\vartheta_j - 66,06}{9,93}$$

Výpočet soustavy byl proveden za pomoci software.

$$\vartheta_{Cud} \cong 182,96 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\vartheta_z \cong 105,02 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\vartheta_j \cong 98,74 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Odpovídající hodnoty oteplení pak získáme, pokud odečteme danou teplotu chladicího média na vstupu.

$$\Delta\vartheta_{Cud} = \vartheta_{Cud} - \vartheta_{vst} = 182,96 - 40 = 122,96 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (165)$$

$$\Delta\vartheta_z = \vartheta_z - \vartheta_{vst} = 105,02 - 40 = 65,02 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (166)$$

$$\Delta\vartheta_j = \vartheta_j - \vartheta_{vst} = 98,74 - 40 = 58,74 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (167)$$

Podle tabulky (viz. tabulka 8) by tedy pro vinutí statoru přicházela v úvahu pouze izolace třídy H.

[4]

### 3.3 Výpočet oteplení čel vinutí

Pro výpočet oteplení čel byly nejprve stanoveny ztráty v čelech vinutí (138). Počet čel vinutí je zde stejný, jako počet drážek induktu. Ztráty v jedné cívce  $\Delta P_{\epsilon 1}$ , potřebné pro další výpočet tedy stanovíme (168).

$$\Delta P_{\epsilon 1} = \frac{\Delta P_{\epsilon}}{Q_{\epsilon}} = \frac{\Delta P_{\epsilon}}{Q} = \frac{66359,4}{231} \cong 287,27 \text{ W} \quad (168)$$

Dále je nutné stanovit tepelný odpor mezi vodičem čel a okolím  $R_{\epsilon}$ . Pro tento výpočet jsou použity některé konstanty z předchozího výpočtu. Dále je zde zavedena konstanta zohledňující zakrytí čel vlastní konstrukcí. Konstrukce čel není v rámci tohoto návrhu řešena, proto byla konstanta  $k = 0,8$  zohledněna alespoň pro nejnižší vliv na ochlazovací plochu. Délka čel byla převzata z předchozích výpočtů a obvod čel  $O_{\epsilon}$  byl vypočten dle vztahu (169).

[4]

$$O_{\epsilon} = 2 \cdot b_d + 2 \cdot h_2 = 2 \cdot 0,027 + 2 \cdot 0,113 = 0,28 \text{ m} \quad (169)$$

$$R_{\epsilon} = \frac{\delta_{iz1}}{\lambda_{iz} \cdot O_{\epsilon} \cdot l_{\epsilon}} + \frac{\delta_{vzd}}{\lambda_{vzd} \cdot O_{\epsilon} \cdot l_{\epsilon}} + \frac{1}{\alpha_{\epsilon} \cdot k \cdot O_{\epsilon} \cdot l_{\epsilon}} =$$

$$= \frac{0,00875}{0,3 \cdot 0,28 \cdot 0,7905} + \frac{0,0001}{0,026 \cdot 0,28 \cdot 0,7905} + \frac{1}{70 \cdot 0,8 \cdot 0,28 \cdot 0,7905} \cong 0,2298 \text{ } \Omega \quad (170)$$

Do prostoru čel vstupuje vzduch již ohřátý od budicího vinutí. Abychom určili teplotu vstupujícího vzduchu  $\vartheta_{0c}$ , musíme nejprve stanovit jeho množství  $Q_{vzč}$ , jako rozdíl celkového množství a množství chladiva, proudícího do statoru (171). Hustota vzduchu  $\rho = 1,2759$ , je konstantou.

$$Q_{vzč} = Q - Q_s = 22,848 - 15,232 \cong 7,616 \text{ m}^3\text{s}^{-1} \quad (171)$$

$$\vartheta_{0c} = \frac{\Delta P_{Cub}}{\frac{\rho}{2} \cdot 1100 \cdot Q_{vzč}} + \vartheta_{vst} = \frac{261088,198}{\frac{1,2759}{2} \cdot 1100 \cdot 7,616} + 40 \cong 89 \text{ }^\circ\text{C}$$

Teplota čel vinutí

$$\vartheta_c = \Delta P_{c1} \cdot R_c + \vartheta_{0c} = 287,27 \cdot 0,2298 + 89 \cong 155 \text{ }^\circ\text{C} \quad (172)$$

Oteplení čel vinutí

$$\Delta \vartheta_c = \vartheta_c - \vartheta_{vst} = 155 - 40 \cong 115 \text{ }^\circ\text{C} \quad (173)$$

Oteplení na čelech cívek je tedy o něco nižší, než oteplení v drážkové části. Izolace třídy H tedy bude dostatečná i zde. [4]

### 3.4 Výpočet oteplení chladiva na rotoru

Ochlazovací povrch všech cívek:

$$O_{2pc} = h_c \cdot l_{be} \cdot 2p = 0,125 \cdot 3,209 \cdot 28 \cong 11,263 \text{ m}^2 \quad (174)$$

Ochlazovací povrch do magnetického obvodu:

$$O_{2pcm} = (2h_c + 2b_c) \cdot l_{be} \cdot 2p = (2 \cdot 0,125 + 2 \cdot 0,073) \cdot 3,209 \cdot 28 \cong 35,58 \text{ m}^2 \quad (175)$$

Oteplení budicí cívky získáme, pokud vydělíme ztráty v budicím vinutí součtem převrácených hodnot odporu pro přestup tepla do vzduchové mezery  $R_{vzd}$  a odporu pro přestup tepla do magnetického obvodu rotoru  $R_{iz}$ . Pro přesnější výsledky by bylo potřeba opět sestavit podrobnější síť.

$$\Delta \vartheta_{Cub} = \frac{\Delta P_{Cub}}{\left( \frac{1}{R_{vzd}} + \frac{1}{R_{iz}} \right)} = \frac{\Delta P_{Cub}}{\alpha_b \cdot O_{2pc} + \frac{\lambda_{iz} \cdot O_{2pcm}}{t_k}} = \frac{261088}{150 \cdot 11,263 + \frac{0,3 \cdot 35,58}{0,008}} \cong 86,35 \text{ }^\circ\text{C} \quad (176)$$

Součinitel přestupu tepla  $\alpha_b = 150 \text{ W/}^\circ\text{Cm}^2$  jsme určili podle grafu (viz. Příloha XV)[4], kde rychlost proudícího vzduchu kolem cívky lze uvažovat (177).

$$v = \frac{\pi D_1 n}{60} = \frac{\pi \cdot 4,3 \cdot 214}{60} \cong 48 \text{ ms}^{-1} \quad (177)$$

Teplota byla určena obdobně, jako v předešlých výpočtech.

$$\vartheta_{Cub} = \Delta\vartheta_{Cub} + \vartheta_{vst} = 86,35 + 40 = 126,35 \text{ }^\circ\text{C} \quad (178)$$

Vypočteným údajům odpovídá použití izolace třídy F.

[4]

## 4 Ověření parametrů metodou konečných prvků

### 4.1 Určení parametrů náhradního schématu a výpočet momentové charakteristiky

Úkolem pro výpočet problému metodou konečných prvků (dále MKP), je přibližně ověřit správnost manuálního výpočtu. Aby to bylo možné, bylo nutné dané parametry z výpočtu nejprve odvodit, přitom hodnoty indukce a toku byly již určeny.

#### Magnetizační proud

Pro výpočet indukčností pomocí MKP je potřeba určit magnetizační proud. Lze z něj také jednoduše vypočítat podélnou reaktanci.

$$I_{\mu} = \frac{F_{0N} \cdot \pi \cdot p}{\sqrt{2} \cdot m \cdot N_s \cdot k_{v1}} = \frac{19349 \cdot \pi \cdot 14}{\sqrt{2} \cdot 3 \cdot 66 \cdot 0,9284} \cong 3273,67 \text{ A} \quad (179)$$

#### Indukčnosti a reaktance

Nejprve byla odvozena hlavní reaktance ze vztahu (180), kde bylo dosazeno za indukované napětí.

$$X_h = \frac{\sqrt{2} \cdot U_i}{I_m} = \frac{4 \cdot m \cdot \mu_0 \cdot t_p \cdot l_e \cdot f \cdot I_m}{\pi \cdot \delta' \cdot p \cdot I_m} \cdot (N_s \cdot k_{v1})^2 = \frac{4 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 10^{-7} \cdot 0,482 \cdot 0,922 \cdot 50}{0,02497 \cdot 14} \cdot (66 \cdot 0,9284)^2 \cong 1,147 \text{ } \Omega \quad (180)$$

[3 str. 88]

Poté již bylo možné vypočítat podélnou a příčnou složku synchronní reaktance za pomoci činitelů  $C_{d1}$  a  $C_{q1}$  (viz. Tabulka 5).

$$X_{ad} = X_h \cdot C_{d1} = 1,147 \cdot 0,9076 \cong 1,041 \text{ } \Omega \quad (181)$$

$$X_{aq} = X_h \cdot C_{q1} = 1,147 \cdot 0,5846 \cong 0,67 \text{ } \Omega \quad (182)$$

Celkovou podélnou a příčnou složku získáme přičtením rozptylové reaktance.

$$X_d = X_{ad} + X_{\sigma} = 1,041 + 0,291 = 1,332 \text{ } \Omega \quad (183)$$

$$X_q = X_{aq} + X_{\sigma} = 0,67 + 0,291 = 0,962 \text{ } \Omega \quad (184)$$

[3 str. 161]

Dalším krokem byl přepočít reakťance na indukčnost.

$$L_d = \frac{X_{ad}}{\omega_s} = \frac{1,041}{2 \cdot \pi \cdot 50} \cong 0,00331 \text{ H} \quad (185)$$

$$L_q = \frac{X_{aq}}{\omega_s} = \frac{0,67}{2 \cdot \pi \cdot 50} \cong 0,00213 \text{ H} \quad (186)$$

Pro ověření rozptylové reakťance a indukčnosti bylo nejprve potřeba vypočítat samostatně drážkovou část reakťance.

$$\begin{aligned} X_\sigma &= \frac{(4\pi)^2 f N_s^2}{pq} l_e \left[ \left( \frac{h_2}{3b_d} + \frac{h_1}{b_d} \right) + \ln \left( 1 + \frac{\pi z_1}{2b_d} \right) \right] 10^{-7} = \\ &= \frac{(4 \cdot \pi)^2 \cdot 50 \cdot 66^2}{14 \cdot 2,5} \cdot 0,9 \cdot \left[ \left( \frac{103,01}{3 \cdot 27} + \frac{15,71}{27} \right) + \ln \left( 1 + \frac{\pi \cdot 31,48}{2 \cdot 27} \right) \right] \cdot 10^{-7} \cong 0,238 \Omega \end{aligned} \quad (187)$$

[4]

Odpovídající rozptylová indukčnost:

$$L_{\sigma d} = \frac{X_{\sigma d}}{\omega_s} = \frac{0,238}{2 \cdot \pi \cdot 50} \cong 0,759 \cdot 10^{-3} \text{ H} \quad (188)$$

### Momentová charakteristika

Momentovou charakteristiku synchronních strojů definujeme, jako závislost momentu na zátěžném úhlu  $\beta$ . Zátěžný úhel udává zpoždění napětí, indukovaného do statoru polem rotoru, za napětím statoru. Vztah pro okamžitou hodnotu momentu byl odvozen ze vztahu (189).

$$M = \frac{m \cdot U \cdot I_\xi}{\omega_s} \quad (189)$$

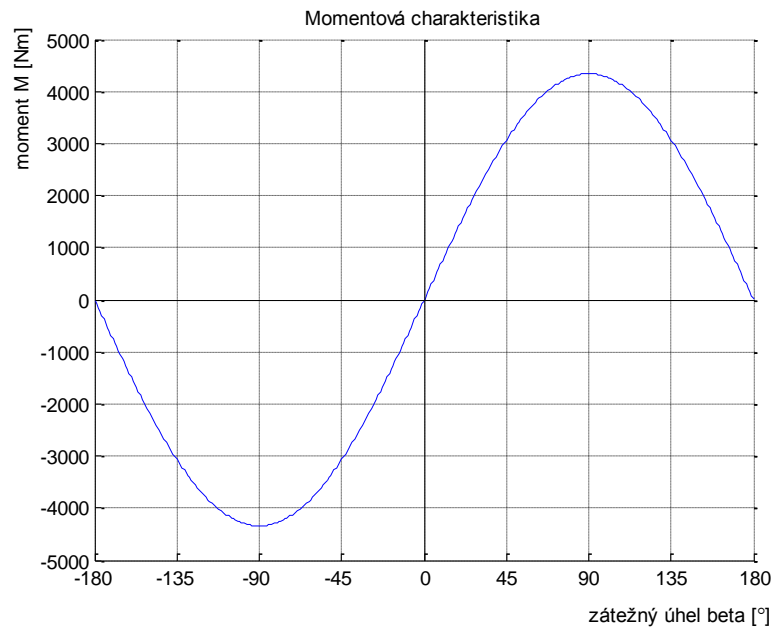
Pokud do vztahu dosadíme za činný proud  $I_\xi$  získáme vztah (190). Vztah pro činnou složku proudu lze získat odvozením z fázorového diagramu.

$$M = \frac{p \cdot m \cdot U}{\omega_s} \cdot \left[ \frac{Uib}{Xd} \cdot \sin \beta + \frac{U}{2} \cdot \left( \frac{1}{Xq} - \frac{1}{Xd} \right) \cdot \sin 2\beta \right] \quad (190)$$

[3 str. 137]

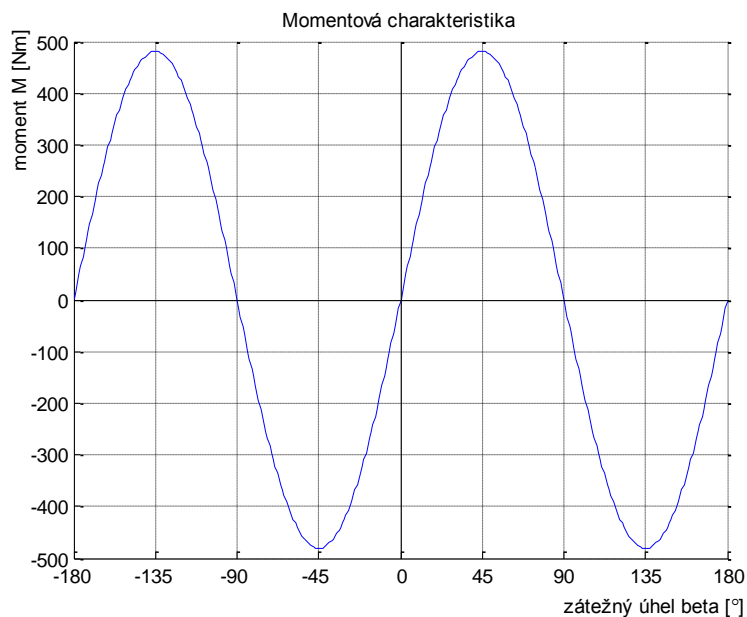


Pro výpočet a zobrazení momentové charakteristiky byl použit program Matlab. Pro zvýraznění nulových os byl použit skript [6]. Výrazy před siny v závorce představují amplitudy složek momentu. První složka (viz. Obrázek 10) odpovídá momentu stroje s hladkým rotorem.



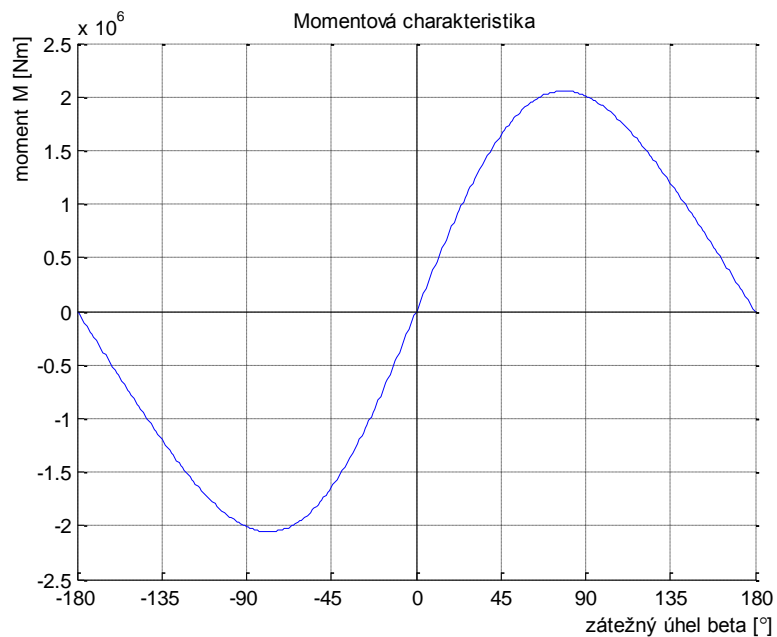
Obrázek 10 Hlavní složka momentu

Složka s dvojnásobkem zátěžného úhlu vzniká vlivem vyjádřených pólů, změnou vzduchové mezery. Tuto složku nazýváme reluktančním momentem (viz. Obrázek 11).



Obrázek 11 Reluktanční složka momentu

Složení těchto dvou průběhů pak vzniká výsledná momentová charakteristika (viz. Obrázek 12).



Obrázek 12 Momentová charakteristika

Ze základního vzorce (191) jsem určil jmenovitý moment  $M_n$ . Pracovní bod by tedy na této charakteristice ležel zhruba v polovině.

$$M_n = \frac{S}{\omega s} = \frac{25 \cdot 10^6}{2\pi \cdot 50} \cong 1,1156 \cdot 10^6 \text{ Nm} \quad (191)$$

[3 str. 138]

## 4.2 Výpočet v programu FEMM, import modelu

### 4.2.1 Funkce programu FEMM

FEMM v současné verzi umožňuje řešení dvojrozměrných úloh v polích magnetických, magnetostatických, elektrostatických a tepelných toků v ustáleném stavu. Řešení harmonických magnetických polí, které bylo využito v této práci, vychází z Maxwellových rovnic a vede k soustavě parciálních diferenciálních rovnic. Metoda konečných prvků takovýto problém výrazně zjednoduší rozdělením objektů na elementy trojúhelníkového tvaru. To umožňuje převod problému na soustavu obyčejných lineárních rovnic o mnoha (desítkách tisíc) neznámých. V rámci jednotlivých elementů je řešení aproximováno lineární interpolací.

FEMM je v podstatě balíček programů, z nichž každý přebírá funkci při řešení určitého problému, nebo jeho části. Umožňuje ruční vkládání geometrie i import a export hotových nákresů ve formátu DXF. Výhodnou je možnost použití jazyka Lua pro vytváření skriptů, které mohou urychlit práci automatizováním některých operací. Pro pokročilejší uživatele se zde také nabízí možnost přímého zásahu do vlastního zdrojového kódu, kde lze změnit parametry definované geometrie, vlastností materiálů, obvodů atp.

[5]

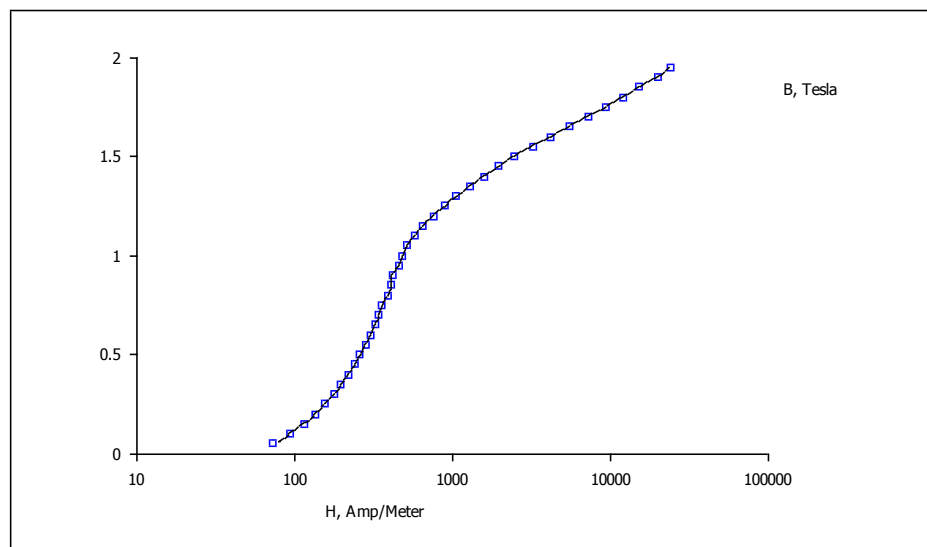
### 4.2.2 Definování problému

V první řadě byl vytvořen nákres, pro tento účel byl použit dvourozměrný CAD program. Ruční vkládání geometrie přímo do programu FEMM by bylo, vzhledem ke složitosti úlohy příliš náročné. Při vytváření nákresu byly v CAD programu vytvořeny tzv. skupiny objektů, kvůli ušetření práce při opakování stejných prvků v nákresu. Při importu pak vznikly nežádoucí kopie prvků těchto skupin uprostřed nákresu, které je možné jednoduše odstranit.

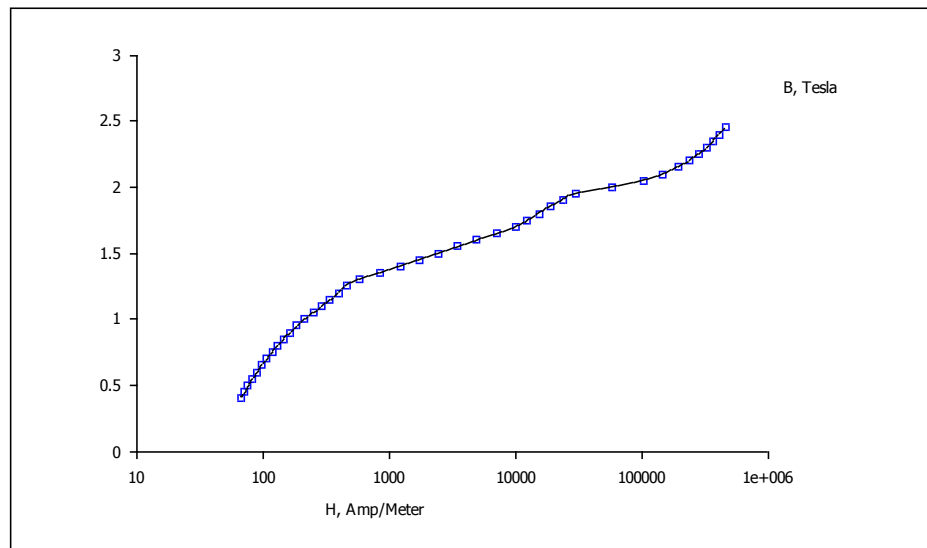
Před zahájením práce v programu FEMM je nejprve potřeba vybrat typ úlohy. Zde byl vybrán „magnetický problém“. Dalším krokem je definování základních parametrů programu pro výpočet. Pro moje potřeby jsem vybral řešení v rovině, za hlavní rozměr jsem zvolil milimetry a hloubku úlohy odpovídající délce induktu včetně ventilačních kanálů. Přesnost jsem ponechal  $1 \cdot 10^{-8}$ . Nastavením nejnižšího možného úhlu pro vytváření sítě na  $30^\circ$  jsem se ujistil, že při dostatečné přesnosti zůstane zachována řešitelnost úlohy.

Po importu bylo potřeba nákres doplnit o kružnici, představující ohraničení vnějšího prostředí a o kružnici, umístěnou v ose vzduchové mezery potřebnou pro zobrazení průběhu indukce ve vzduchové mezeře a pro výpočet momentové charakteristiky.

Dalším úkolem bylo definovat vlastnosti jednotlivých materiálů, vyskytujících se ve stroji. Úloha byla zjednodušena tím, že rotor zde tvoří pouze magnetický obvod s vinutím. Tím, že byla zvolena hloubka řešení rovna délce induktu včetně ventilačních kanálů, bylo nutné zavést nižší činitel plnění do induktu, abych simuloval vliv ventilačních kanálů, se kterými FEMM pracovat neumí. Ani toto řešení však není zcela adekvátní. Obě vinutí byla nadefinována s vodivostí  $56 \text{ MSm}^{-1}$ . U rotorového vinutí bylo nadefinováno, že se skládá z obdélníkových vodičů. Tyče tlumiče byly navrženy z hliníku, tedy s vodivostí  $36 \text{ MSm}^{-1}$ . Jho a póly rotoru jsou z konstrukční uhlíkaté oceli, magnetický obvod induktu je složen z transformátorových plechů M350-50A, o tloušťce 0,5 mm. Oba tyto materiály mají nelineární magnetizační charakteristiku, kterou bylo nutno v programu nadefinovat. FEMM pro tuto příležitost podporuje vkládání charakteristik z txt souboru. Také umožňuje dodatečné vykreslení charakteristiky a to i v logaritmických souřadnicích (viz. obrázky 13, 14).



Obrázek 13 Magnetizační charakteristika konstrukční oceli - FEMM



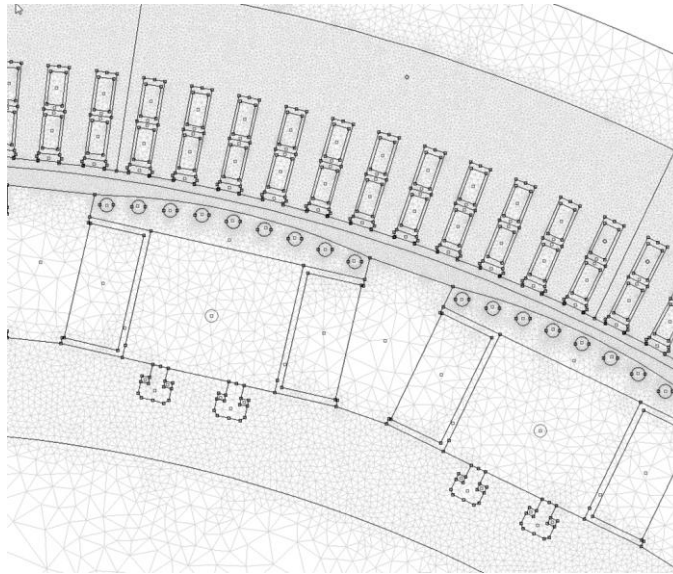
Obrázek 14 Magnetizační charakteristika plechů M350 - FEMM

Pro potřeby výpočtu bylo uloženo několik definic obvodů. Dvě pro budicí proud, tedy pro kladnou a zápornou polaritu. Poté po dvou pro každou z fází. Budicí proud byl dosazen z předcházejících výpočtů. Pro výpočet okamžitých hodnot proudů pro každou ze tří fází, v jednom časovém okamžiku, jsem vytvořil jednoduchý skript v programu Matlab. Příklad výpočtu, pro druhou fázi a 3/16 periody sítě, je uveden ve vzorci (192).

$$\begin{aligned}
 I_b &= \frac{I_1}{a} \cdot \sqrt{2} \cdot \sin\left(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \frac{2}{3} \pi\right) = \\
 &= \frac{2405,626}{7} \cdot \sqrt{2} \cdot \sin\left(2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,00375 + \frac{2}{3} \pi\right) \cong -63,44 \text{ A}
 \end{aligned} \tag{192}$$

Proud v budicím vinutí byl vložen tak, aby se na pólech po obvodu stroje vždy střídal směr magnetického toku. V každé z 231 drážek statorového vinutí jsou umístěny dvě cívkové strany o šesti závitech. Podle Tingleyho schématu (viz. příloha V) je každou fází vždy obsazeno  $n$  po sobě jdoucích cívkových stran. Pro urychlení definování obvodů v jednotlivých cívkových stranách byla využita skutečnost, že se schéma opakuje vždy po čtyřech řádcích.

Před spuštěním vlastního výpočtu je potřeba vždy vytvořit odpovídající síť pro realizaci MKP. Je zřejmé, že čím je síť jemnější, tím je výpočet přesnější, ale zároveň i pomalejší, proto jsem zjemnil síť pouze v těch místech nákresu, kde jsem vyžadoval vyšší přesnost. Jedná se prakticky o celý magnetický obvod, ale zejména o vzduchovou mezeru, drážkovou část a pólové nástavce (viz. Obrázek 15). [5]



Obrázek 15 Vykreslení sítě pro výpočet MKP

Pro zjemnění sítě lze využít dvou metod. První metodou, použitou ve vzduchové mezeře a jhu statoru i rotoru, je možnost ručně nastavit hustotu zasítování v celé části materiálu. Efektivnější metodou pro zahuštění sítě na zakřivených okrajích (např. horní plocha pólových nástavců) je možnost zvýšit počet segmentů, ze kterých je křivka vytvořena.

### 4.3 Výsledky analýzy ve FEMM

#### 4.3.1 Možnosti čtení výsledků

FEMM poskytuje v okně výsledků čtyři vrstvy pro zobrazení. Tyto vrstvy lze libovolně zobrazit i skrýt. První vrstvu tvoří barevné či černobílé vyjádření rozložení indukce, intenzity pole, nebo proudové hustoty. Zde je možné nastavit dolní a horní hranici barevné škály tak, aby odpovídala nejnižší a nejvyšší zobrazované hodnotě. Výsledky výpočtu jsou poté lépe čitelné. Další vrstvou je mřížka pro výpočet. Tato vrstva nám umožňuje zpětně zkontrolovat, kde jsou výsledky výpočtu přesnější. Zobrazení indukčních čar je další vrstvou. Čím blíže jsou čáry v daném místě vzájemně zobrazeny, tím vyšší je hodnota magnetického toku. Opět je umožněno nastavit rozsah zobrazených hodnot a zde také výsledné množství čar. Poslední vrstvu tvoří možnost zobrazení vektorů intenzity magnetického pole nebo indukce. Zde je možnost nastavit měřítko velikosti vektorů.

Pro zobrazení číselných výsledků výpočtu je třeba použít jeden ze tří nástrojů pro označení. V okně výsledků je vždy aktivní jeden z těchto nástrojů. Prvním nástrojem je bod. Pokud je aktivní tento nástroj, kamkoliv do zobrazení uživatel „klikne“, ve výstupním okně se zobrazí vypočtené parametry pro daný bod. Mezi těmito parametry jsou důležité indukce a magnetický tok. Původně toto okno obsahuje obecné informace o výpočtu (např. typ řešení, hloubku řešení, počet elementů a uzlů atp.). Dalším nástrojem je kreslení, či výběr přímky respektive křivky a posledním nástrojem je výběr oblasti. Pomocí těchto dvou nástrojů je možné také vybrat více křivek, či oblastí najednou.

Pro zobrazení výsledků výpočtu, nebo dopočítání dalších parametrů lze použít nástrojů 2D grafu a integrace. Graf umožňuje vykreslit průběh magnetického potenciálu, indukce a intenzity magnetického pole. Graf lze vykreslit pouze pro vybranou přímku, nebo obrys. V dialogovém okně grafu je možné nastavit počet bodů grafu a zápis dat do souboru. Po vytvoření grafu je možné jej uložit, jako bitmapu, či jako soubor emf. Nástroj integrace umožňuje výpočet průměrných hodnot daných parametrů, nebo dodatečný výpočet jiných parametrů. Integraci lze použít jak na křivky, tak na celé oblasti. Pro křivky je nabídnuta možnost výpočtu délky křivky, průměrné indukce, magnetického toku, rozdílu magnetických napětí, intenzity magnetického pole atd. Pro oblasti je možné určit zejména magnetický tok, energii magnetického pole a jouleovy ztráty.

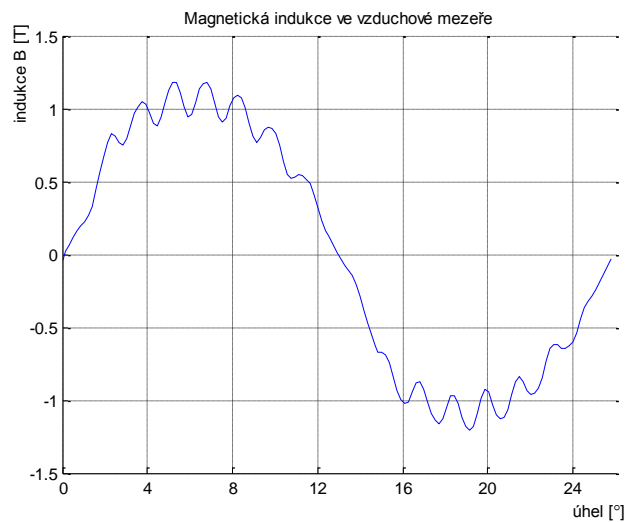
[5]

### **4.3.2 Výsledky výpočtu**

#### **4.3.2.1 Magnetická indukce ve vzduchové mezeře**

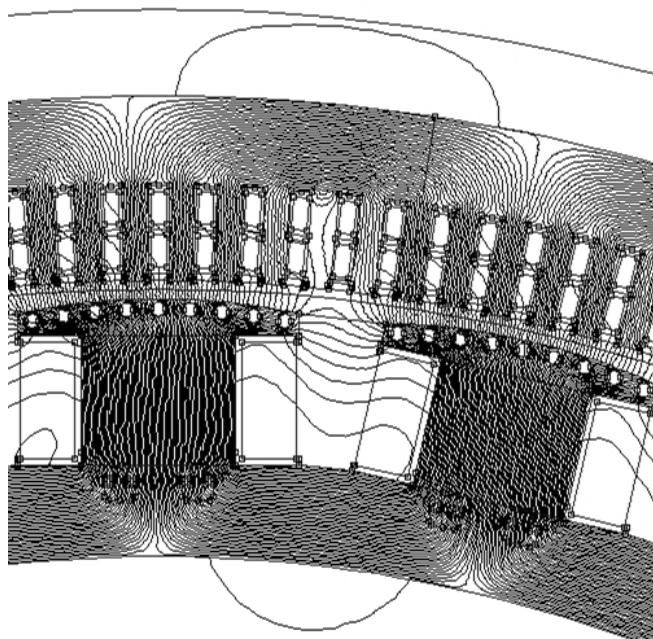
Indukce ve vzduchové mezeře byla zjištěna označením dříve vložené osy vzduchové mezery a použitím nástroje integrálu. V integrálu byla vybrána možnost výpočtu průměrné hodnoty kvadrátu indukce. Odmocněním vypočtené hodnoty jsem získal průměrnou hodnotu indukce ve vzduchové mezeře 0,82 T, což se od předpokládané hodnoty 0,9 T příliš neliší.

Na obrázku (viz. obrázek 16) je zobrazeno rozložení indukce ve vzduchové mezeře. Pro lepší přehlednost zobrazeno pod dvěma póly (1/14 obvodu). Velmi výrazně se zde projevuje vliv drážkování induktu, jinak je průběh prakticky sinusový.



Obrázek 16 Rozložení indukce ve vzduchové mezeře

Na obrázku (17) lze vidět čáry znázorňující magnetický tok. Pro lepší zvýraznění rozptylového toku je zde zvýšeno množství čar v rozsahu.



Obrázek 17 Zobrazení magnetického toku

#### 4.3.2.2 Momentová charakteristika

Pro výpočet momentu na povrchu rotoru FEMM používá Maxwellova tenzoru. Vztah pro elementární část obvodu je dán rovnicí (193), kde  $n$  definuje normálu na směr působení momentu v daném bodě.

$$dF = \frac{1}{2} [H(B \cdot n) + B(H \cdot n) - (H \cdot B)n] \quad (193)$$

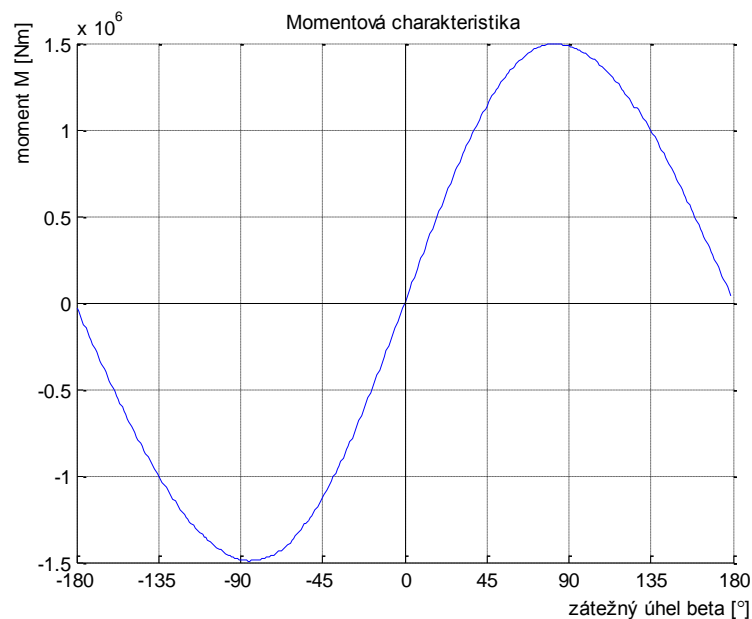
[5]



Zde nastává problém, neboť pro jeden element sítě jsou hodnoty indukce a intenzity magnetického pole konstantní. V místech, kde se hodnoty těchto veličin výrazně mění, je pak výsledná aproximace dosti nepřesná. Řešení provedené v místě rozhraní pólových nástavců a vzduchové mezery by pravděpodobně vyústilo v chybné výsledky. Tento výpočet má ovšem tu vlastnost, že proveden pro křivku, obklopující celý rotor, a procházející pouze vzduchovou mezerou, poskytuje adekvátní výsledky. Z předcházejících poznatků také vyplývá nutnost použít co nejhustší síť. Pro ideální výsledky je v manuálu k programu doporučeno opakovat výpočet pro různé hustoty sítě, dokud je zaznamenán pouze malý rozdíl ve výsledku. Tento postup by byl aplikován až po dalším upřesnění návrhu.

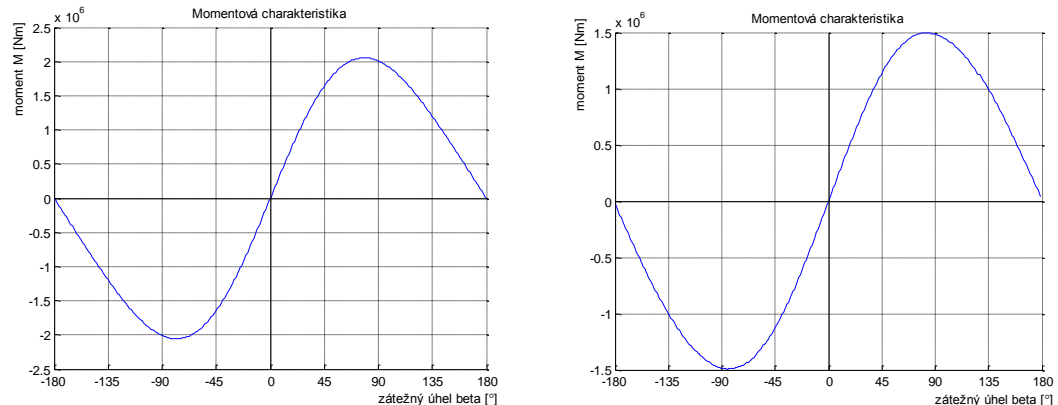
[5]

Při výpočtu momentové charakteristiky bylo využito Lua skriptu (viz. příloha XIX). Skript měl v první řadě spustit výpočet obdobně, jako pro účely zjištění indukce. V tomto případě ovšem bylo potřeba, aby byl výpočet spuštěn pro odpovídající počet poloh rotoru, abych mohl určit moment pro dané hodnoty zátěžného úhlu. Po obvodu stroje bylo stanoveno 180 poloh, pro které výpočet probíhal. Pro otočení rotoru byla využita možnost práce se skupinami objektů. Všechny části rotoru byly zahrnuty do jedné skupiny. Další funkcí skriptu bylo, pro každou z těchto poloh označit osu vzduchové mezery a spustit nástroj integrace. V nástroji integrace pro křivku je funkce výpočtu stejnosměrného momentu, která zde byla použita. Na konci skriptu je vložen příkaz pro uložení výsledku každého výpočtu do souboru.



Obrázek 18 Momentová charakteristika vypočtená pomocí MKP

I na této momentové charakteristice, je možné pozorovat vliv reluktančního momentu. Amplitudy charakteristiky jsou mírně posunuté od  $90^\circ$  k  $0^\circ$ .



Obrázek 19 Porovnání momentových charakteristik

Po srovnání charakteristiky vypočtené dříve (obrázek 19 vlevo) a charakteristiky vypočtené pomocí MKP (obrázek 19 vlevo), je zřejmé, že „nová“ charakteristika má o cca  $0,5 \cdot 10^6$  Nm nižší maximální moment. Při výpočtu metodou konečných prvků není uvažována změna účinníku a velikosti proudu statorem stroje. Charakteristiky lze tedy hodnověrně porovnat pouze z hlediska umístění jmenovitého momentu. Jmenovitý moment  $1,1156 \cdot 10^6$  Nm je na obou charakteristikách s rezervou v říditelné oblasti.

#### 4.3.2.3 Výpočet parametrů náhradního schématu

Pro potřebu výpočtu parametrů náhradního schématu byly upraveny definice obvodů tak, že byly odstraněny definice budícího proudu. Dále byl vypočten proud pro fázi A, jako amplituda magnetizačního proudu (194) jednou paralelní větví (194). Ve zbývajících fázích byl nadefinován proud poloviční.

$$I_A = \frac{I_\mu \cdot \sqrt{2}}{a} = \frac{3273,67 \cdot \sqrt{2}}{7} \cong 661,381 \text{ A} \quad (194)$$

Výpočet indukčností byl proveden z hodnot energie magnetického pole (dále jen energie), vypočtených pro dané plochy pomocí nástroje integrál. Indukčnost je odvozena ze základního vztahu pro energii magnetického pole.

$$L = \frac{2 \cdot W_m}{(I_1 \cdot \sqrt{2})^2} \quad (195)$$

Pro výpočet rozptylové indukčnosti bylo nutné určit energii, odpovídající rozptylu. To jsem zajistil tím, že jsem pro výpočet energie označil nástrojem pro výběr oblastí prostory v drážkách a mezi póly rotoru, vinutí nevyjímaje. Tímto způsobem byla získána hodnota energie  $W_{\sigma} = 8765,43$  J. Jelikož byla ve dvou fázích definována poloviční hodnota magnetizačního proudu, dále počítáme jen s poloviční hodnotou energie  $W_{\sigma f}$ . Rozptylová indukčnost byla tedy určena podle vztahu (196).

$$L_{\sigma} = \frac{2 \cdot W_{\sigma f}}{(I_1 \cdot \sqrt{2})^2} = \frac{2 \cdot 4382,715}{(2405,626 \cdot \sqrt{2})^2} \cong 0,757 \cdot 10^{-3} \text{ H} \quad (196)$$

Odpovídající rozptylová reaktance:

$$X_{\sigma} = \frac{L_{\sigma}}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{0,757 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \pi \cdot 50} \cong 0,238 \ \Omega \quad (197)$$

Obdobně pro výpočet podélné a příčné synchronní reaktance byly vybrány pouze oblasti odpovídající magnetickému obvodu statoru i induktu včetně vzduchové mezery. Pouze v případě podélné reaktance musela být přesně nastavena poloha rotoru do podélné osy a v případě příčné reaktance o  $90^{\circ}$  elektrických (cca  $6,43^{\circ}$ ). Odpovídající energie tedy vyšly  $W_{df} = 25356,45$  J a  $W_{qf} = 17852,25$  J. Podélnou indukčnost tedy určíme následujícím způsobem.

$$L_d = \frac{2 \cdot W_{df}}{(I_1 \cdot \sqrt{2})^2} = \frac{2 \cdot 25356,45}{(2405,626 \cdot \sqrt{2})^2} \cong 4,381 \cdot 10^{-3} \text{ H} \quad (198)$$

Podélná reaktance

$$X_d = \frac{L_d}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{4,381 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \pi \cdot 50} \cong 1,377 \ \Omega \quad (199)$$

Příčná indukčnost

$$L_q = \frac{2 \cdot W_{qf}}{(I_1 \cdot \sqrt{2})^2} = \frac{2 \cdot 17852,25}{(2405,626 \cdot \sqrt{2})^2} \cong 3,085 \cdot 10^{-3} \text{ H} \quad (200)$$

Příčná reaktance

$$X_q = \frac{L_q}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{3,085 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \pi \cdot 50} \cong 0,969 \Omega \quad (201)$$

Po porovnání v tabulce (viz. tabulka 10) je zřejmé, že pro danou fázi návrhu se hodnoty indukčností a reaktancí vypočtených dříve a pomocí programu FEMM nijak výrazněji neliší.

**Tabulka 10 Porovnání indukčností a reaktancí**

Veličina	Původní výpočet	Výpočet MKP
Rozptylová indukčnost $L_{a\sigma}$ [ $H \cdot 10^{-3}$ ]	0,759	0,757
Rozptylová reaktance $X_{a\sigma}$ [ $\Omega$ ]	0,238	0,238
Podélná indukčnost $L_{ad}$ [ $H \cdot 10^{-3}$ ]	3,31	4,381
Podélná reaktance $X_{ad}$ [ $\Omega$ ]	1,041	1,377
Příčná indukčnost $L_{aq}$ [ $H \cdot 10^{-3}$ ]	2,13	3,085
Příčná reaktance $X_{aq}$ [ $\Omega$ ]	0,67	0,969

## Závěr

Zadání diplomové práce ukládá provést návrh synchronního hydroalternátoru v jeho počáteční fázi a ověřit některé parametry návrhu. V první části diplomové práce byl proveden návrh základních parametrů stroje, vinutí induktu, magnetického obvodu a budicího vinutí. Byla zde také vypočtena účinnost a navržen možný způsob přenosu budicího proudu na rotor. Ve druhé fázi bylo určeno oteplení některých kritických částí stroje a navržena odpovídající forma izolace. Návrh by měl být připraven pro další upřesnění parametrů, na základě jejich ověření pomocí metody konečných prvků, v programu FEMM.

Hydroalternátor s výkonem 25 MVA, 28 pólový, na jmenovitých 214 ot min<sup>-1</sup> je navržen s průměrem 4,3 m a délkou induktu včetně ventilačních kanálů přibližně 1 m. Essonův činitel, charakterizující využití objemu stroje vyšel 6,853 kVA min m<sup>-3</sup> ot<sup>-1</sup>. Vinutí bylo navrženo ve 231 drážkách se sedmi paralelními větvemi, jako vlnové nekřížené (viz. příloha V,VI). Vinutí je uloženo v otevřených drážkách, dvou vrstvách, po 6x4 vodičích. Procentuelní úbytek napětí na odporu statorového vinutí vyšel asi 0,6 %. Pro rozptylovou reaktanci byl vypočten poměrně velký procentuelní úbytek 20,24%. Na tuto hodnotu má vliv především počet vodičů v drážce, který se odvíjí od počtu paralelních větví. Vyšší počet vodičů v drážce znamená menší využití drážky (větší část drážky zabírá izolace). Šířka vzduchové mezery byla stanovena na 23 mm. Z charakteristiky na prázdno (viz. příloha XIII) vyšlo budicí magnetické napětí přibližně 32667 A. Podle této hodnoty bylo navrženo budicí vinutí o 40 závitů. Budicí napětí 258 V zajistí budicí proud 828 A. V závěru první části byla vypočtena účinnost stroje 96,88%, což je vyhovující. Z celkových ztrát 643600 W tvořily největší část ztráty v budicím (40%) a statorovém vinutí (24,5%).

Po výpočtu teplot daných částí stroje v ustáleném stavu bylo doporučeno použití odpovídajících druhů izolace. Na statorovém vinutí byla navržena izolace třídy H a na budicím vinutí izolace třídy F.

Pro ověření parametrů pomocí metody konečných prvků byl sestrojen dvojrozměrný nákras příčného řezu strojem (viz příloha XVII). Byl stanoven magnetizační proud, podélná a příčná indukčnost a příslušné reaktance. Dále byl vypočten jmenovitý moment 1,1156·10<sup>6</sup> Nm a pomocí programu Matlab byla vykreslena momentová charakteristika. V Programu FEMM byla nadefinována úloha pro určení indukce ve vzduchové mezeře a pro výpočet momentu.

Pro zjednodušení výpočtu momentu byl navíc vytvořen skript (viz příloha). Poté byla úloha upravena pro určení indukčností.

Magnetická indukce ve vzduchové mezeře vyšla výpočtem pomocí MKP obdobně, jako byla navržena. Desetiprocentní rozdíl je pro první návrh poměrně dobrá přesnost. Průběh indukce vykazuje velký vliv drážkování statoru. Celkově však průběh (viz. obrázek 16), díky většímu zakřivení pólových nástavců (1,5 násobek vzduchové mezery) dobře odpovídá sinusovému. Srovnání indukčností a reaktancí je provedeno v závěru kapitoly 4.3.2.1. Rozptylová indukčnost odpovídá velmi dobře. Horší je to u podélné a příčné indukčnosti. V obou případech jsou hodnoty získané pomocí MKP nižší a liší se zhruba o 1 mH. Jmenovitý moment  $1,1156 \cdot 10^6$  Nm je na momentové charakteristice, vypočítané pomocí programu FEMM, stále s rezervou v říditelné oblasti.

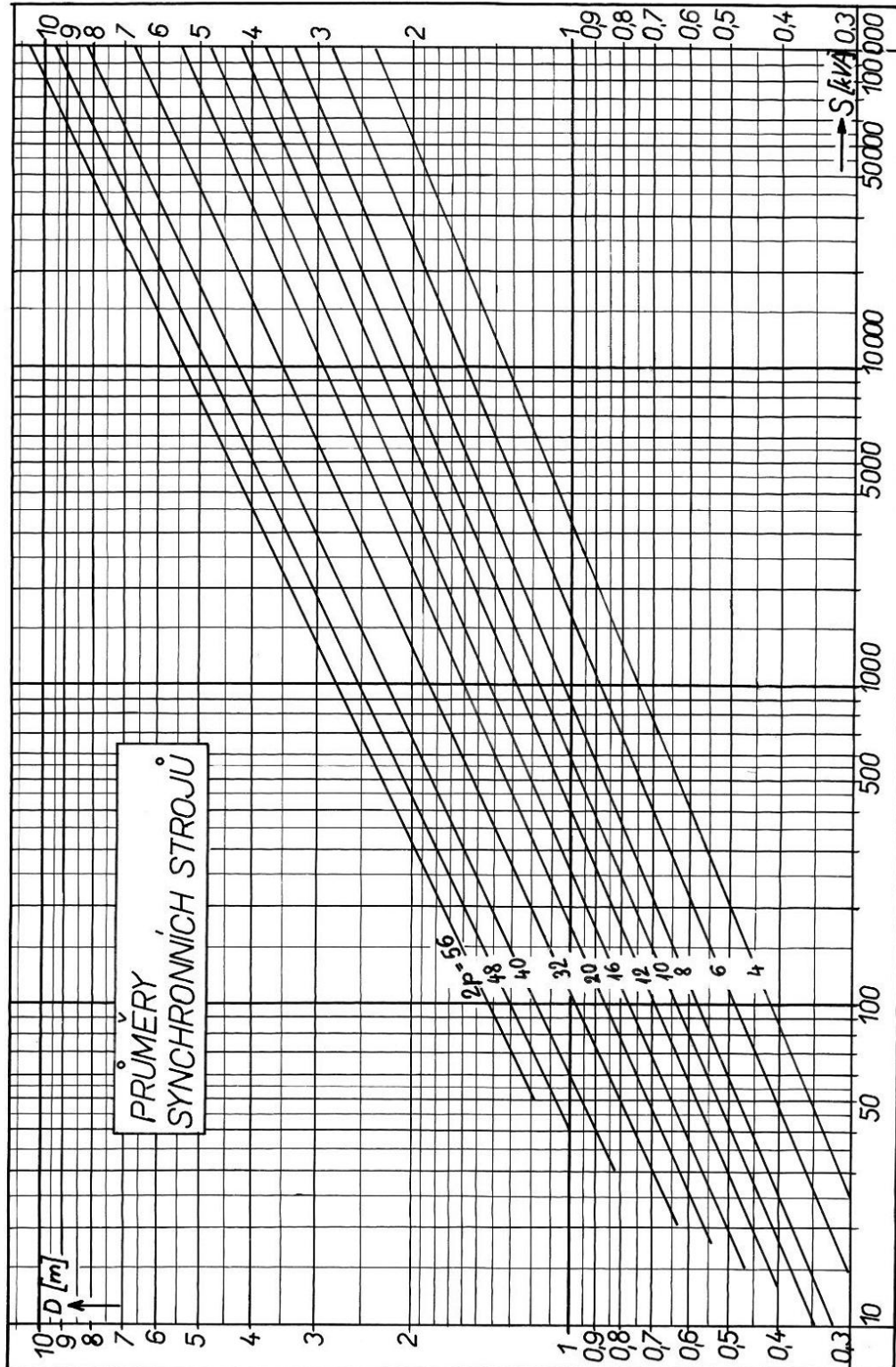
Je zřejmé, že dalším krokem v návrhu by bylo upřesnění parametrů elektromagnetického výpočtu na základě rozdílů mezi návrhem a hodnotami vypočtenými pomocí MKP. Podobně lze navíc ověřit i další parametry. Lze stanovit hodnoty indukce v jednotlivých částech magnetického obvodu. Bylo by také možné pomocí MKP vypočítat charakteristiku na prázdno a v závislosti na tom upravit budicí vinutí. Důležité by zde bylo provést ventilační návrh, který by lépe určil množství chladiva. To bylo v tomto případě pouze odhadnuto. Poté by byly upřesněny konstrukční prvky stroje a případně také stanoveny technologické postupy pro výrobu.

## Použitá literatura

- [1] KOPYLOV, Igor Petrovič et al. *Stavba elektrických strojů*. Praha: SNTL, 1988, 688 s. ISBN 04-532-88.
- [2] CIGÁNEK, Ladislav. *Stavba elektrických strojů*. Praha: SNTL, 1958, 716 s. ISBN 05/34.
- [3] BARTOŠ, Václav. *Teorie elektrických strojů*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2009. ISBN 55-084-09.
- [4] ČERVENÝ, Josef. Přednášky předmětu SES1,2. *Portál ZČU > Courseware* [online]. 2013 [cit. 2013-05-08]. Dostupné z: <http://portal.zcu.cz/wps/portal/predmety>
- [5] MEEKER, David. *Finite Element Method Magnetics* [online]. 2010, 158 s. [cit. 2013-05-08]. Dostupné z: <http://www.femm.info/Archives/doc/manual42.pdf>
- [6] KUCZENSKI, Brandon. *Hline.m and vline.m*. 2001. Dostupné z: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/1039-hline-and-vline>

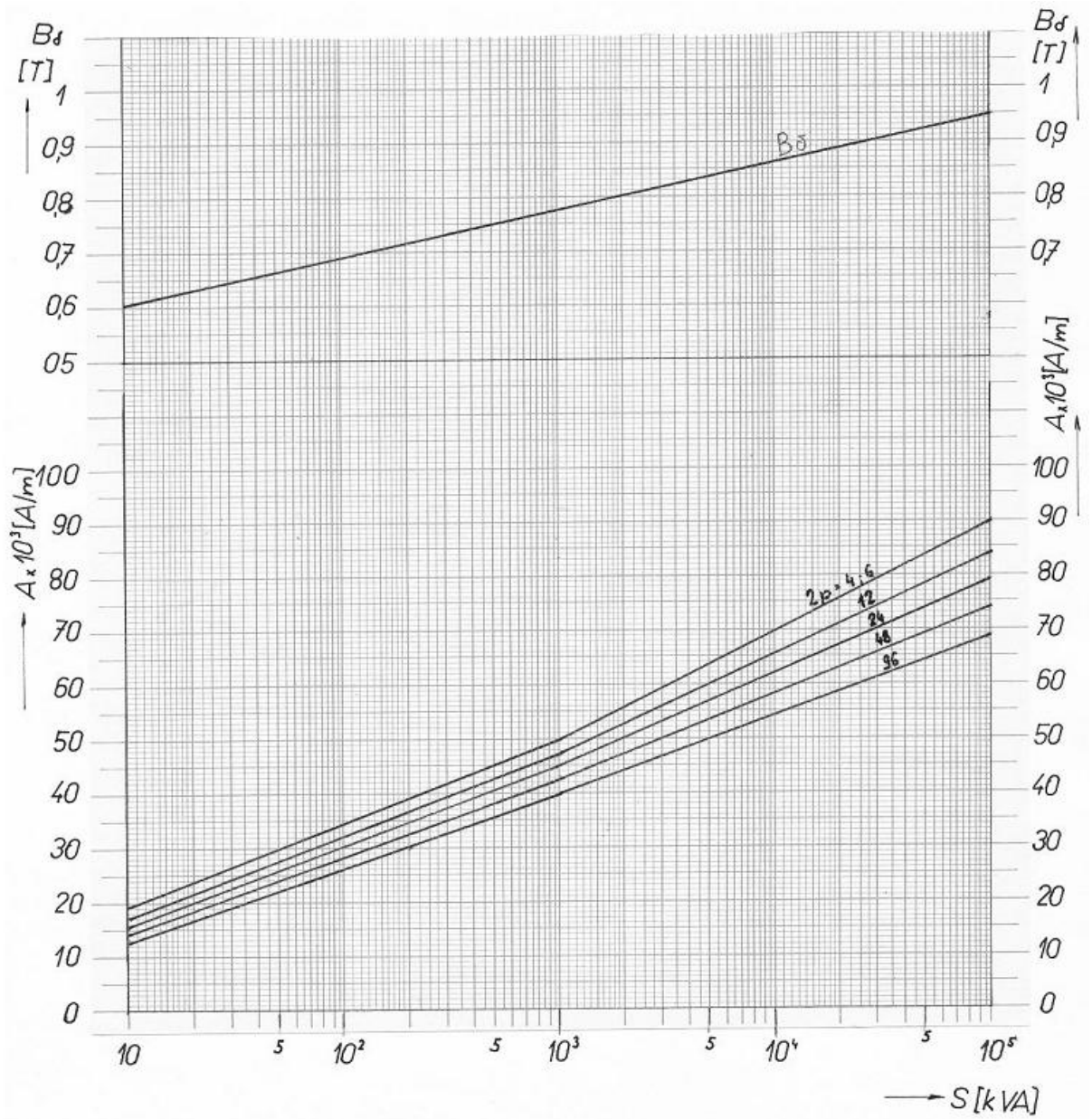
# Příloha

## Příloha I: Průměr vrtání statoru

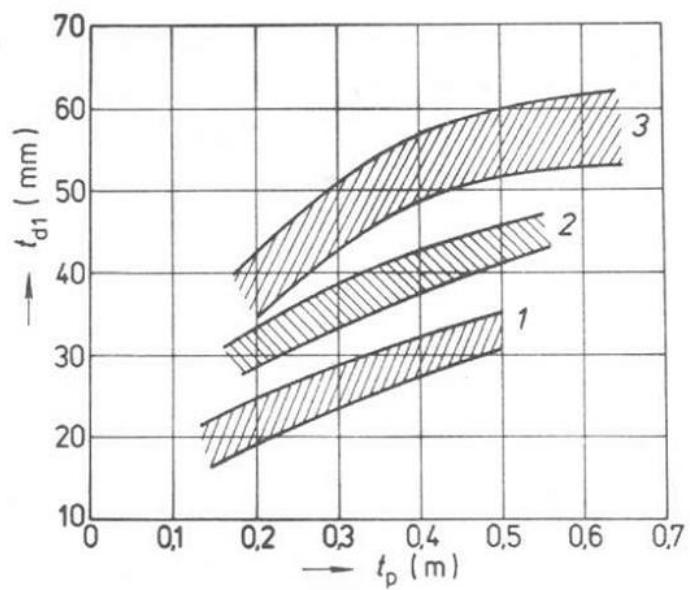




**Příloha II:** Obvodová proudová hustota a indukce ve vzduchové mezeře



## Příloha III: Drážková rozteč



[1]

Příloha IV: Tabulka rozměrů drážek typu M

Drážka M					Drážka W						Drážka U
$b_1$	$h_0$	$h_1$	$x_1$	$\lambda_c$	$b_1$	$b_0$	$h_0$	$h_1$	$u$	$\lambda_c$	$b_1$
5	0,7	3,5	1,2	0,704	4	2,2	0,5	0,90	1,50	0,561	1,4
5,2		3,3	1,1	0,658	4,2	2,5		1,00	1,40	0,587	1,5
5,5		3,6	1,2	0,664	4,4			0,95	1,55	0,516	1,6
5,8		3,5	1,2	0,621	4,6			1,05	1,45	0,540	1,7
6		3,3	1,1	0,581	4,8	1,15		1,35	0,562	1,8	
6,3		4,0	1,4	0,630	5	1,25		1,25	0,583	1,9	
6,6		3,6	1,25	0,580	5,2	1,35		1,15	0,603	2	
7		4,0	1,4	0,576	5,5	1,35		1,25	0,553	2,2	
7,3		3,6	1,25	0,517	5,8	1,50		1,10	0,580	2,4	
7,6		4,0	1,4	0,536	6	1,50		1,00	0,550	2,6	
8		4,0	1,4	0,522	6,2	1,60		0,90	0,567	2,8	
8,5		3,6	1,15	0,455	6,5	1,75		0,75	0,590	3	
9		4,0	1,4	0,462	6,8	1,90		0,60	0,613	3,2	
9,5		3,6	1,15	0,412	7	1,90		0,50	0,585	3,4	
10				0,420	7,2	1,90		0,40	0,599	3,6	
10,5			0,402	7,5	2,00	0,40	0,477	3,8			
11			0,386	7,8	1,72	1,28	0,493	4			
11,5	4,0	1,4	0,371	8	1,80	1,20	0,503	4,2			
12			0,356	8,5	1,80	1,20	0,506	4,4			
12,5			0,343	9	2,00	1,00	0,528	4,6			
13			0,331	9,5	2,20	0,80	0,550	4,8			
13,5			0,404	10	2,20	0,80	0,505	5			
14			0,390	10,5	2,40	0,60	0,524	5,2			
14,5			0,372	11	2,60	0,40	0,541	5,5			
15	5,0	1,65	0,366	11,5	1,95	1,05	0,412	5,8			
15,5			0,355	12	2,10	0,90	0,424	6			
16			0,345	12,5	2,25	0,75	0,436	6,2			
16,5			0,392	13	2,25	1,25	0,407	6,5			
17			0,391	13,5	2,40	1,10	0,418	6,8			
17,5			0,368	14	2,55	0,95	0,428	7			
18	6,0	1,6	0,362	14,5	2,55	0,95	0,403	7,2			
18,5			0,352	15	2,70	0,80	0,412	7,5			
19			0,344	15,5	2,85	0,65	0,472	7,8			
19,5			0,461	16	3,00	0,50	0,480	8			
20	1,0		0,450	16,5	3,15	0,85	0,489	8,5			
20,5			0,441	17	3,30	0,70	0,497	9			
21			0,430	17,5	3,45	0,55	0,504	9,5			
21,5			0,415	18	3,60	0,40	0,512	10			
22			0,405	18,5	3,75	0,25	0,519	10,5			
22,5			0,397	19	3,90	0,10	0,525	11			
23	9,0	2,45	0,389	20	2,80	1,20	0,414	11,5			
23,5			0,388	21	3,00	1,00	0,422	12			
24			0,382	22	3,20	0,80	0,430	12,5			
25			0,367	23	3,40	0,60	0,436	13			
26			0,354	24	3,40	0,60	0,395	13,5			
27			0,342	25	3,60	0,40	0,402	14			
28			0,322	26	3,80	0,20	0,408	14,5			
30			0,310	27	4,00	0,00	0,413	15			
32			0,292	28	4,20	0,80	0,419				

**Příloha V:** Tingleyho schéma

počet řádků:  $2p=28$

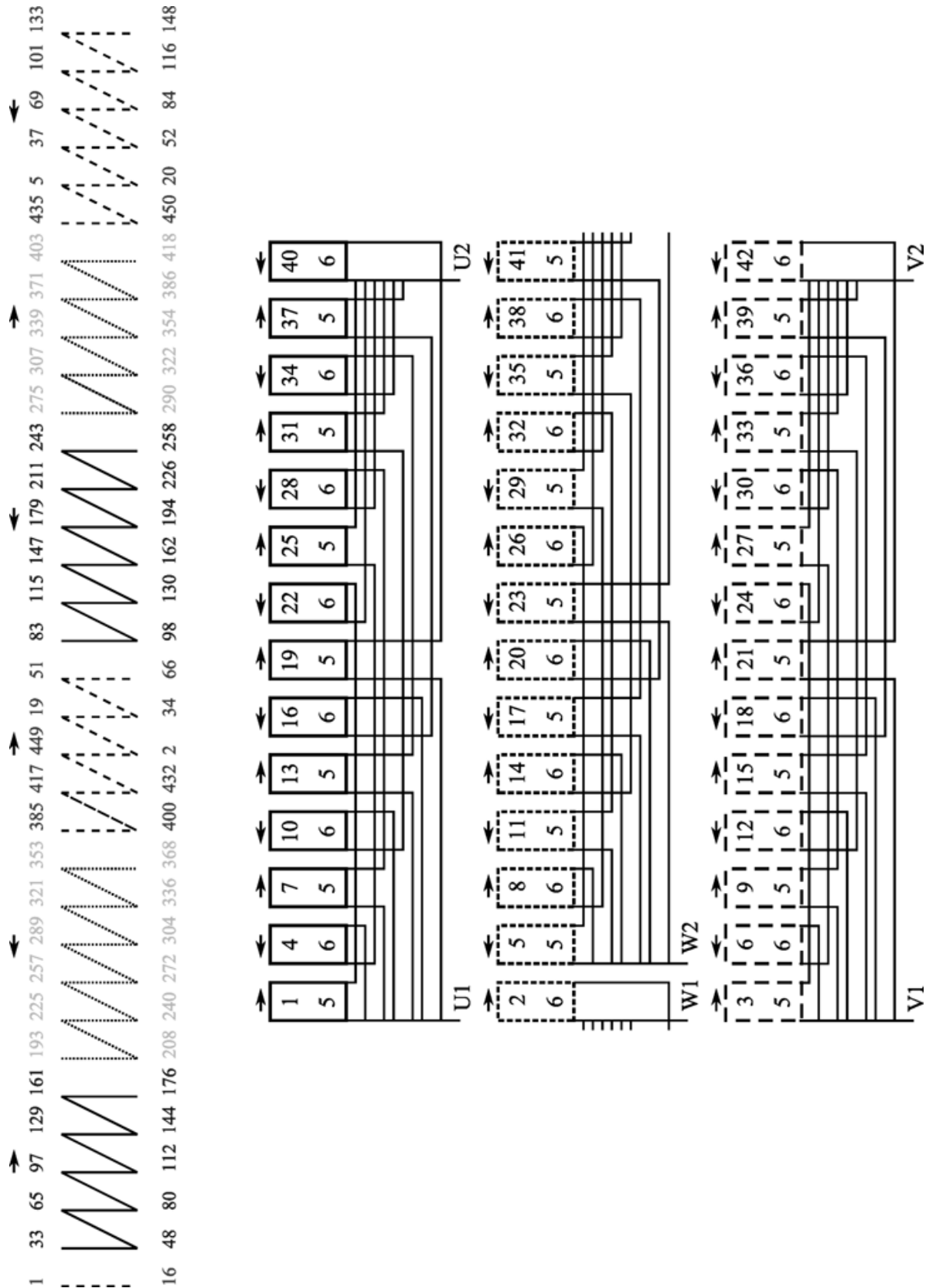
počet sloupců:  $m \cdot n = 3 \cdot 11 = 33$

schéma je vyplněno po  $c=4$  sloupcích

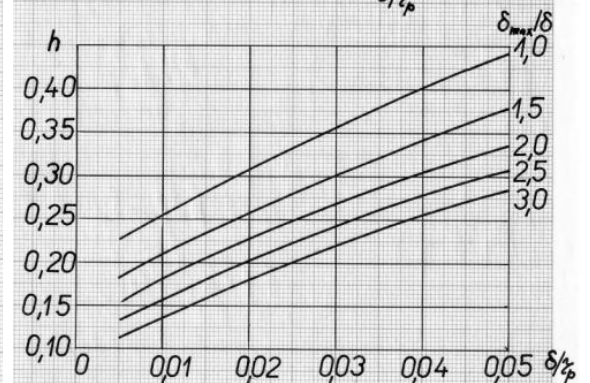
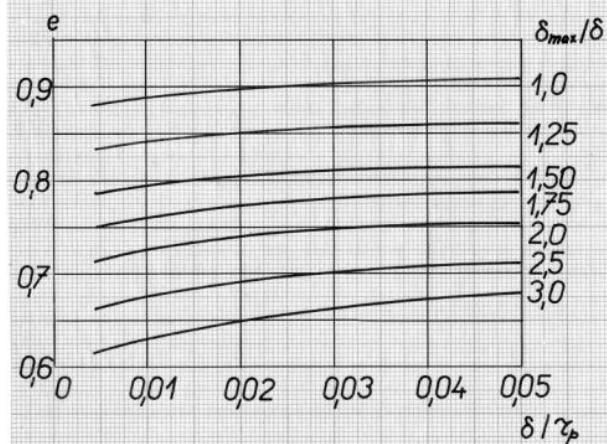
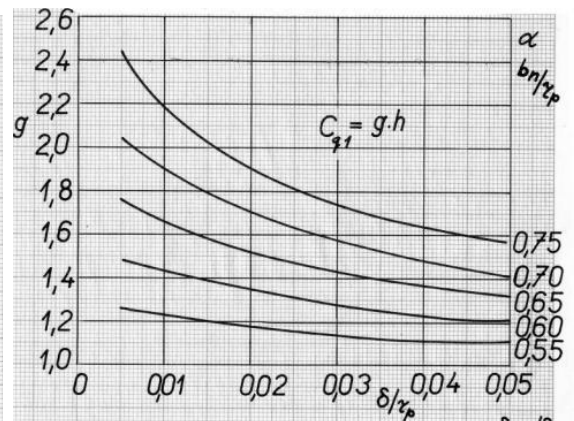
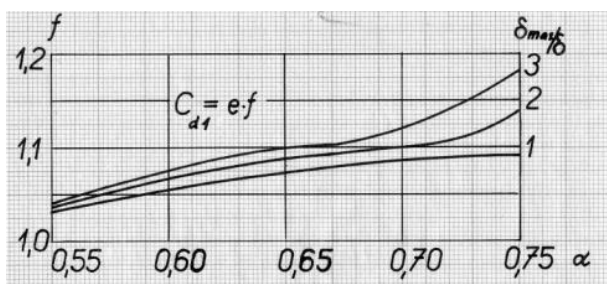
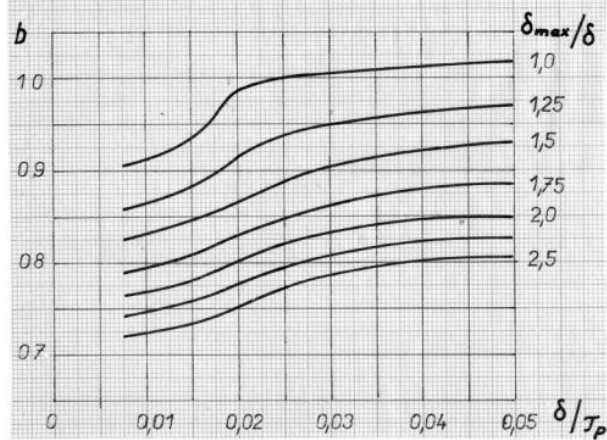
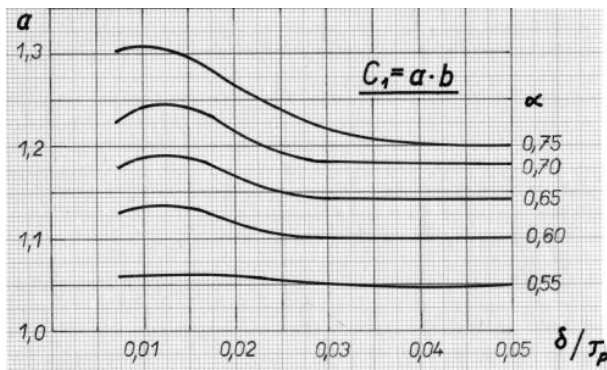
Jednotlivé fáze jsou odděleny podbarvením.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	
1	1			3				5				7				9				11				13				15				17		
2	2			4			6				8				10				12				14				16				18			
3			19				21				23				25				27				29				31				33			
4			20				22				24				26				28				30				32				34			
5		35					37				39				41				43				45				47				49			
6		36					38				40				42				44				46				48				50			
7		51					53				55				57				59				61				63				65			
8		52					54				56				58				60				62				64				66			
9	67						69				71				73				75				77				79				81			83
10	68						70				72				74				76				78				80				82			84
11			85				87				89				91				93				95				97				99			
12			86				88				90				92				94				96				98				100			
13		101					103				105				107				109				111				113				115			
14		102					104				106				108				110				112				114				116			
15		117					119				121				123				125				127				129				131			
16		118					120				122				124				126				128				130				132			
17	133						135				137				139				141				143				145				147			149
18	134						136				138				140				142				144				146				148			150
19			151				153				155				157				159				161				163				165			
20			152				154				156				158				160				162				164				166			
21		167					169				171				173				175				177				179				181			
22		168					170				172				174				176				178				180				182			
23	183						185				187				189				191				193				195				197			
24	184						186				188				190				192				194				196				198			
25	199						201				203				205				207				209				211				213			215
26	200						202				204				206				208				210				212				214			216
27			217				219				221				223				225				227				229				231			
28			218				220				222				224				226				228				230				232			
29			233				235				237				239				241				243				245				247			
30			234				236				238				240				242				244				246				248			
31	249						251				253				255				257				259				261				263			
32	250						252				254				256				258				260				262				264			
33	265						267				269				271				273				275				277				279			281
34	266						268				270				272				274				276				278				280			282
35			283				285				287				289				291				293				295				297			
36			284				286				288				290				292				294				296				298			
37			299				301				303				305				307				309				311				313			
38			300				302				304				306				308				310				312				314			
39			315				317				319				321				323				325				327				329			
40			316				318				320				322				324				326				328				330			
41	331						333				335				337				339				341				343				345			347
42	332						334				336				338				340				342				344				346			348
43			349				351				353				355				357				359				361				363			
44			350				352				354				356				358				360				362				364			
45			365				367				369				371				373				375				377				379			
46			366				368				370				372				374				376				378				380			
47			381				383				385				387				389				391				393				395			
48			382				384				386				388				390				392				394				396			
49	397						399				401				403				405				407				409				411			413
50	398						400				402				404				406				408				410				412			414
51			415				417				419				421				423				425				427				429			
52			416				418				420				422				424				426				428				430			
53			431				433				435				437				439				441				443				445			
54			432				434				436				438				440				442				444				446			
55	447						449				451				453				455				457				459				461			
56	448						450				452				454				456				458				460				462			

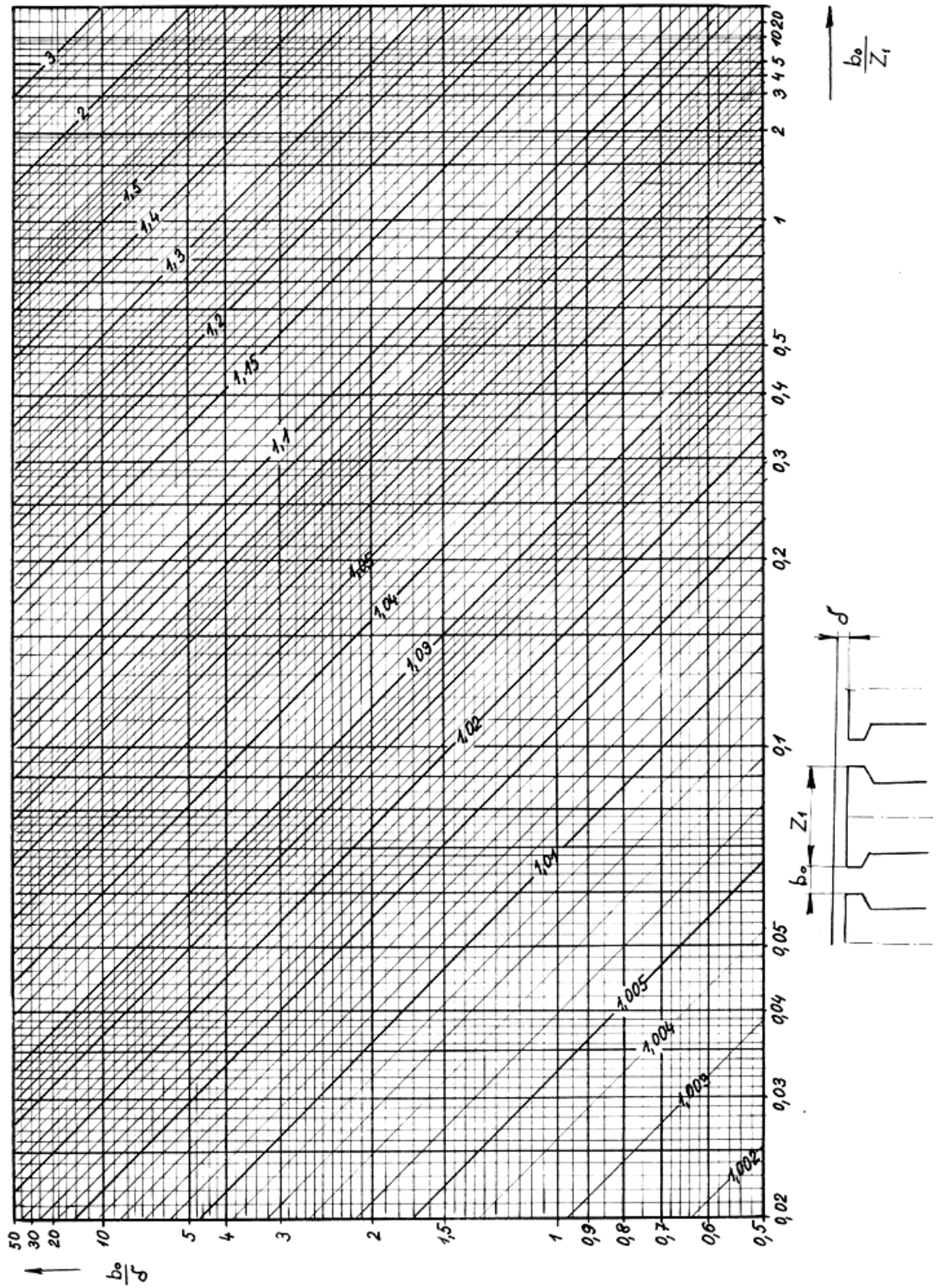
**Příloha VI:** Částečné pilové schéma a schéma zapojení



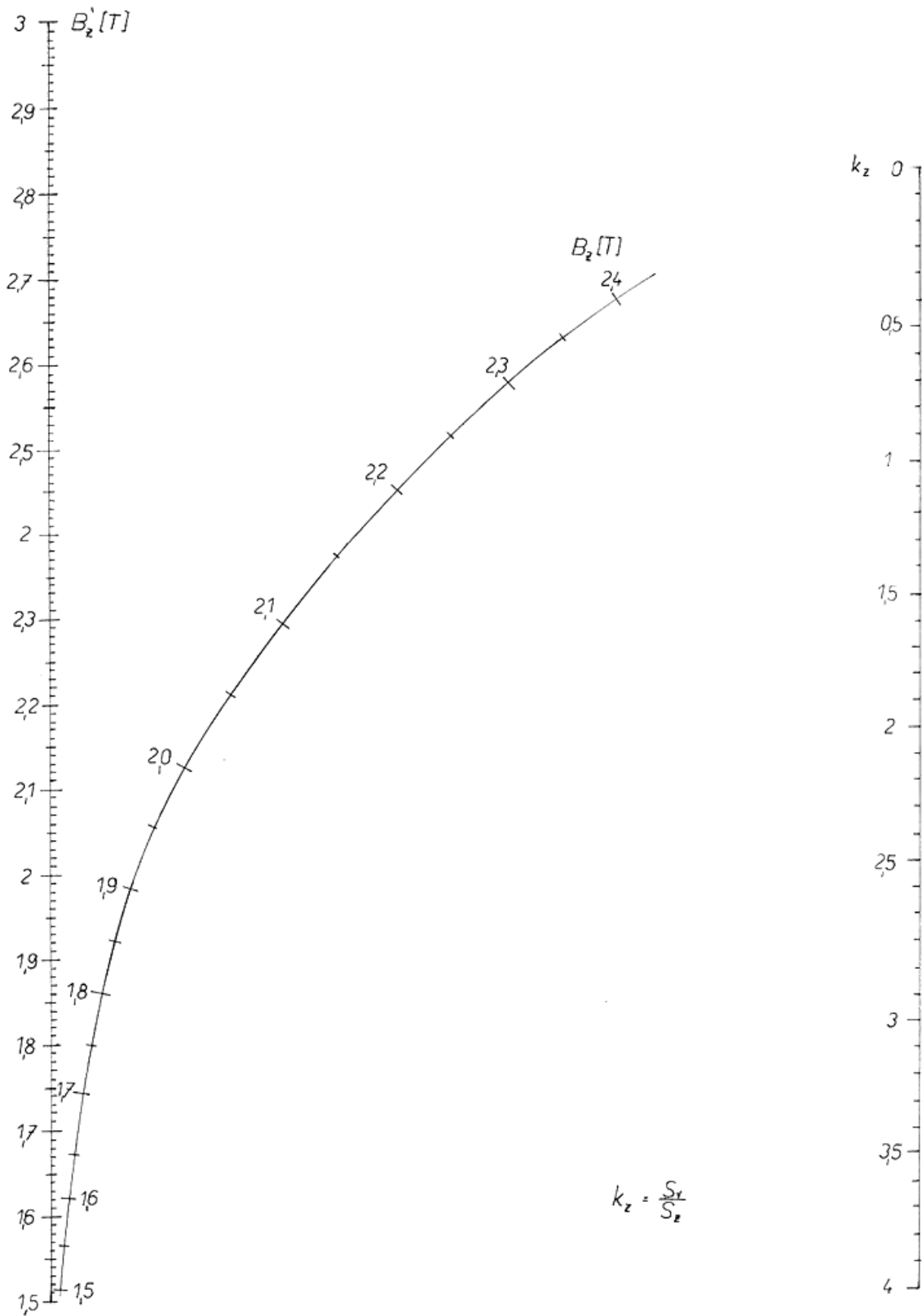
**Příloha VII: Konstanty pro určení deformačních činitelů**



Příloha VIII: Carterův číselník

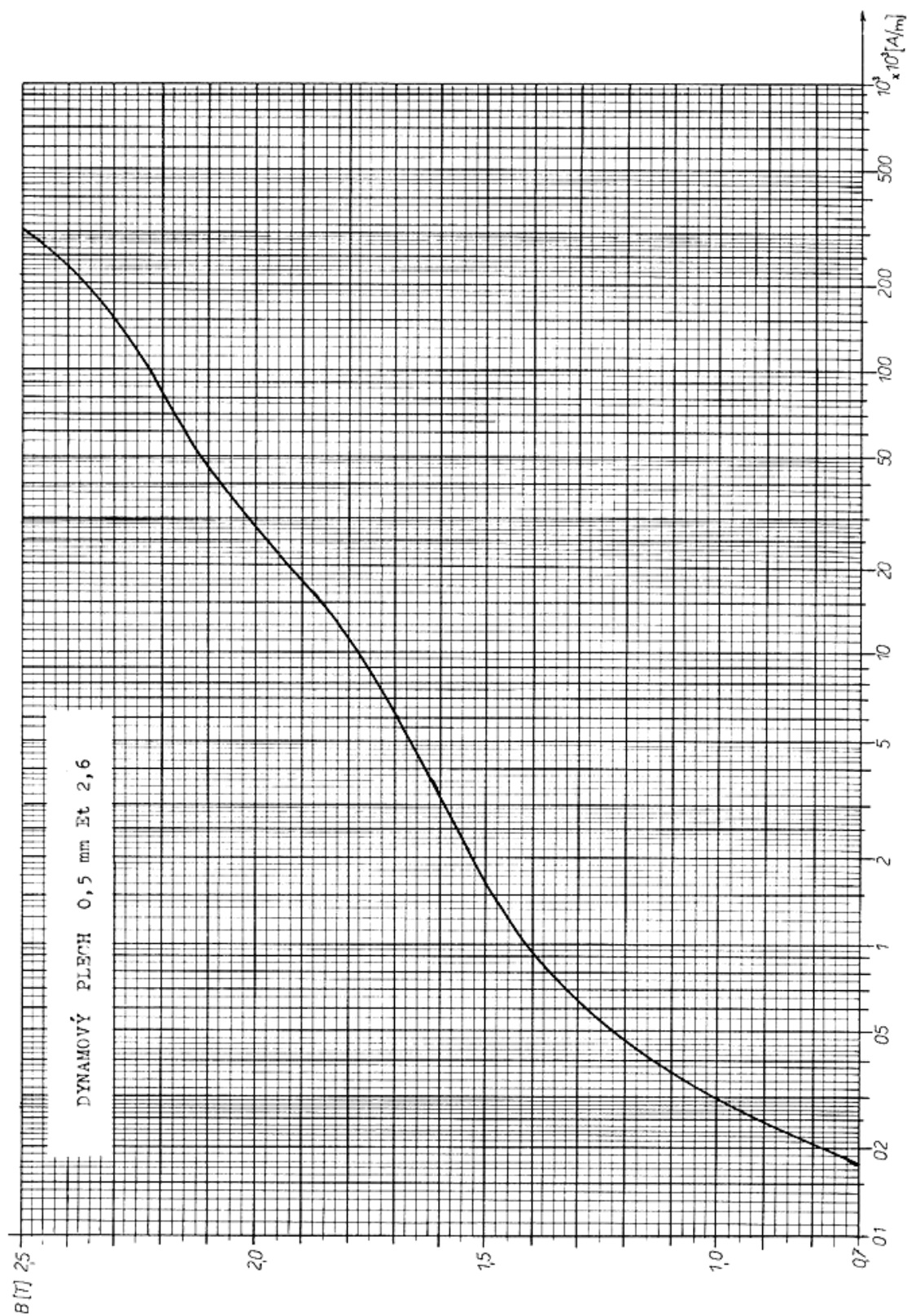


**Příloha IX:** Nomogram pro určení odlehčení v zubech



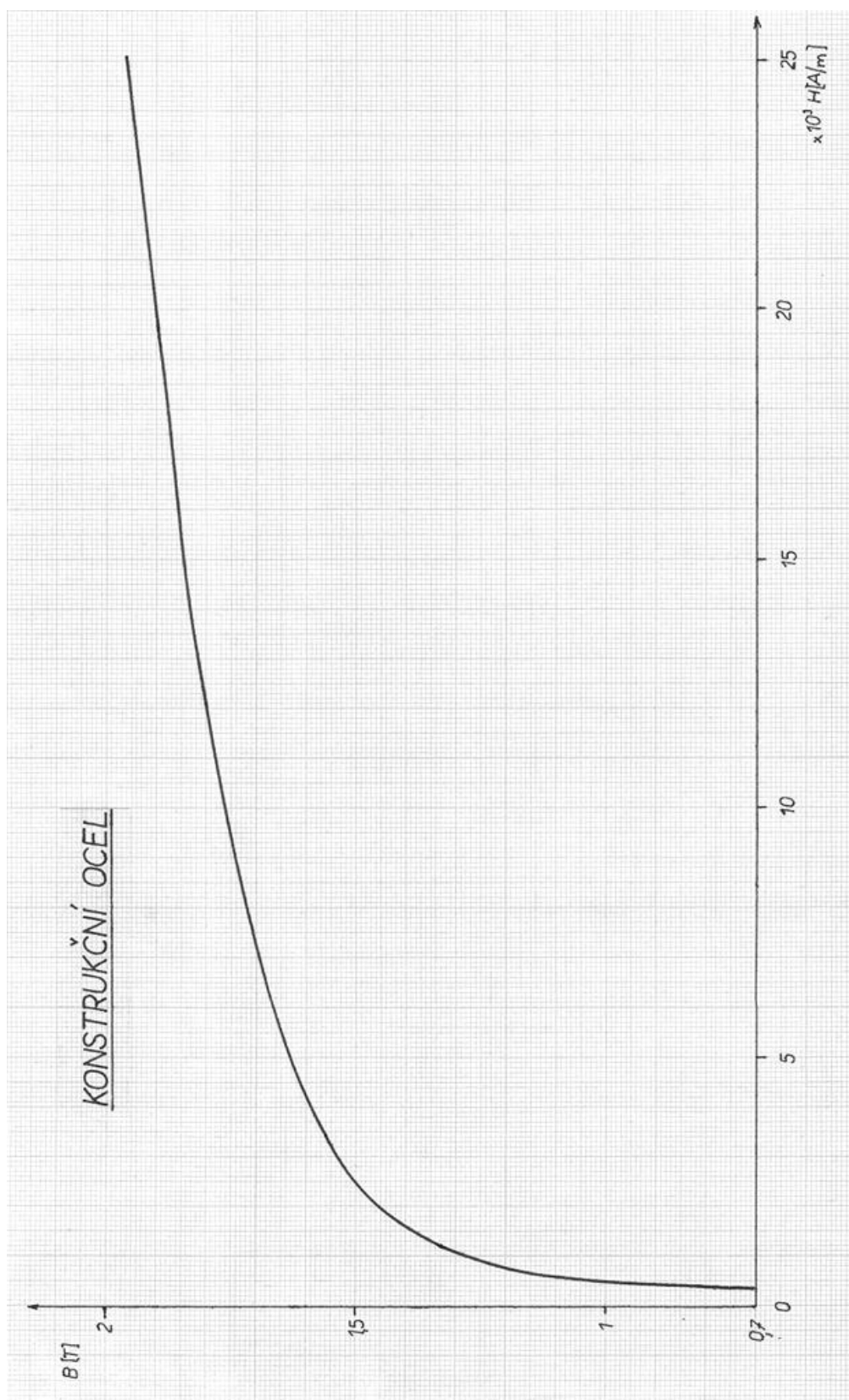


**Příloha X:** Magnetizační charakteristika použitých transformátorových plechů



[4]

**Příloha XI:** Magnetizační charakteristika konstrukční oceli

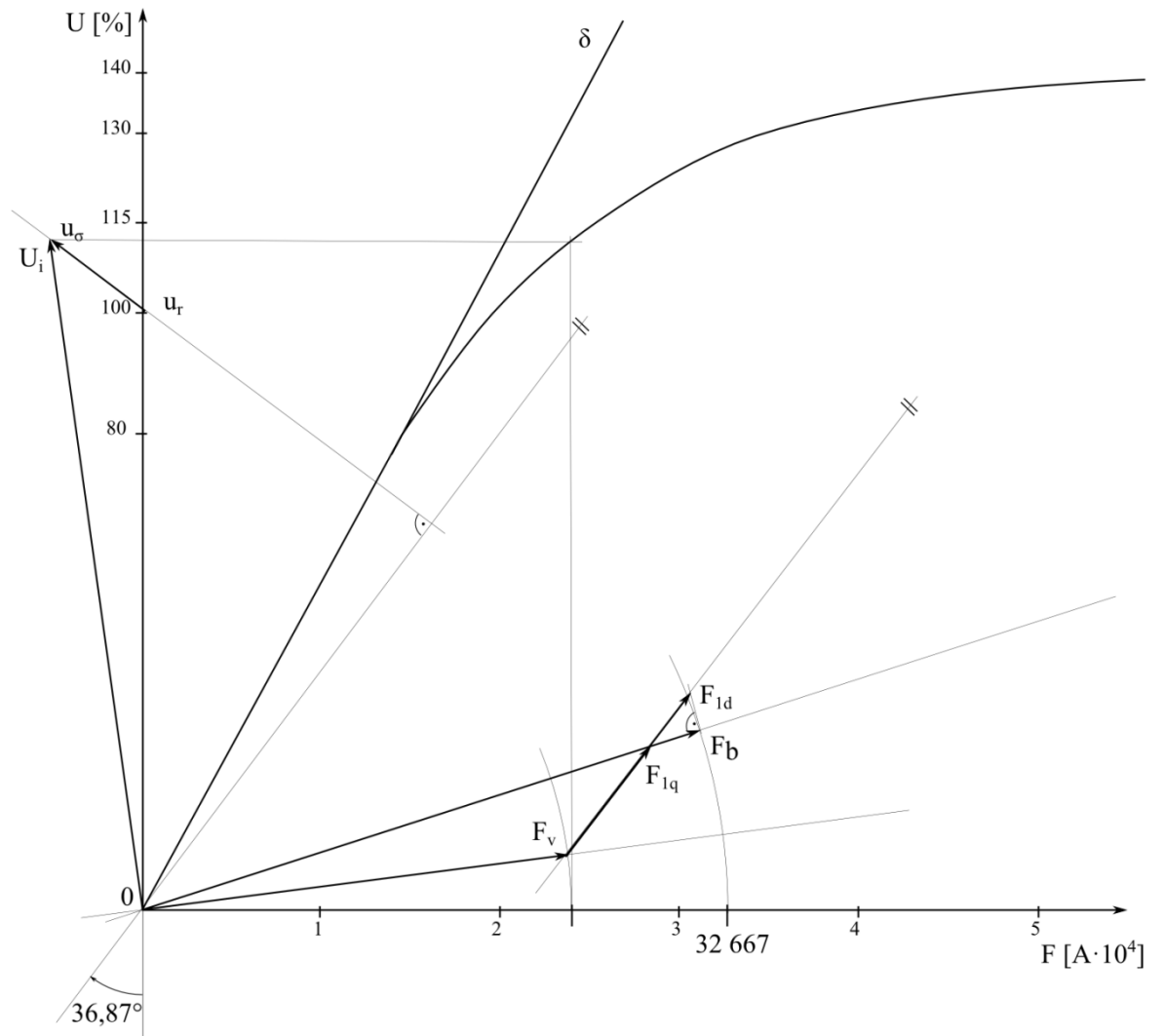


[4]

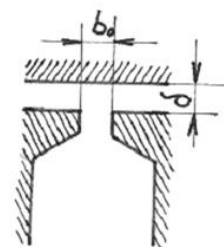
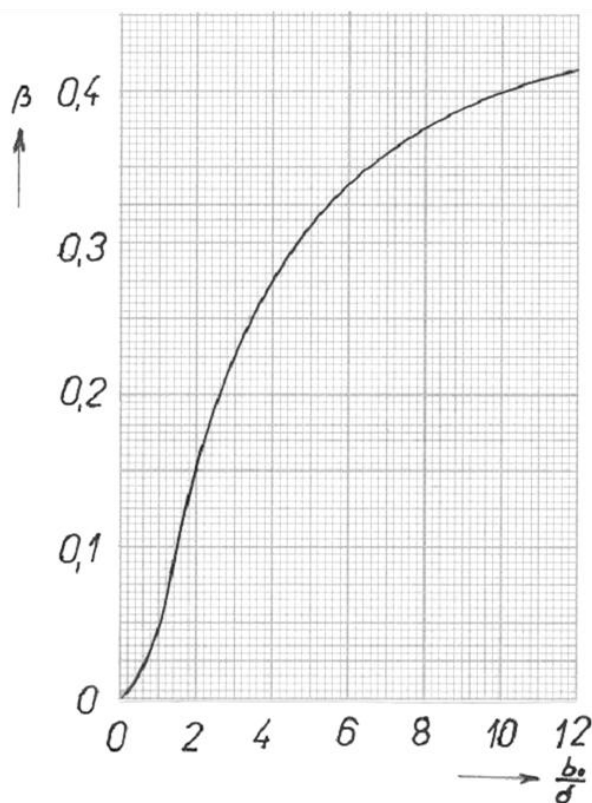
**Příloha XII:** Tabulky pro výpočet charakteristiky na prázdnó

D <sub>i</sub>	t <sub>0i</sub>	z <sub>i</sub>	k <sub>zi</sub>	B <sub>z1</sub> '	B <sub>z1</sub>	H <sub>zi</sub>	H <sub>zstr</sub>	F <sub>z</sub>	k <sub>1</sub> φ			k <sub>2</sub> φ			k <sub>3</sub> φ			
									B	H	F	B	H	F	B	H	F	
φ	4,3	0,0585	0,0315	1,01923	1,8173	1,795	11000	7033,33	865,1									
	4,4	0,0602	0,0332	0,97219	1,7256	1,711	6750											
	4,5	0,0618	0,0348	0,92967	1,6427	1,643	4200											
k <sub>1</sub> φ			k <sub>1</sub> =	1,15	2,0899	2,019	42000	26500	3259,5									
k <sub>2</sub> φ			k <sub>2</sub> =	1,3	2,2433	2,113	48000	49208,3	6052,63									
k <sub>3</sub> φ			k <sub>3</sub> =	0,8	1,4538	1,454	1225	883,333	108,65									
		1,3805			1,380	850												
		1,3142			1,314	675												
k <sub>3</sub> φ			k <sub>3</sub> =	1,4	2,9259	2,371	205000	173933	21393,8									
Vzduchová mezera				14305,94	0,9	17882,4												
Hlava zubu	B <sub>z1</sub> '		0,72		1,817	11000												
	B <sub>z1</sub>		1,454	1225	1,795													
	B <sub>z2</sub> '		1,380	850	1,726	6750												
Střed zubu	B <sub>z2</sub>		1,380		1,711													
	B <sub>z3</sub> '		1,314	675	1,643	4200												
Pata zubu	B <sub>z3</sub>		1,314		1,643													
Střední hodnota	~hz		883,333	108,65	7033,33	865,1												
Jádro induktu	~ls		1,04	320	1,3	630	168,83											
Suma mezera, zub, jádro			14500		18916													
Pól	~jp		600	115,79	1,4	1600	308,77											
Jho	~lr		400	86,80	1,1	570	123,69											
Suma pól, jho			203		432													
Výsledná hodnota			14703		19349													

**Příloha XIII:** Charakteristika na prázdkno



## Příloha XIV: Činitelé povrchových ztrát v pólovém nástavci



$k_p = 23,5$  kovaná ocel

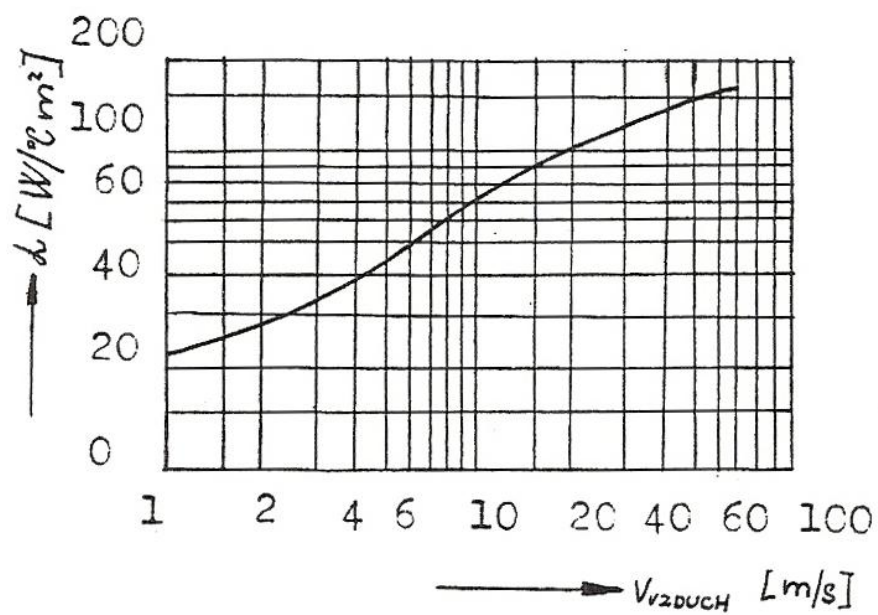
17,5 litina

8,6 plech 2 mm

2,8 plech 0,5 mm

[4]

## Příloha XV: Činitelé povrchových ztrát v pólovém nastavci



[4]

## Příloha XVI: Rozměry a další parametry kartáčů

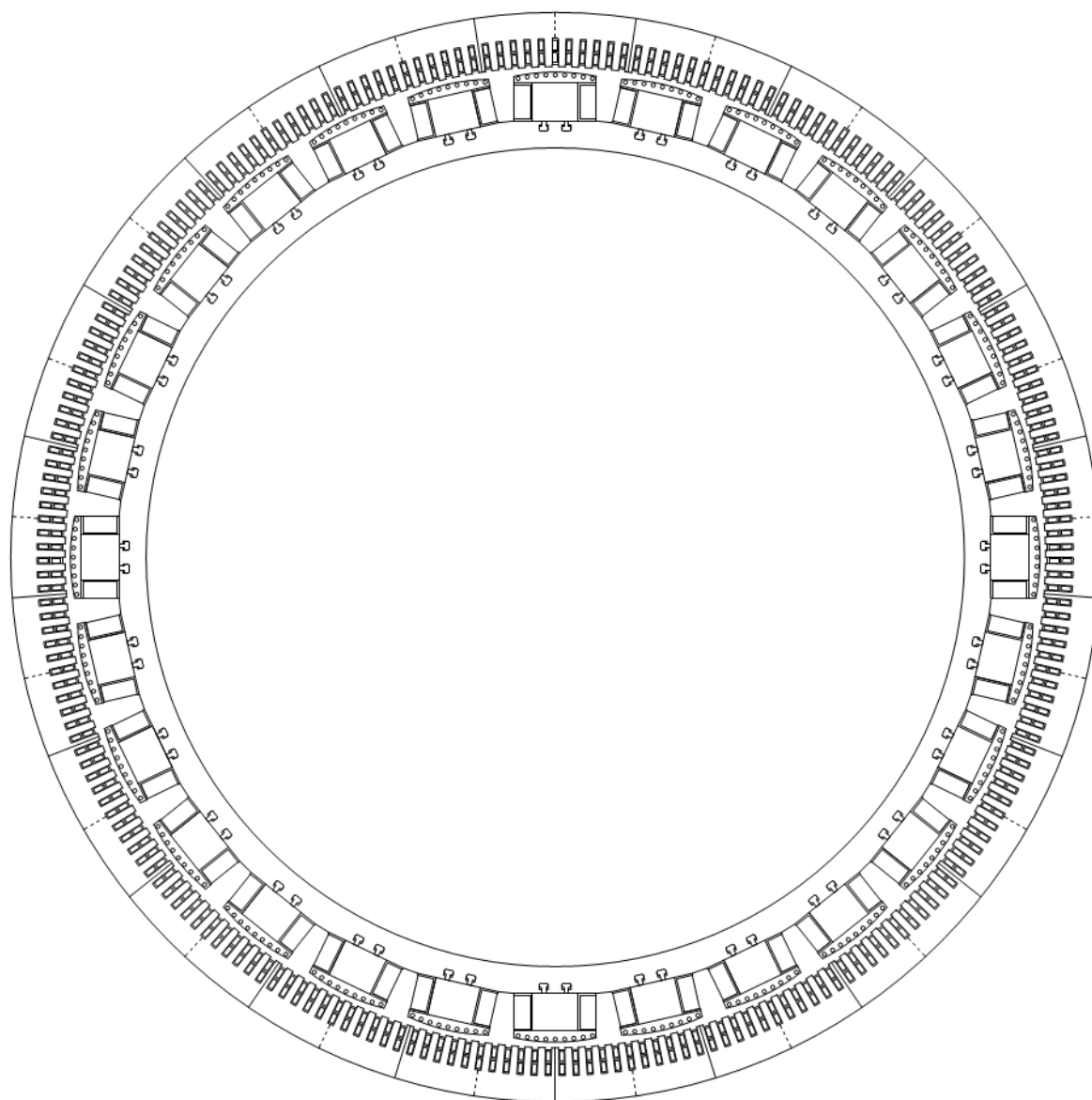
## Doporučené rozměry kartáčů

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

## Kartáče pro kroužky – vlastnosti

Materiál	Označení	Proudová hustota [A/cm <sup>2</sup> ]	Max. obvodová rychlost [m/s]	Měrný tlak [kPa]	Celkový úbytek napětí [V]
<b>Grafit</b>	RGE	8	75	14	3,8
<b>Elektrografit</b>	EK24	10	40	18	209
<b>Kovografit</b>	K11	18	20	22	0,5
	K31	15	25	22	1,1
	K75	12	30	20	1,4
	O67	16	30	20	1,9
	MG 440	18	20	20	0,5

**Příloha XVII:** Zjednodušený náčrt příčného řezu strojem





## Příloha XVIII: Skript použitý pro výpočet momentové charakteristiky

```

1  function momentovka
2
3  -   F=25e+6;
4  -   p=14;
5  -   m=3;
6  -   f=50;
7  -   n=214;
8  -   w1=(n*pi)/30;
9  -   U=3464.102;
10 -   Ub=6166;
11 -   Xd=1.421;
12 -   Xq=1.019;
13 -   b=(-180:1:180);
14 -   A1=(Ub/Xd);
15 -   A2=(U/2)*((1/Xq)-(1/Xd));
16
17 -   pripona='emf';
18
19 -   figure(1)
20 -   M=((p*m*U)/(2*pi*f))*((A1*sin(b/180*pi))+(A2*sin(2*b/180*pi)));
21 -   plot(b,M)
22 -   title('Momentová charakteristika')
23 -   hline(0,'k')
24 -   vline(0,'k')
25 -   text(90, -2900000, 'zátežný úhel beta [\circ]')
26 -   text(-210, 1200000, 'moment M [Nm]', 'rotation', 90)
27 -   legend('boxon')
28 -   grid on
29 -   xlim([-180 180])
30 -   set(gca(), 'xtick', [-180:45:180]) %#ok<NBRAK>
31 -   box off
32 -   saveas(1, 'obr1_vysl_moment', pripona);
33
34 -   figure(2)
35 -   d=A1*sin(b/180*pi);
36 -   plot(b,d)
37 -   title('Momentová charakteristika')
38 -   hline(0,'k')
39 -   vline(0,'k')
40 -   text(90, -6000, 'zátežný úhel beta [\circ]')
41 -   text(-220, 2500, 'moment M [Nm]', 'rotation', 90)
42 -   legend('boxon')
43 -   grid on
44 -   xlim([-180 180])
45 -   set(gca(), 'xtick', [-180:45:180]) %#ok<NBRAK>
46 -   box off
47 -   saveas(2, 'obr2_hlavni', pripona);
48
49 -   figure(3)
50 -   f=A2*sin(2*b/180*pi);
51 -   plot(b,f)
52 -   title('Momentová charakteristika')
53 -   hline(0,'k')
54 -   vline(0,'k')
55 -   text(90, -590, 'zátežný úhel beta [\circ]')
56 -   text(-210, 250, 'moment M [Nm]', 'rotation', 90)
57 -   legend('boxon')
58 -   grid on
59 -   xlim([-180 180])
60 -   set(gca(), 'xtick', [-180:45:180]) %#ok<NBRAK>
61 -   box off
62 -   saveas(3, 'obr3_reluktančni', pripona);
63
64
65 -   Mn=P/w1 %#ok<NASGU,NOPRT>

```

**Příloha XIX:** Skript použitý pro výpočet momentové charakteristiky v programu FEMM

```
start=0
substeps=180

p=14
tp=360/p

dAlfa=-(tp/substeps)

if start == 0 then
  open("SG_10.fem")
  vystup=openfile("moment.txt", "w")
else
  open(format("SG_10_moment_%1$d.fem",start))
  vystup=openfile("moment.txt", "a")
end

mi_seteditmode("group")

mi_saveas(format("SG_10_moment_%1$d.fem",start))
mi_analyse()
mi_loadsolution()
mo_seteditmode("contour")
mo_selectpoint(-2139,0.05)
mo_selectpoint(2139,0.05)
mo_selectpoint(2139,-0.05)
mo_selectpoint(-2139,-0.05)
MDC,DM,TV,FV =mo_lineintegral(4)
write(vystup, MDC, "\n")
mo_close()

for n=(start+1),substeps do

  mi_selectgroup(1)
  mi_move_rotate(0,0,dAlfa)
  mi_saveas(format("SG_10_moment_%1$d.fem",n))
  mi_analyse()
  mi_loadsolution()
  mo_seteditmode("contour")
  mo_selectpoint(-2139,0.05)
  mo_selectpoint(2139,0.05)
  mo_selectpoint(2139,-0.05)
  mo_selectpoint(-2139,-0.05)
  MDC,DM,TV,FV =mo_lineintegral(4)
  write(vystup, MDC, "\n")
  mo_close()

end

closefile(vystup)
```