

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ
ELEKTROTECHNIKY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Vliv činitele pólového krytí na vlastnosti synchronního
generátoru.**

Vedoucí:

Doc. Ing. Josef Červený, CSc.

2012

Autor:

Bc. Jan Kahoun

Anotace:

Předkládaná diplomová práce objasňuje, jaký vliv bude mít změna velikosti činitele pólového krytí α na vlastnosti synchronního stroje. Zejména na magnetický obvod a rozměry stroje. Zadaná problematika je řešena pomocí elektromagnetického výpočtu stroje a metodou konečných prvků v programu FEMM.

Klíčová slova:

Činitel pólového krytí, synchronní stroj, generátor, vlastnosti, elektromagnetický výpočet, metoda konečných prvků, FEMM, pólový nástavec, magnetická indukce

Abstract:

Presented master thesis deals with an effect of the pole coverage factor α on the properties of cover pole synchronous machine, mainly on the magnetic circuit and dimensions of the machine. This problem is solved using an electromagnetic calculation and method of finite elements in FEMM software.

Keywords:

Pole coverage factor, cover pole synchronous machine, generator, properties of synchronous generator, electromagnetic calculation, method of finite elements, FEMM, magnetic induction,

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni. Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

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

V Plzni dne 9.5.2012

Jméno příjmení

.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Josefu Červenému, CSc. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Seznam obrázků

Obrázek 1 Ukázka základního konstrukčního uspořádání	2
Obrázek 2 Drážka	12
Obrázek 3 Drážka s vyznačenými vzdálenostmi h_1' a h_2'	15
Obrázek 4 Konstrukce charakteristiky naprázdno $\alpha = 0,65$	21
Obrázek 5 Konstrukce charakteristiky naprázdno $\alpha = 0,75$	22
Obrázek 6 Konstrukční rozložení stroje s $\alpha = 0,65$ a detail cívky	30
Obrázek 7 Konstrukční rozložení stroje s $\alpha = 0,75$ a detail cívky	30
Obrázek 8 Ukázka definovaných materiálů v programu FEMM $\alpha = 0,65$	31
Obrázek 9 Ukázka sítě $\alpha = 0,75$	31
Obrázek 10 Simulace stroje $\alpha = 0,65$	32
Obrázek 11 Simulace stroje $\alpha = 0,75$	32
Obrázek 12 Průřez celým synchronním generátorem $\alpha = 0,65$	33
Obrázek 13 Průběh magnetické indukce pod pólem stroje s $\alpha = 0,65$	34
Obrázek 14 Průběh magnetické indukce pod pólem stroje s $\alpha = 0,75$	34
Obrázek 15 Porovnání obou průběhů	35
Obrázek 16 Spektrální analýza B_δ $\alpha = 0,65$	36
Obrázek 17 Spektrální analýza B_δ $\alpha = 0,65$	36

Seznam tabulek

Tabulka 2.1 <i>Rozložení vodičů v drážce</i>	11
Tabulka 2.2 <i>Tloušťky izolací v drážce</i>	12
Tabulka 2.3 <i>Tabulka konstanty k určení konstanty K</i>	13
Tabulka 2.4 <i>Výběh z drážky v</i>	14
Tabulka 3.1 <i>Procentní hodnota nenasycené synchronní reaktance</i>	16
Tabulka 3.2 <i>Tabulka s výpočtem magnetického napětí v zubech statoru.</i>	19
Tabulka 3.3 <i>Tabulka pro určení magnetického napětí</i>	20

Obsah

1.	ÚVOD.....	1
2.	ELEKTROMAGNETICKÝ NÁVRH SYNCHRONNÍHO GENERÁTORU:	3
2.1.	Zadané parametry	3
2.2.	Základní hodnoty	3
2.3.	Návrh vinutí induktu	5
	2.3.1. Parametry vinutí	7
	2.3.2. Výpočet činitelů vinutí:	8
	2.3.3. Essonův činitel	9
2.4.	Návrh drážky:	10
2.5.	Vodič:.....	12
2.6.	Odpor a rozptylová reaktance statorového vinutí:	13
3.	NÁVRH MAGNETICKÉHO OBVODU:	16
3.1.	Magnetické napětí reakce kotvy	17
3.2.	Dimenzování magnetického obvodu	17
	3.2.1. Délky středních siločar částí magnetického obvodu:	18
	3.2.2. Carterův činitel	19
	3.2.3. Magnetické napětí na vzduchové mezeře:	19
3.3.	Výpočet charakteristiky naprázdno	19
3.4.	Návrh budícího vinutí	23
	3.4.1. pro $\alpha = 0,65$:	23
	3.4.2. pro $\alpha = 0,75$:	25
4.	ZTRÁTY A ÚČINNOST:.....	27
4.1.	Celkové ztráty pro $\alpha=0,65$:	28
4.2.	Celkové ztráty pro $\alpha=0,75$:	28
5.	PŘEHLED VYPOČTENÝCH HODNOT	29
6.	MODELOVÁNÍ SYNCHRONNÍHO GENERÁTORU V PROGRAMU FEMM.....	30
6.1.	$\alpha = 0,65$	30
6.2.	$\alpha = 0,75$	30
7.	VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	34
7.1.	Průběhy magnetické indukce	34
7.2.	Spektrální analýza	35
8.	ZÁVĚR.....	37
9.	LITERATURA.....	38
10.	PŘÍLOHA	39

1. Úvod

Elektrické stroje slouží lidem již více než 120 let. Pro lidstvo měli vždy velký význam a znamenali velký technický pokrok. Hlavním úkolem elektrických strojů točivých je převádět elektrickou energii na mechanickou a naopak. I když stroje doznali značných změn. Je dnes stejně důležité zabývat se problematikou a vývojem elektrických strojů, jako kdysi.

Vývoj elektrických strojů představoval velké časové a výpočtové nároky na konstruktéry. Konstruktéři se snažili optimalizovat elektromagnetický návrh stroje tak, aby stroje měli dobrou účinnost a aby dosáhli snížení provozních nákladů. Velkého pokroku dosáhli po roce 1950, kdy byly nasazeny první počítače. Avšak použití klasických výpočtů a empirických vztahů z praxe dodnes nevymizely. Navrhování elektrických strojů nelze provést analyticky postupem od známých veličin k neznámým. Nejvhodnější je předběžně zvolit některé rozměry stroje podle již provedených strojů. Na jejich základě provést výpočet a pak kontrolovat, zda byly zvolené hodnoty dodrženy. [4]

Na začátku každého návrhu je zásadní správně určit vnitřní průměr stroje a jeho délku. Dále se přistupuje k návrhu vinutí a k výpočtu rozměrů magnetickému obvodu. Jedním z určujících faktorů, které charakterizují technickou úroveň strojů, je jejich hmotnost. [2]

Navrhováním a výpočtem elektrických strojů se již zabývalo mnoho inženýrů ze všech koutů světa. Dnes ze získaných poznatků stavíme moderní a bezpečné elektrické stroje o velkých výkonech.

Synchronní generátory jsou střídavé elektrické stroje pro přeměnu mechanické energie na elektrickou. Konstrukční uspořádání rotoru rozděluje synchronní stroje na dvě skupiny. Na stroje s hladkým rotorem a stroje s vyniklými póly. Stroje s vyniklými póly jsou pomaluběžné, jejich použití je výhodné zejména ve vodních elektrárnách. Používá se pojmu hydroalternátory.

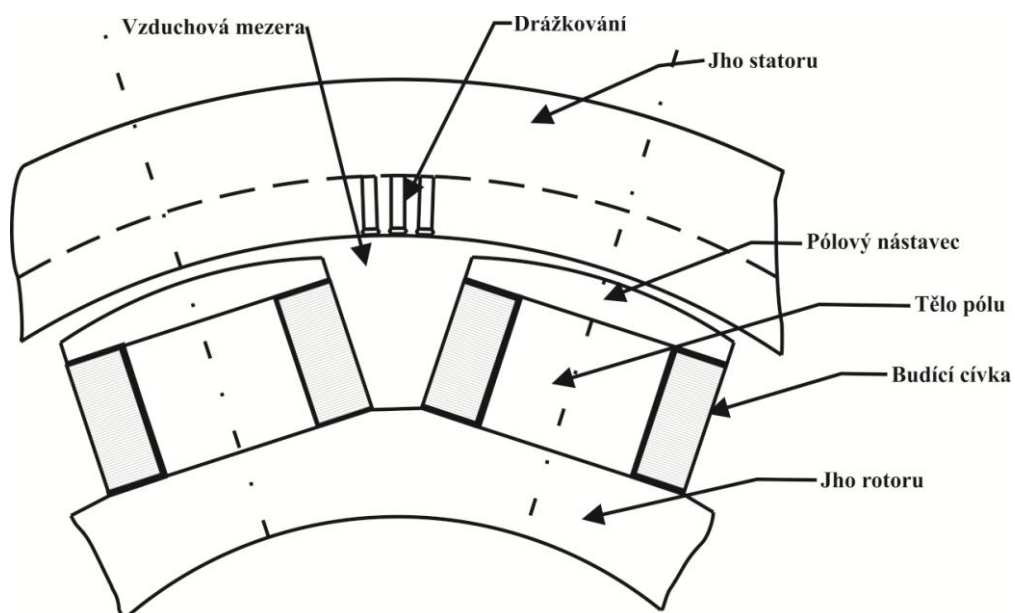
Hydroalternátory jsou často malé délky (cca 1 m) a velkého průměru (2-20 m). Dosahuje se s nimi výkonu 1000 MW i více. Stator je stejný jako u asynchronních strojů. Rotor tvoří hřídel, na níž je magnetové kolo s příslušným počtem závitů (4-36). Pro představu je konstrukční uspořádání uvedeno na *obr. 1*. Ve statoru je zpravidla střídavé vinutí a v rotoru budící vinutí napájené stejnosměrným proudem. Každý pól má svou vlastní budící cívku. V některých případech též budící a rozběhové vinutí. [3]

Činitel pólového krytí α je rovný poměru délky pólového oblouku k pólové rozteči. Závisí na rozměrech a uspořádání pólového nástavce. Velikost a tvar pólového nástavce

ovlivňuje velikost vzduchové mezery, která má pak vliv na elektromagnetické pole stroje. To se projeví na velikosti magnetického toku, indukovaného napětí a tím i na rozměrech stroje. [2]

Vlastní diplomovou práci lze rozdělit na dvě části: na elektromagnetický výpočet a na následné ověření elektromagnetického výpočtu simulací stroje v programu FEMM.

V programu FEMM byl sestaven výpočetní model synchronního stroje s patřičnými počátečními a okrajovými podmínkami pro obě verze zadání, jak pro $\alpha = 0,65$ i pro $\alpha = 0,75$. Následně je zkoumán, jaký rozdíl nastane vlivem změny činitele pólového krytí α . Výsledkem této práce bude porovnání magnetických polí obou strojů.



Obrázek 1 Ukázka základního konstrukčního uspořádání.

2. Elektromagnetický návrh synchronního generátoru:

Při elektromagnetickém návrhu postupujeme takto. Nejprve vypočítáme základní elektrické veličiny odpovídající zadání. Poté určíme hlavní rozměry stroje (tj. vnitřní průměr a délku). Pak se navrhne vinutí statoru, rozměr drážky, výšky jha statoru a velikost vzduchové mezery. Dále následuje výpočet magnetického obvodu stroje, návrh budícího vinutí a výpočet odporů a reaktancí. Nakonec výpočet ztrát a účinnosti stroje.

Při výpočtech na větší počet desetinných míst je zaokrouhlováno na 2 desetinná místa.

2.1. Zadané parametry

Pro návrh elektrického stroje se zadávají tyto výchozí jmenovité hodnoty:

<i>zdánlivý výkon</i>	$S = 12000 \text{ kVA}$
<i>sdružené napětí</i>	$U_s = 6300 \text{ V}$
<i>počet pólů</i>	$2p = 10$
<i>frekvence</i>	$f = 50 \text{ Hz}$
<i>účinník</i>	$\cos \phi = 0,8$
<i>počet fází</i>	$m = 3$
<i>činitel pólového krytí</i>	$\alpha = 0,65 \text{ a } \alpha = 0,75$

2.2. Základní hodnoty

- **Činný výkon**

$$P = S \cdot \cos \phi = 12\,000\,000 \cdot 0,8 = 9600 \text{ kW} \quad (1)$$

- **Fázové napětí**

$$U_f = \frac{U}{\sqrt{3}} = \frac{6300}{\sqrt{3}} = 3\,637 \text{ V} \quad (2)$$

- **Otáčky**

$$n = \frac{60f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{5} = 600 \text{ ot/min} \quad (3)$$

- **Proud**

$$I_1 = \frac{S}{U_s \cdot \sqrt{3}} = \frac{12\,000\,000}{6300 \cdot \sqrt{3}} = 1100 \text{ A} \quad (4)$$

- **Průměr induktu:**

Na průměr induktu je kladeno velké množství požadavků, proto jej nelze jednoznačně určit. Musíme propočítat více možností. Zde použijeme empirického vztahu a závislosti $D_1 = f(S)$. Oba výsledky porovnáme a určíme předběžnou hodnotu.

Podle empirického vztahu:

$$D_1 = 0,08 \cdot (2p)^{0,625} \cdot S^{0,185} = 0,08 \cdot (2 \cdot 5)^{0,625} \cdot 12000^{0,185} = 1,92 \text{ m} \quad (5)$$

Zdánlivý výkon S dosazujeme v kVA.

Z grafu

příloha str. 2

$$D_1 = 2,1 \text{ m}$$

Byla zvolena hodnota: $D_1 = 2,1 \text{ m}$

- **Dále z grafů zjistíme:**

Lineární proudová hustota: $A = 65 \cdot 10^3 \text{ A/m}$

příloha str. 1

Indukce ve vzduchové mezeře: $B_\delta = 0,88 \text{ T}$

příloha str. 1

Tyto hodnoty je nutné chápat jako předběžné a pravděpodobně se v průběhu dalšího výpočtu upřesní bude-li to nutné.

- **Mezipólová rozteč:**

Ze zvoleného vnitřního průměru se určí pólová rozteč.

$$t_p = \frac{D_1 \cdot \pi}{2p} = \frac{2,1 \cdot \pi}{2 \cdot 5} = 0,66 \text{ m} \quad (6)$$

2.3. Návrh vinutí induktu

- **Drážková rozteč:**

Drážková rozteč je volena v rozmezí (40 – 60 mm)

$$t_{d1} = 50 \text{ mm}$$

- **Počet drážek**

Při výpočtu počtu drážek musí být splněny následující požadavky:

1. Počet drážek musí být dělitelný počtem fází a počtem paralelních větví
2. Počet drážek na pól a fázi musí být číslo celé nebo zlomek, který nelze krátit.

Volí se takový počet drážek, který co nejlépe vyhovuje všem požadavkům.

$$Q = \frac{\pi \cdot D_1}{t_{d1}} = \frac{\pi \cdot 2,1}{0,05} = 131,95 \text{ drážek} \quad (7)$$

- **Počet drážek na pól a fázi:**

$$q = \frac{Q}{2 \cdot p \cdot m} = \frac{131,95}{2 \cdot 5 \cdot 3} = 4,4 \text{ drážky} \quad (8)$$

Počet drážek na pól a fázi je menší než 7 a 8, volíme zlomkové vinutí, pak $q = \frac{n}{c}$. Aby byl počet drážek v každé fázi stejný, musí platit:

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

$$q = 4,4 = 4 \frac{2}{5} = \frac{22}{5} \quad (9)$$

$$n = 22$$

$$c = 5 \quad c - \text{nesmí být dělitelné počtem fází } m$$

$$\text{Pak } Q_f = \frac{Q}{m} = \frac{2pmq}{m} = 2pq = 10 \cdot \frac{22}{5} = 44 = \text{číslo celé} \quad (10)$$

Je-li znám počet drážek na pól a fázi určíme celkový počet drážek.

$$Q = Q_f \cdot m = 44 \cdot 3 = 132 \quad (11)$$

- **Volba počtu segmentů statorových plechů**

Volba počtu segmentů statorových plechů je nutná v případě že vnější průměr statoru $D_e > 1000 \text{ mm}$. Pokud nedokážeme indukt vhodně rozdělit na segmenty, musíme změnit počet drážek.

Počet drážek rozložíme na prvočísla.

$$Q = 132 = 2,2,3,11$$

Při skládání plechů uvažujeme poloviční nebo třetinový překlad. Musí platit.

$$Q = k \cdot n_s \cdot Q_{př}$$

n_s - **počet segmentů**, pro většinu velkých strojů je to číslo celé a volí se v rozmezí od 6 do 18.

$Q_{př}$ - **počet drážek na překlad**, musí být číslo celé, dělicí rovina musí procházet středem drážek.

k - **překladové číslo**,

$$k = 2$$

$$n_s = 11$$

$$Q_{př} = 6$$

- **Počet závitů jedné fáze v sérii:**
$$N_s = \frac{\pi \cdot D_1 \cdot A}{2 \cdot m \cdot I_1} = \frac{\pi \cdot 2,1 \cdot 65000}{2 \cdot 3 \cdot 1100} = 65 \quad (12)$$

- **Počet vodičů v jedné drážce pro a = 1:**
$$n_d = \frac{a \cdot N_s}{p \cdot q} = \frac{1 \cdot 65}{5 \cdot 4,4} = 2,96 \quad (13)$$

Protože pro dvouvrstvé vinutí musí být počet vodičů v drážce sudý, musíme zaokrouhlit na celé sudé číslo, v tomto případě by zaokrouhlení bylo příliš velké, proto volíme $a = 2$.

- **Počet vodičů v jedné drážce pro a = 2:**
$$n_d = \frac{a \cdot N_s}{p \cdot q} = \frac{2 \cdot 65}{5 \cdot 4,4} = 5,91 \quad (14)$$

zaokrouhlíme $n_d = 6$

Při volbě $a > 1$ musíme zkontrolovat, zda je tento počet paralelních větví možný.

- **Počet skupin vinutí:**
$$a_{ss} m' = 2 \cdot 6 = 12 \quad (15)$$

- **Počet skupin v 1 fázi:**
$$\frac{a_{ss} \cdot m'}{m} = \frac{2 \cdot 6}{3} = 4 \quad (16)$$

- **Počet cívek ve skupině:** $\frac{Q}{a_{ss} \cdot m} = \frac{132}{2 \cdot 6} = 33$ (17)

Můžeme pokračovat, vinutí půjde rozstříhat. Protože je každá fáze tvořena 4 skupinami cívek po 33 cívkách je možné tyto skupiny spojit paralelně, takže lze volit $a = 2$. Pro novou hodnotu a je nutně znovu vypočítat počet závitů ve fázi N_s a skutečnou hodnotu lineární proudové hustoty A .

- **Skutečný počet závitů jedné fáze:** $N_s = \frac{n_d \cdot p \cdot q}{a} = \frac{6 \cdot 5 \cdot 4,4}{2} = 66$ (18)

- **Skutečná hodnota lineární proudové hustoty:**

$$A = \frac{2 \cdot m \cdot I_1}{\pi \cdot D_1} \cdot N_s = \frac{2 \cdot 3 \cdot 1100}{\pi \cdot 2,1} \cdot N_s = 66009 \text{ A/m} \quad (19)$$

2.3.1. Parametry vinutí

<i>Typ vinutí:</i>	Vlnové
<i>Počet drážek:</i>	$Q = 132$
<i>Počet pólů:</i>	$2p = 10$
<i>Počet fází:</i>	$m = 3$
<i>Matematický počet fází:</i>	$m' = 6$

- **Počet drážek na pól a fázi:** $q = 4\frac{2}{5} = 4,4$ (20)

- **Počet drážek na pól:** $y_{1d} \sim Q_p = \frac{Q}{2p} = \frac{132}{10} = 13,2$ (21)

Zkrátíme cívkový krok, kvůli snížení vlivu vyšších harmonických.

- **Cívkový krok:** $y_{1d} = 11$ (22)

- **Poměrné zkrácení kroku:** $\beta = \frac{y_{1d}}{Q_p} = \frac{11}{13,2} = 0,833$ (23)

- **Krok na komutátoru:** $y_k = \frac{\varepsilon \cdot k \pm a}{p} = \frac{1 \cdot 132 - 2}{5} = 26$ (24)

Základní stejnosměrné vinutí je vlnové ($\varepsilon=1$), nekřížené (v čitateli je znaménko, -“).

- **Přední cívkový krok:**

$$y_1 = 2u \cdot y_{1d} + 1 = 2 \cdot 11 + 1 = 23 \quad (25)$$

- **Zadní cívkový krok:**

$$y_2 = 2 \cdot y_k - y_1 = 2 \cdot 26 - 23 = 29 \quad (26)$$

2.3.2. Výpočet činitelů vinutí:

- **Činitel vinutí v té harmonické:**

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

Kde:

v	řád harmonické
β	poměrné zkrácení kroku
m'	matematický počet fází
n	čítatel počtu drážek na pól a fází ze $q = \frac{n}{c}$

- **Činitel základní harmonické (v = 1):**

$$k_{v1} = \sin\left(1,0,833 \cdot \frac{\pi}{2}\right) \frac{\sin\left(1 \cdot \frac{\pi}{6}\right)}{24 \cdot \sin\left(1 \cdot \frac{\pi}{6 \cdot 22}\right)} = 0,9361 \quad (27)$$

Po postupném dosazení za v = 3, 5, 7, 11, 13 určíme činitele vinutí příslušných harmonických:

$$k_{v3} = -0,53$$

$$k_{v5} = 0,1$$

$$k_{v7} = 0,02$$

$$k_{v11} = -0,05$$

$$k_{v13} = -0,06$$

2.3.3. Essonův činitel

Činitel elektromagnetického využití stroje.

$$C = \frac{\pi^2}{60 \cdot \sqrt{2}} \cdot A \cdot B_\delta \cdot k_{v1} = \frac{\pi^2}{60 \cdot \sqrt{2}} \cdot 66 \cdot 0,88 \cdot 0,9361 = 6,3 \text{ kVA/m}^3 \cdot \text{ot/min} \quad (28)$$

Hodnota lineární proudové hustoty A je dosazena kA/m

- **Efektivní délka stroje:**

$$l_e = \frac{S}{C \cdot D_1^2 \cdot n} = \frac{12000}{6,3 \cdot 2,1^2 \cdot 600} = 0,72 \text{ m} \quad (29)$$

Zdánlivý výkon S dosazujeme v kVA.

Předpokládá se použití radiálních chladících kanálů, které rozdělí plechový svazek induktu na pakety o zvolené šířce přibližně $\check{s}_p = 50\text{mm}$, šířka kanálu $\check{s}_k = 10\text{mm}$.

- Počet paketů $i = \frac{l_e}{\check{s}_p} = \frac{720}{50} = 14 \quad (30)$

- Počet kanálů $i_k = i - 1 = 14 - 1 = 13 \quad (31)$

- **Celková délka induktu:**

$$L = l_e + \check{s}_k \cdot i_k = 0,72 + 0,01 \cdot 13 = 0,84 \text{ m} \quad (32)$$

2.4. Návrh drážky:

Uurčíme rozměry drážky pro závitové vinutí $n_d = 6$

Na induktu je použita otevřená obdélníková drážka tvaru M, to znamená, že zuby budou lichoběžníkového tvaru.

- **Velikost drážkové rozteče na průměru D_1 :**

$$t_{d1} = \frac{D_1 \cdot \pi}{Q} = \frac{\pi \cdot 2100}{132} = 50 \text{ mm} \quad (33)$$

- **Šířka zubu:**

$$z_1 = \frac{B'_\delta \cdot t_{d1}}{B_{z1} \cdot k_{fe}} = \frac{0,88 \cdot 50}{1,65 \cdot 0,92} = 28,97 \text{ mm} \quad (34)$$

B'_{z1} - magnetická indukce v hlavě zubu (na průměru D_1), v rozmezí (1,55 až 1,85)

$k_{fe} = 0,92$ - činitel plnění železa

- **Šířka drážky:**

$$b_d = t_{d1} - z_1 = 50 - 28,97 = 21 \text{ mm} \quad (35)$$

Nejbližší normalizovaná šířka drážky podle tabulky drážky M je:

$$b_d = 21 \text{ mm}$$

Šířka drážky zvětšuje pulzní ztráty na povrchu pólových nástavců. S konečnou platností se šířka drážky určí podle zvoleného vodiče pro vinutí (tabulka 2.1). Vodiče se do drážky ukládají na šířku (kratší strana je rovnoběžná s osou drážky). Tím se docílí zmenšení ztrát vířivými proudy.

Pak tedy šířka zubu bude:

$$z_1 = t_{d1} - b_d = 50 - 21 = 29 \text{ mm} \quad (36)$$

Pro napětí $U_s = 6300V$, odpovídá následující tabulka uspořádání vodičů a izolace v drážce:

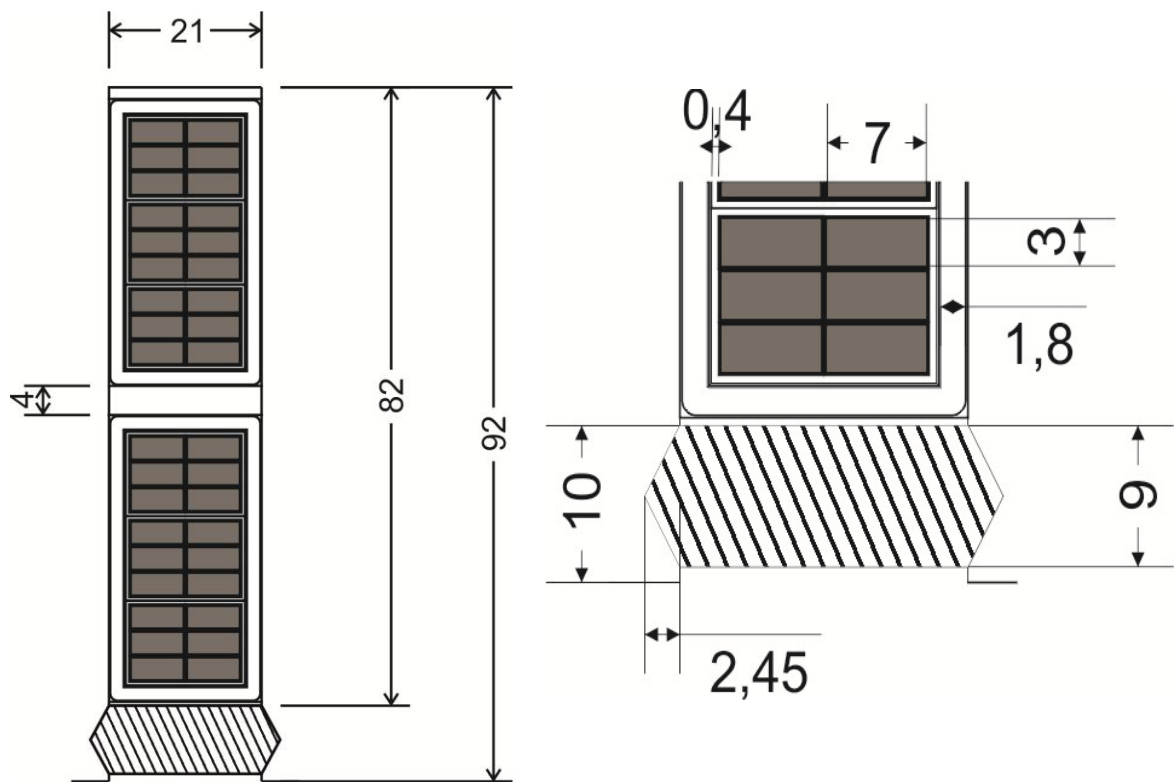
Poz.	Položka	Šířka [mm]		Hloubka [mm]	
1	Vyložení drážky	$2 \cdot 0,15$	0,3	$3 \cdot 0,15$	0,45
2	Izolace proti železu	$2 \cdot t_i = 2 \cdot 1,8$	3,6	$4 \cdot t_i = 4 \cdot 1,8$	7,2
3	Tmelení	$2 \cdot 0,1$	0,2	$4 \cdot 0,1$	0,4
4	Stažení vodičů	$2 \cdot 0,15$	0,3	$4 \cdot 0,15$	0,6
5	Izolace závitů	$j \cdot 0,48$ $= 2 \cdot 0,48$	0,96	$2 \cdot n_d \cdot 0,48 = 2 \cdot 6$ $\cdot 0,48$	5,76
6	Izolace vodičů	$j \cdot 0,4 = 2 \cdot 0,4$	0,8	$i \cdot n_d \cdot 0,4 = 2 \cdot 6 \cdot 0,4$	7,2
7	Mezivrstva	-	-	$1 \cdot m_y = 1 \cdot 4$	4
8	Celkem Izolace	-	6,16	-	25,61
9	Vůle na šířku	0,2 - 0,6	0,34	-	-
10	Holý vodič	$j \cdot b_v = 2 \cdot 7$	14	$(i \cdot h_v) \cdot n_d = (3 \cdot 3) \cdot 6$	54
11	Vložka na dno	-	-	$1 \cdot 1$	1
12	Vložka pod klín	-	-	$1 \cdot 0,5$	0,5
13	Vůle na hloubku	-	-	0,4 - 2	0,89
14	Rozměr drážky bez klínu		20,5		82
15	Klín + můstek			$h_0 + h_1 = 1 + 9$	10
16	Konečný rozměr drážky	b_d	21	h_2	92

Tabulka 2.1 Rozložení vodičů v drážce

- 1) Hloubku drážky bez klínu volíme dle normy ČSN, aby její velikost končila číslicí 0, 2, 5, 8.
- 2) Pro napětí $U_s = 6300V$ jsme vybraly z tabulek tloušťku izolace proti železu $t_i = 1,8 \text{ mm}$ jedná se o typ *Relanex*. Tabulka 2.2
- 3) Tloušťka mezivrstvy $m_y = 4 \text{ mm}$. Tabulka 2.2
- 4) Rozměry vodičů jsou podle normy ČSN 42 8308 – 1959 příloha str. 3

Napětí [kV]	Izolace proti železu – t: [mm]				Mezivrstva m _y [mm]
	Obyčejná	Lepší	Samicatherm	Relanex	
0,4 – 1,5	0,45	-	-	-	3
3	1,8	1,6	1,4	1,4	3
6,3	3	2,7	2,4	1,8	4
10,5	3,5	3,3	3,1	2,8	6
13,8	4,5	4,2	4	3,8	6
15,7		4,6	4,4	4	7
18		5,5	5	5	7

Tabulka 2.2 Tloušťky izolací v drážce



Obrázek 2 Drážka

2.5. Vodič:

- Průřez vodiče:

$$S'_{cu1} = \frac{I_1}{a_{st} \cdot \sigma_{cu1}} = \frac{1100}{2 \cdot 3,7} = 149 \text{ mm}^2 \quad (37)$$

- Proudovou hustotu ve vodiči jsme určili z empirického vztahu:

$$\sigma_{cu1} = \sqrt{\frac{K}{b_v}} = \sqrt{\frac{190}{14}} = 3,7 \text{ A/mm}^2 \quad (38)$$

b_v - šířka holého vodiče v drážce

K - konstanta závislá na napětí dle tabulky 2.3

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

Tabulka 2.3 Tabulka konstanty k určení konstanty K

- Výška vodiče při šířce: $b_v = 14 \text{ mm}$:

$$h_v = \frac{S_{cu1}}{b_v} = \frac{126}{14} = 9 \text{ mm} \quad (39)$$

Protože při takto vysokém vodiči by byly velké přídavné ztráty vlivem skin efektu, je třeba rozdělit vodič na větší počet paralelních vodičů menších rozměrů. Vodiče volíme podle normalizovaných rozměrů a jím odpovídajícímu skutečnému průřezu, který respektuje zaoblení hran i nerovnost povrchu.

Původní vodič je rozdělen na šířku ($j = 2$), výšku ($i = 3$) o rozměrech vodiče holého/izolovaného: ($7 \times 3/7,4 \times 3,4$) mm a skutečný průřez jednoho vodiče je dle ČSN.

příloha str. 3

$$S_1 = 20,4 \text{ mm}^2$$

- Výsledný průřez vodičů tvořící jeden závit je:

$$S_{cu1} = j \cdot i \cdot S_1 = 2 \cdot 3 \cdot 20,4 = 122,4 \quad (40)$$

- Skutečná proudová hustota:

$$\sigma_{cu1} = \frac{I_1}{a_{st} \cdot S_{cu1}} = \frac{1100}{2 \cdot 122,4} = 4,5 \text{ A/mm}^2 \quad (41)$$

2.6. Odpor a rozptylová reaktance statorového vinutí:

Odpor a rozptylovou reaktanci je nutné znát k sestavení charakteristiky naprázdno.

- Úhel sklonu čel válcového vinutí:

$$\sin \alpha_{\xi} = \frac{b_c + c}{t_{d1}} = \frac{21 + 7,15}{50} = 0,56 \quad (42)$$

$$\alpha_{\xi} = \arcsin 0,56 = 34^\circ$$

- Vzdálenost mezi čely:

$$c = 4 + \frac{U [\text{kV}]}{2} = 4 + \frac{6,3}{2} = 7,15 \text{ mm} \quad (43)$$

$$x = \frac{\beta \cdot t_p}{2 \cdot \cos \alpha_{\xi}} = \frac{0,83 \cdot 0,66}{2 \cdot 0,829} = 330 \text{ mm} \quad (44)$$

- **Délka oka:**

$$o = \frac{\pi \cdot R}{2} = \frac{\pi \cdot 60}{2} = 94,2 \text{ mm} \quad (45)$$

Výběh z drážky v , je závislý na napětí stroje podle následující tabulky:

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

Tabulka 2.4 Výběh z drážky

- **Délka čela:**

$$l_{\xi} = 2 \cdot (v + x + o) = 2 \cdot (50 + 330 + 94,2) = 950 \text{ mm} = 0,95 \text{ m} \quad (46)$$

- **Délka vodiče:**

$$l_v = L + l_{\xi} = 0,842 + 0,95 = 1,79 \text{ m} \quad (47)$$

- **Elektrický odpor pro stejnosměrný proud (bez uvažování skinefektu):**

$$R'_{1/20} = \rho_{cu} \cdot \frac{2 \cdot l_v \cdot N_s}{a_{st} \cdot S_{cu1}} = \frac{1}{56} \cdot \frac{2 \cdot 1,79 \cdot 66}{2 \cdot 122,4} = 0,017 \Omega \quad (48)$$

$$\rho_{cu} = \frac{1}{56} \left[\Omega \cdot \frac{\text{m}}{\text{mm}^2} \right] - \text{měrný odpor měděného vodiče při teplotě } 20^\circ\text{C}$$

Vliv skinefektu:

- **Náhradní výška vodiče:**

$$\varepsilon = 2 \cdot \pi \cdot h_v \cdot \sqrt{\frac{j \cdot b_v \cdot f}{b_a \cdot \rho_{cu}}} \cdot 10^{-7} = 2 \cdot \pi \cdot 3 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 7 \cdot 50}{21 \cdot \frac{1}{56}}} \cdot 10^{-7} = 0,258 \quad (49)$$

- **Činitel zvýšení elektrického odporu:**

$$k_{cu} = \frac{g^2 - 0,2}{9} \cdot \varepsilon^4 = \frac{18^2 - 0,2}{9} \cdot 0,258^4 = 0,158 \quad (50)$$

$$g = i \cdot n_d = 3 \cdot 6 = 18 \quad (51)$$

g – celkový počet vodičů

k_{cu} – odpovídá, mělo by být menší než 0,2

- **Odpor při střídavém proudu při 20°C:**

$$R_{1/20} = (1 + k_{cu}) \cdot R'_{1/20} = (1 + 0,158) \cdot 0,017 = 0,02 \Omega \quad (52)$$

- **Odpor při 75 °C:**

$$R_{1/75} = 1,22 \cdot R_{1/20} = 1,22 \cdot 0,02 = 0,024 \Omega \quad (53)$$

- **Procentní hodnota úbytku napětí na odporu:**

$$u_r = \frac{R_{1/75} \cdot I_1}{U_f} \cdot 100 = \frac{0,024 \cdot 1100}{3637} \cdot 100 = 0,74 \% \quad (54)$$

Rozptylová reaktance:

$$X_c = \frac{(4 \cdot \pi)^2 \cdot f \cdot N_s^2}{p \cdot q} \cdot l_e \cdot \left[\left(\frac{h_2'}{3 \cdot b_d} + \frac{h_1'}{b_d} \right) + \frac{l_\xi}{l_e} \cdot q \cdot \left(0,187 + 0,166 \cdot \frac{t_p}{l_\xi} \cdot \beta \right) + \ln \left(1 + \frac{\pi \cdot z_1}{2 \cdot b_d} \right) \right] \cdot 10^{-7} =$$

$$\frac{(4 \cdot \pi)^2 \cdot 50 \cdot 66^2}{5 \cdot 4,4} \cdot 0,72 \cdot \left[\left(\frac{0,074}{3 \cdot 0,021} + \frac{0,013}{0,021} \right) + \frac{0,939}{0,72} \cdot 4,4 \cdot \left(0,187 + 0,166 \cdot \frac{0,66}{0,939} \cdot 0,83 \right) + \right.$$

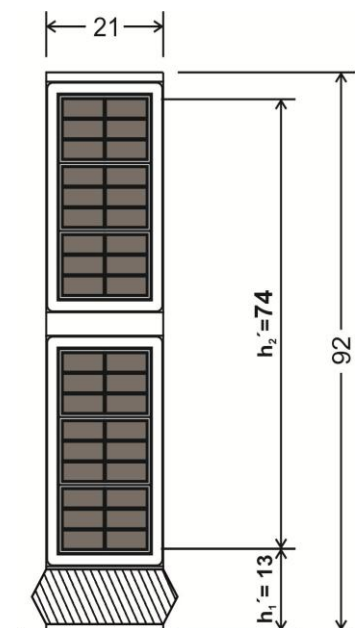
$$\left. \ln \left(1 + \frac{\pi \cdot 0,03}{2 \cdot 0,021} \right) \right] \cdot 10^{-7} = 0,52 \Omega \quad (55)$$

Velikost rozptylové reaktance je dána magnetickou vodivostí drážky induktu, vodivostí čel vinutí a vodivostí mezi sousedními zuby přes vzduchovou mezeru. Tyto vodivosti jsou zahrnuty uvnitř hranaté závorky předchozího vzorce.

h_2' - je vzdálenost krajních vláken vodičů v drážce

h_1' - je vzdálenost horního krajního vodiče od kraje drážky

b_d - je šířka drážky



Obrázek 3 Drážka s vyznačenými vzdálenostmi h_1' a h_2'

- **Procentní hodnota rozptylové reaktance:**

$$u_\sigma = \frac{X_\sigma \cdot I_1}{U_f} \cdot 100 = \frac{0,53 \cdot 1100}{3637} \cdot 100 = 15,6 \% \quad (56)$$

3. Návrh magnetického obvodu:

Cílem výpočtu magnetického obvodu je jednak spočítat jeho rozměry, ale také získat hodnotu magnetického napětí budící cívky, nutného k vytvoření magnetického toku při chodu naprázdno. Při otáčení rotoru vyvolá tento budící tok indukované napětí ve statoru. Z vypočtených hodnot se sestrojí charakteristika naprázdno.

- **Určení magnetického toku:**

Velikost magnetického toku určíme z rovnice pro indukované napětí a provedeme kontrolu podle rozměrů stroje a velikosti magnetické indukce ve vzduchové mezeře.

$$\phi = \frac{U_f}{4,44 \cdot f \cdot N_s \cdot k_{v1}} = \frac{3637}{4,44 \cdot 50 \cdot 66 \cdot 0,936} = 0,265 \text{ V} \cdot \text{s} \quad (57)$$

Kontrola

$$\phi = \frac{2}{\pi} \cdot t_p \cdot l_e \cdot B_\delta = \frac{2}{\pi} \cdot 0,66 \cdot 0,72 \cdot 0,88 = 0,266 \text{ V} \cdot \text{s} \quad (58)$$

Hodnoty souhlasí. Dále pokračujeme s hodnotou $\phi = 0,265 \text{ V} \cdot \text{s}$.

- **Velikost vzduchové mezery:**

Vzduchová mezera je důležitým a nezbytným prvkem každého elektrického točivého stroje. Její velikost má vliv na rozměry pólů, budící vinutí, na ztráty a na další technicko - ekonomické ukazatele. Při její volbě vycházíme z požadované procentní hodnoty nenasycené synchronní reaktance a procentní hodnoty rozptylové reaktance.

$$\delta = k \cdot \frac{A \cdot t_p}{B_\delta} \cdot \frac{10^{-6}}{x_d - x_\sigma} = 45 \cdot \frac{66009 \cdot 0,66}{0,88} \cdot \frac{10^{-6}}{127 - 16,6} = 0,0199 = 0,02 \text{ m} \quad (59)$$

k – (43 ÷ 50) – závisí na tvaru pólového nástavce a velikosti Carterova činitele

x_d - procentní hodnota nenasycené synchronní reaktance, volíme z tabulky 3.1 podle počtu pólů

2p	2	4	6	8	10	12	16	20	24
x_d [%]	200÷220	170	150	137	127	120	110	105	100

Tabulka 3.1 Procentní hodnota nenasycené synchronní reaktance

Za účelem sinusového průběhu magnetické indukce ve vzduchové mezeře volíme po obvodu proměnnou velikost vzduchové mezery. Na okrajích pólových nástavců je velikost mezery 1,5x větší než v ose pólu.

3.1. Magnetické napětí reakce kotvy

- Amplituda základní harmonické reakce kotvy pro $\alpha = 0,65$:

$$F'_a = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{1}{C_1} \cdot A \cdot t_p \cdot k_{v1} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{1}{1,042} \cdot 66009 \cdot 0,66 \cdot 0,936 = 17\,612\,A \quad (60)$$

$C_1 = a \cdot b$ – činitel základní harmonické magnetické indukce ve vzduchové mezeře
příloha str. 4

Amplitudy základních harmonických magnetických napětí v podélném (F_{d1}) a příčném (F_{q1}) směru:

$$F_{d1} = C_{d1} \cdot F'_a = 0,8856 \cdot 17612 = 15597\,A \quad (61)$$

$$F_{q1} = C_{q1} \cdot F'_a = 0,426 \cdot 17612 = 7503\,A \quad (62)$$

Získané hodnoty magnetického napětí reakce kotvy, magnetických napětí v podélném a příčném směru použijeme při konstrukci charakteristiky naprázdno.

Kde: $C_{d1} = e \cdot f = 0,82 \cdot 1,08 = 0,8856 \quad (63)$

$$C_{q1} = g \cdot h = 1,42 \cdot 0,3 = 0,426 \quad (64)$$

příloha str. 5

Pro:

$$\frac{\delta_{max}}{\delta} = 1,5 \qquad \frac{\delta}{t_p} = \frac{0,02}{0,66} = 0,03$$

- Amplituda základní harmonické reakce kotvy pro $\alpha = 0,75$:

$$F'_a = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{1}{C_1} \cdot A \cdot t_p \cdot k_{v1} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{1}{1,011} \cdot 66009 \cdot 0,66 \cdot 0,936 = 16\,277\,A \quad (65)$$

C_1 - je stejný jako pro případ $\alpha = 0,65$

$$F_{d1} = C_{d1} \cdot F'_a = 0,9143 \cdot 16\,277 = 14882\,A \quad (66)$$

$$F_{q1} = C_{q1} \cdot F'_a = 0,522 \cdot 16\,277 = 8496\,A \quad (67)$$

Kde:

$$C_{d1} = e \cdot f = 0,82 \cdot 1,115 = 0,9143 \quad (68)$$

$$C_{q1} = g \cdot h = 1,74 \cdot 0,3 = 0,522 \quad (69)$$

příloha str. 5

3.2. Dimenzování magnetického obvodu

- Výška pólu:

$$h_p = 0,3 \cdot t_p = 0,3 \cdot 0,66 = 0,198\,m \quad (70)$$

- **Výška nástavce:**

$$h_n = 0,1 \cdot t_p = 0,1 \cdot 0,66 = 0,066 \text{ m} \quad (71)$$

- **Šířka pólu:**

$$b_p = \frac{(1+v) \cdot \phi}{B_p \cdot L} = \frac{(1+0,15) \cdot 0,265}{1,45 \cdot 0,842} = 0,25 \text{ m} \quad (72)$$

v – předpokládaná poměrná hodnota mezi pólového rozptylového toku ($0,1 \div 0,2$).

- **Šířka pólového nástavce pro $\alpha = 0,65$:**

$$b_n = \alpha \cdot t_p = 0,65 \cdot 0,66 = 0,43 \text{ m} \quad (73)$$

- **Šířka pólového nástavce pro $\alpha = 0,75$:**

$$b_n = \alpha \cdot t_p = 0,75 \cdot 0,66 = 0,495 \text{ m} \quad (74)$$

- **Výška jhu rotoru:**

$$h_{jr} = \frac{(1+v) \cdot \phi}{2 \cdot B_{jr} \cdot L_r} = \frac{(1+0,15) \cdot 0,265}{2 \cdot 1,1 \cdot 1} = 0,14 \text{ m} \quad (75)$$

B_{jr} - zvolená hodnota magnetické indukce ve jhu rotoru

L_r - délka rotoru, proti délce pólu zvětšená s ohledem na prostor pro dosednutí budící cívky

- **Výška jádra induktu:**

$$h_{js} = \frac{\phi}{2 \cdot B_{js} \cdot k_{fe} \cdot L_e} = \frac{0,265}{2 \cdot 1,3 \cdot 0,92 \cdot 0,72} = 0,15 \text{ m} \quad (76)$$

3.2.1. Délky středních siločar částí magnetického obvodu:

- **Pól:**

$$l_p = h_p + h_n = 0,198 + 0,066 = 0,26 \text{ m} \quad (77)$$

- **Jho rotoru:**

$$l_r = \frac{\pi \cdot [D_1 - 2 \cdot (\delta + h_p + h_n)]}{4 \cdot p} = \frac{\pi \cdot [2,1 - 2 \cdot (0,02 + 0,198 + 0,066)]}{4 \cdot 5} = 0,24 \text{ m} \quad (78)$$

- **Jádro induktu:**

$$l_s = \frac{\pi \cdot [D_1 + 2 \cdot (h_d + h_{js})]}{4 \cdot p} = \frac{\pi \cdot [2,1 + 2 \cdot (0,092 + 0,15)]}{4 \cdot 5} = 0,406 \text{ m} \quad (79)$$

3.2.2. Carterův činitel

- respektující vliv drážkování induktu:

$$k_{cd} = 1,09$$

příloha str. 6

$$\frac{b_d}{z_1} = \frac{21}{29} = 0,724$$

$$\frac{b_d}{\delta} = \frac{21}{20} = 1,05$$

- respektující vliv radiálních ventilačních kanálů:

$$k_{ck} = \frac{1}{1 + \frac{\delta \cdot \frac{3k_i}{l_e}}{2 + \delta}} = \frac{1}{1 + \frac{20 \cdot \frac{10 \cdot 14}{720}}{2 + 20}} = 0,85 \quad (80)$$

- Výsledná hodnota Carterova činitele: $k_c = k_{cd} \cdot k_{ck} = 1,09 \cdot 0,85 = 0,92$

3.2.3. Magnetické napětí na vzduchové mezeře:

$$F_\delta = 0,8 \cdot k_c \cdot B_\delta \cdot \delta \cdot 10^6 = 0,8 \cdot 0,92 \cdot 0,88 \cdot 0,02 \cdot 10^6 = 12933 \text{ A} \quad (81)$$

3.3. Výpočet charakteristiky naprázdno

K sestrojení charakteristiky naprázdno stačí tři body magnetického napětí pro tři velikosti indukovaného napětí (100%, 115% a 130%) a tečny v počátku, která je charakteristikou naprázdno vzduchové mezery. Výpočet charakteristiky naprázdno je uveden v následujících tabulkách 3.2 a 3.3. K výpočtu je použita B – H charakteristika uvedena v příloze na str. 44. Indukce v zubech byla upřesněna podle nomogramu v příloze na str. 43.

		t_d	z_1	k_z	B'_{z1}	B_{z1}	H_{z1}	H_{zstr}	F_z
D_1	2 100	50	29	0,87	1,65	1,65	9 810	7 418	682,5
$D_2 = D_1 + h_d$	2 192	52,2	31,2	0,82	1,60	1,6	7 120		
$D_3 = D_1 + 2 \cdot h_d$	2 284	54,4	33,4	0,77	1,56	1,57	6 220		
$k_1 = 1,15$				$k_1 \cdot \phi$	1,90	1,87	27 270	22 003	2 024,3
					1,84	1,82	21 825		
					1,79	1,77	17 450		
$k_2 = 1,3$				$k_2 \cdot \phi$	2,14	2,05	149 000	124 033	11 411
					2,08	2,025	126 500		
					2,03	1,98	89 200		

Tabulka 3.2 Tabulka s výpočtem magnetického napětí v zubech statoru.

Vzorce pro výpočet tabulky 3.2.

$$i = 1, 2, 3,$$

$$t_{di} = \frac{\pi \cdot D_1}{Q}$$

$$z_i = t_{di} - b_d$$

$$k_{zi} = \frac{t_{di}}{z_i \cdot k_{fe}} - 1$$

$$B'_{zi} = \frac{B_\delta \cdot t_{di}}{z_i \cdot k_{fe}}$$

$$H_{zst} = \frac{H_{z1} + 4 \cdot H_{z2} + H_{z3}}{6}$$

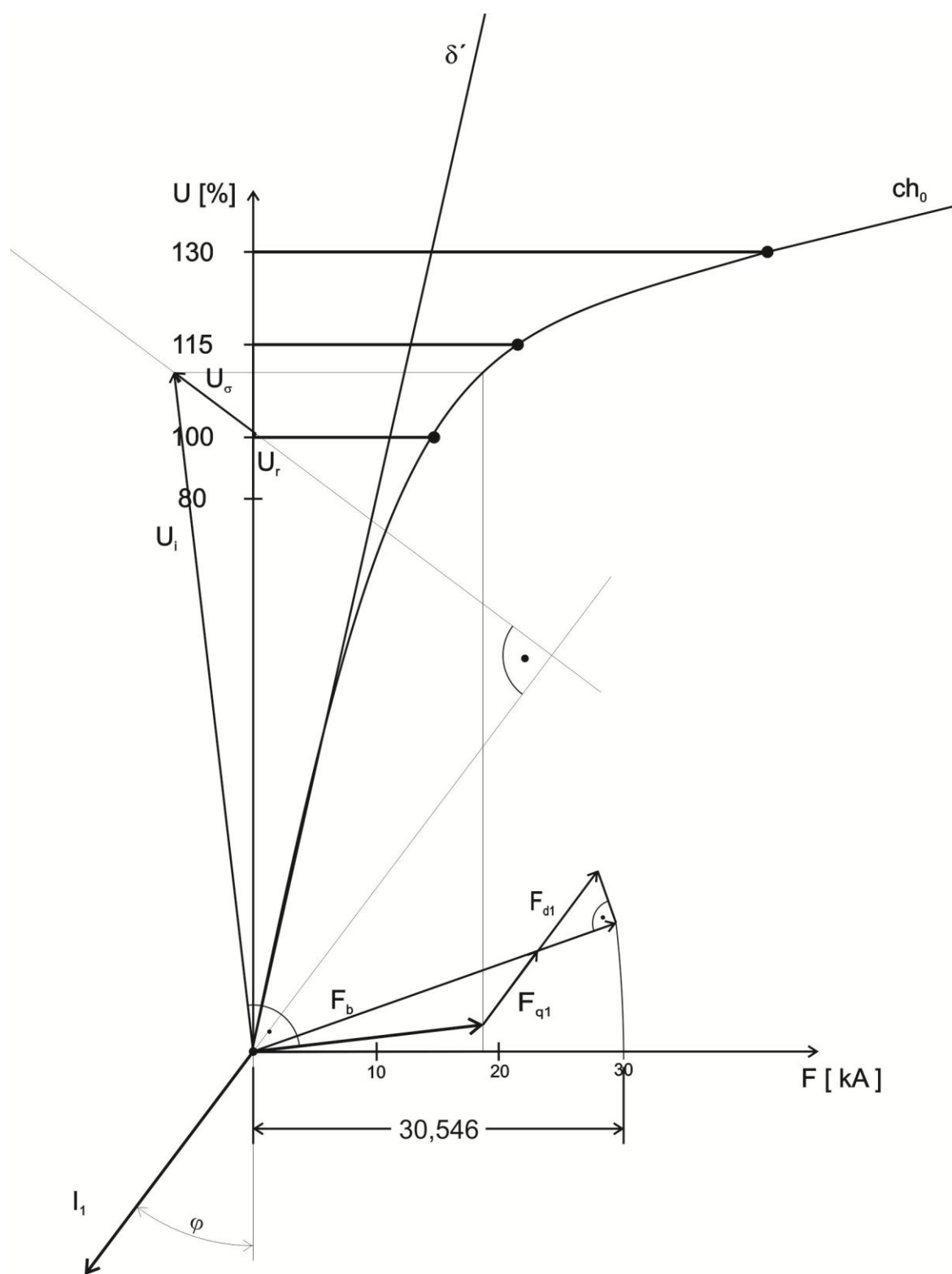
$$F_z = H_{zstr} \cdot h_d$$

				Φ			$k_1 \cdot \Phi$			$k_2 \cdot \Phi$		
				B	H	F	B	H	F	B	H	F
$\delta =$			0,02	0,88		12 933			14 873			16 813
Zuby	Hlava zuby	$k_{z1} = 1,01$	$B'_{z1} =$	1,65	9 810		1,90	27 270		2,14	149 000	
			$B_{z1} =$	1,65			1,87			2,05		
	Střed zuby	$k_{z2} = 0,94$	$B'_{z2} =$	1,60	7 120		1,84	21 825		2,08	126 500	
			$B_{z2} =$	1,6			1,82			2,025		
	Pata zuby	$k_{z3} = 0,88$	$B'_{z3} =$	1,56	6 220		1,79	17 450		2,03	89 200	
			$B_{z3} =$	1,57			1,77			1,98		
Střední hodnota		$h_z =$	0,092		7 418	682,5		22 003	2024		124 033	11 411
Jádro induktu	$L_{js} = 0,406$			1,3	860	349	1,495	3540	1436	1,69	12 500	5 072
$\Sigma F = F_\delta + F_z + F_{jha}$		$F =$		13 965			18 334			33 296		
Pól	$L_p =$	0,264	1,45	2645	698,0	1,68	11424	3015	1,9	30000	7916,8	
Jho	$L_j =$	0,241	1,1	344	82,8	1,265	720	173,3	1,43	2287	550,5	
$\Sigma F = F_p + F_j$				780,8			3 188,0			8 467,3		
$F =$				14 745			21 522			41 764		

Tabulka 3.3 Tabulka pro určení magnetického napětí

Vypočtené hodnoty použijeme ke konstrukci charakteristiky naprázdno.

Budící magnetické napětí pro $\alpha = 0,65$:

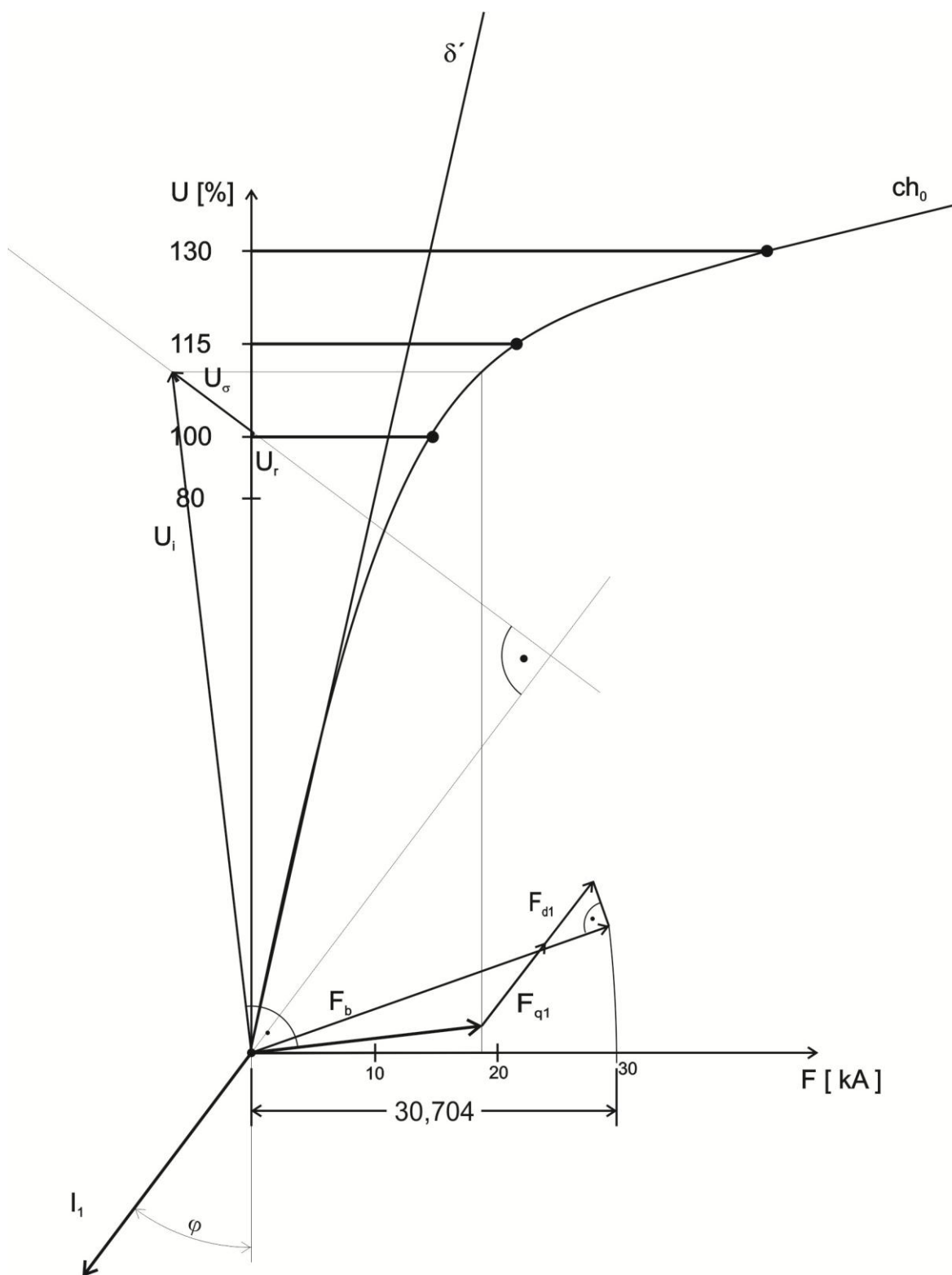


Obrázek 4 Konstrukce charakteristiky naprázdno $\alpha = 0,65$

Grafickým postupem jsme zjistili velikost budícího magnetického napětí pro jmenovité zatížení a účinník.

$$F_b = 30\,546 \text{ A}$$

- Budící magnetické napětí pro $\alpha = 0,75$:



Obrázek 5 Konstrukce charakteristiky naprázdno $\alpha = 0,75$

$$F_b = 30\,704$$

3.4. Návrh budícího vinutí

Budící vinutí synchronních strojů je připojené ke zdroji stejnosměrného proudu. Pro budící vinutí se používá buď vícepolohová cívka, nebo pásové vodiče. Vícepolohová cívka se používá pro malé průřezy budící cívky. Pásové vodiče jsou tvořeny jednou polohou tzn. šířka vodiče je rovna šířce budící cívky.

3.4.1. pro $\alpha = 0,65$:

Šířka cívky i s kostříčkou je rovna velikosti přečnávající části pólového nástavce.

- **Přesahující část pólového nástavce:**

$$\alpha = \frac{b_n - b_p}{2} = \frac{0,43 - 0,25}{2} = 0,09 \text{ m} = 90 \text{ mm} \quad (82)$$

- **Tloušťka kostříčky:**

$$t_k = 5 \text{ mm}$$

Pro šířku cívky zbývá 85 mm.

- **Střední délka závitu cívky:**

$$l_{bs} = 2 \cdot (L_p + b_p + 2 \cdot \alpha) = 2 \cdot (0,842 + 0,25 + 2 \cdot 0,09) = 2,54 \text{ m} \quad (83)$$

- **Předběžný průřez vodiče budící cívky:**

$$S'_{cub} = \frac{\rho_{cu} \cdot l_{bs} \cdot 2 \cdot p \cdot F_b}{0,9 \cdot U_b} = \frac{\frac{1}{56} \cdot 2,54 \cdot 2 \cdot 5 \cdot 30546}{0,9 \cdot 65} = 237 \text{ mm}^2 \quad (84)$$

Budící napětí $U_b = 65$ bylo zvoleno tak, aby šlo použít pásových vodičů. Bude použito holých vodičů a mezi závity bude vložena izolace tloušťky $t_i = 0,4 \text{ mm}$

- **Rozměry vodiče budící cívky: 85 x 3**

- **Čistý průřez:**

$$S_{cub} = 250 \text{ mm}^2$$

Čistý průřez respektuje zaoblení hran a nerovnosti povrchu.

Proudovou hustotu ve vodiči volíme $\rho_{cub} = 2 \text{ A/mm}^2$

- **Budící proud:**

$$I_b = \rho_{cub} \cdot S_{cub} = 2 \cdot 250 = 500A \quad (85)$$

- **Počet závitů budící cívky:**

$$N_b = \frac{F_b}{I_b} = \frac{30546}{500} = 60 \text{ z} \quad (86)$$

- **Výška cívky:**

$$h_c = N_b \cdot (b_v + t_i) = 60 \cdot (3 + 0,4) = 204 \text{ mm} \quad (87)$$

- **Výška těla pólu:**

$$h_p = h_c + 2 \cdot t_k = 204 + 2 \cdot 5 = 214 \text{ mm} \quad (88)$$

Výška pólu vyšla o něco vyšší, než jsme předpokládali ($h_p = 198 \text{ mm}$). V prvním návrhu ale toto zanedbáme.

3.4.1.1. Kontrolní výpočet oteplení budící cívky

- **Vnější obvod budící cívky:**

$$l_{be} = 2 \cdot (L_p + b_p + 4 \cdot a) = 2 \cdot (0,842 + 0,25 + 4 \cdot 0,09) = 2,9 \text{ m} \quad (89)$$

- **Střední obvod budící cívky:**

$$l_{bs} = 2 \cdot \left[L_p + b_p + 4 \cdot \left(t_k + \frac{b_c}{2} \right) \right] = 2 \cdot \left[0,842 + 0,25 + 4 \cdot \left(0,005 + \frac{0,085}{2} \right) \right] = 2,56 \text{ m} \quad (90)$$

- **Ochlazovací povrch všech cívek:**

$$O_{2pc} = h_c \cdot l_{be} \cdot 2 \cdot p = 0,204 \cdot 2,9 \cdot 10 = 5,9 \text{ m}^2 \quad (91)$$

- **Odpor všech cívek budícího vinutí:**

$$R_{b/75} = 1,22 \cdot \rho \cdot \frac{l_{bs} \cdot N_b \cdot 2 \cdot p}{S_{cub}} = 1,22 \cdot \frac{1}{56} \cdot \frac{2,56 \cdot 60 \cdot 10}{250} = 0,134 \Omega \quad (92)$$

- **Ztráty v budícím vinutí:**

$$\Delta P_{cub} = R_{b/75} \cdot I_b^2 = 0,13 \cdot 510^2 = 34\,864 \text{ W} \quad (93)$$

- **Oteplení cívky:**

$$\Delta \vartheta_{cub} = \frac{1,18 \cdot \Delta P_{cub}}{\alpha \cdot O_{2pc}} = \frac{1,18 \cdot 34864}{90 \cdot 5,9} = 77,5 \text{ }^\circ\text{C} \quad (94)$$

Dovolené oteplení pro izolace třídy B je 80°C. Oteplení cívky vyšlo menší, tedy vyhovuje.

3.4.2. pro $\alpha = 0,75$

Šířka cívky i s kostříčkou je rovna velikosti přečnávající části pólového nástavce.

- **Přesahující část pólového nástavce:**

$$a = \frac{b_n - b_p}{2} = \frac{0,43 - 0,25}{2} = 0,123 \text{ m} \quad (95)$$

- **Tloušťka kostříčky:** $t_k = 5 \text{ mm}$

- **Střední délka závitů cívky:**

$$l_{bs} = 2 \cdot (L_p + b_p + 2 \cdot a) = 2 \cdot (0,842 + 0,25 + 2 \cdot 0,123) = 2,67 \text{ m} \quad (96)$$

- **Předběžný průřez vodiče budící cívky:**

$$S'_{cub} = \frac{\rho_{cu} \cdot l_{bs} \cdot 2 \cdot p \cdot F_b}{0,9 \cdot U_b} = \frac{\frac{1}{56} \cdot 2,56 \cdot 2 \cdot 5 \cdot 30704}{0,9 \cdot 65} = 251 \text{ mm}^2 \quad (97)$$

Budící napětí $U_b = 65$ bylo zvoleno tak, aby šlo použít pásových vodičů. Bude použito holých vodičů a mezi závity bude vložena izolace tloušťky $t_i = 0,4 \text{ mm}$.

- **Rozměry vodiče budící cívky:** **95 x 3**

- **Čistý průřez:**

$$S_{cub} = 280 \text{ mm}^2$$

Čistý průřez respektuje zaoblení hran a nerovnosti povrchu.

Proudovou hustotu ve vodiči volíme $\rho_{cub} = 2 \text{ A/mm}^2$

- **Budící proud:**

$$I_b = \rho_{cub} \cdot S_{cub} = 2 \cdot 280 = 560 \text{ A} \quad (98)$$

- **Počet závitů budící cívky:**

$$N_b = \frac{F_b}{I_b} = \frac{30704}{560} = 55 \text{ z} \quad (99)$$

- **Výška cívky:**

$$h_c = N_b \cdot (b_v + t_i) = 55 \cdot (3 + 0,4) = 187 \text{ mm} \quad (100)$$

- **Výška těla pólu:**

$$h_p = h_c + 2 \cdot t_k = 187 + 2 \cdot 5 = 197 \text{ mm} \quad (101)$$

Výška pólu vyšla shodná s původním návrhem.

3.4.2.1. Kontrolní výpočet oteplení budící cívky:

- **Vnější obvod budící cívky:**

$$l_{be} = 2 \cdot (L_p + b_p + 4 \cdot a) = 2 \cdot (0,842 + 0,25 + 4 \cdot 0,123) = 3,16 \text{ m} \quad (102)$$

- **Ochlazovací povrch všech cívek:**

$$O_{2pc} = h_c \cdot l_{be} \cdot 2 \cdot p = 0,197 \cdot 3,16 \cdot 10 = 5,92 \text{ m}^2 \quad (103)$$

- **Odpor všech cívek budícího vinutí:**

$$R_{b/75} = 1,22 \cdot \rho \cdot \frac{l_{bs} \cdot N_b \cdot 2 \cdot p}{S_{cub}} = 1,22 \cdot \frac{1}{56} \cdot \frac{2,67 \cdot 55 \cdot 10}{280} = 0,114 \ \Omega \quad (104)$$

- **Ztráty v budícím vinutí:**

$$\Delta P_{cub} = R_{b/75} \cdot I_b^2 = 0,115 \cdot 560^2 = 35 \ 880 \text{ W} \quad (105)$$

- **Oteplení cívky:**

$$\Delta\vartheta_{cub} = \frac{1,18 \cdot \Delta P_{cub}}{\alpha \cdot 0,2pc} = \frac{1,18 \cdot 35\,880}{90 \cdot 5,92} = 79,5 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (106)$$

Dovolené oteplení pro izolace třídy B je 80°C. Oteplení cívky vyšlo menší, tedy vyhovuje. Pokud by oteplení vycházelo větší je třeba, změnit proudovou hustotu nebo navrhnout jinou budící cívku.

4. Ztráty a účinnost:

- **Jouleovy ztráty ve vinutí statoru:**

$$\Delta P_{cu1} = m \cdot R_{1/75} \cdot I_1^2 = 3 \cdot 0,024 \cdot 1100^2 = 88\,413 \text{ W} \quad (107)$$

- **Ztráty v jádře induktu:**

Hmotnost jádra statoru:

$$m_{fej} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_{je}^2 - D_3^2) \cdot l_e \cdot k_{fe} \cdot \rho_{fe} = \frac{\pi}{4} \cdot (2,59^2 - 2,28^2) \cdot 0,72 \cdot 0,92 \cdot 7800 = 5\,960 \text{ kg} \quad (108)$$

$$D_{je} = D_1 + 2 \cdot (h_d + h_{js}) = 2,1 + 2 \cdot (0,092 + 0,15) = 2,58 \text{ m} \quad (109)$$

$$D_3 = D_1 + 2 \cdot h_d = 2,1 + 2 \cdot 0,092 = 2,28 \text{ m} \quad (110)$$

$$\Delta P_{fej} = 1,8 \cdot \Delta p_{fe} \cdot B_{je}^2 \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} \cdot m_{fej} = 1,8 \cdot 1,8 \cdot 1,3^2 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1,3} \cdot 5960 = 32\,637 \text{ W} \quad (111)$$

$$\Delta p_{fe} = 1,8 \text{ W/kg}$$

- **Ztráty v zubech statoru:**

Hmotnost zubů statoru:

$$m_{f_{ez}} = Q \cdot z_2 \cdot h_d \cdot l_e \cdot k_{fe} \cdot \rho_{fe} = 132 \cdot 0,031 \cdot 0,092 \cdot 0,72 \cdot 0,92 \cdot 7800 = 1947,7 \text{ kg} \quad (112)$$

$$\Delta P_{f_{ez}} = 2 \cdot \Delta p_{fe} \cdot B_{z2}^2 \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} \cdot m_{f_{ez}} = 2 \cdot 1,8 \cdot 1,6 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1,3} \cdot 1947,7 = 17950 \text{ W} \quad (113)$$

- **Povrchové ztráty:**

$$\Delta P_p = \frac{\pi}{2} \cdot D_1 \cdot \alpha \cdot L_p \cdot k_0 \cdot \left(\frac{Q \cdot n}{10000}\right) \cdot (t_{d1} \cdot \beta \cdot 1000 \cdot B_\delta \cdot k_c) = \frac{\pi}{2} \cdot 2,1 \cdot 0,65 \cdot 0,842 \cdot 2,8 \cdot \left(\frac{132 \cdot 600}{10000}\right) \cdot (0,05 \cdot 0,83 \cdot 1000 \cdot 0,88 \cdot 0,92) = 466 \text{ W} \quad (114)$$

- **Mechanické ztráty:**

$$\Delta P_m = v^{2,5} \cdot D_1 \cdot \sqrt{l_e} = 65,98^{2,5} \cdot 2,1 \cdot \sqrt{0,72} = 62866 \text{ W} \quad (115)$$

$$v = \frac{\pi \cdot D_1 \cdot n}{60} = \frac{\pi \cdot 2,1 \cdot 600}{60} = 65,98 \quad (116)$$

- **Přídavné ztráty:**

$$\Delta P_{přid} = 0,003 \cdot S = 0,003 \cdot 12000000 = 36000 \text{ W} \quad (117)$$

4.1. Celkové ztráty pro $\alpha=0,65$:

$$\Delta P = \Delta P_{cu1} + \Delta P_{cub} + \Delta P_{fej} + \Delta P_{f_{ez}} + \Delta P_p + \Delta P_m + \Delta P_{přid} = 88413 + 34864 + 32637 + 17950 + 466 + 62866 + 36000 = 273196 \text{ W} \quad (118)$$

- **Účinnost:**

$$\eta = 100 \cdot \left(\frac{P}{P+\Delta P}\right) = 100 \cdot \left(\frac{9600}{9600+273}\right) = 97,2 \text{ \%} \quad (119)$$

4.2. Celkové ztráty pro $\alpha=0,75$:

$$\Delta P = \Delta P_{cu1} + \Delta P_{cub} + \Delta P_{fej} + \Delta P_{f_{ez}} + \Delta P_p + \Delta P_m + \Delta P_{přid} = 88413 + 35880 + 32637 + 17950 + 466 + 62866 + 36000 = 274212 \text{ W} \quad (120)$$

- **Účinnost:**

$$\eta = 100 \cdot \left(\frac{P}{P+\Delta P}\right) = 100 \cdot \left(\frac{9600}{9600+274}\right) = 97,2 \text{ \%} \quad (121)$$

5. Přehled vypočtených hodnot

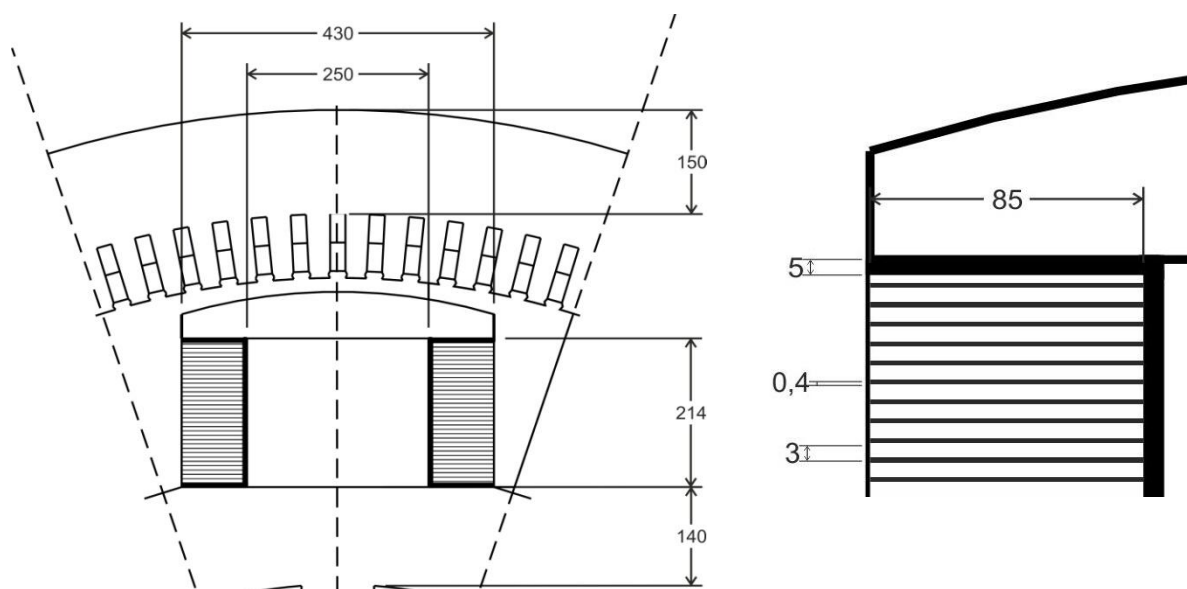
Hodnota	Velikost
<i>Průměr induktu</i>	2,1 m
<i>Jmenovitý proud</i>	1 100 A
<i>Pólová rozteč</i>	0,66 m
<i>Proudová hustota</i>	66 000 A/m
<i>Počet drážek</i>	132
<i>Šířka drážky</i>	21 mm
<i>Hloubka drážky</i>	92 mm
<i>Délka stroje</i>	0,842 m
<i>Délka vzduchové mezery</i>	20 mm
<i>Odpor při 20°C</i>	0,02 Ω
<i>Rozptylová reaktance</i>	0,52
<i>Výška nástavce</i>	66 mm
<i>Šířka pólu</i>	250 mm
<i>Výška jha rotoru</i>	140 mm
<i>Výška jádra induktu</i>	150 mm
<i>Joelovy ztráty</i>	88 413 W
<i>Ztráty v jádře induktu</i>	32 637 W
<i>Ztráty v zubech statoru</i>	17 950 W
<i>Povrchové ztráty</i>	466 W
<i>Mechanické ztráty</i>	62 866 W
<i>Přídavné ztráty</i>	36 000 W

Hodnota	$\alpha = 0,65$	$\alpha = 0,75$
<i>Šířka pólového nástavce</i>	430 mm	495 mm
<i>Budící mag. napětí</i>	30 546 A	30 704
<i>Budící proud</i>	510 A	560 A
<i>Výška pólu</i>	214 mm	197 mm
<i>Ztráty v budicím vinutí</i>	34 864 W	35 880 W
<i>Oteplení budicí cívky</i>	77,3 °C	79,5 °C
<i>Celkové ztráty</i>	273 kW	274 kW
<i>Účinnost</i>	97,2 %	97,2 %

6. Modelování synchronního generátoru v programu FEMM

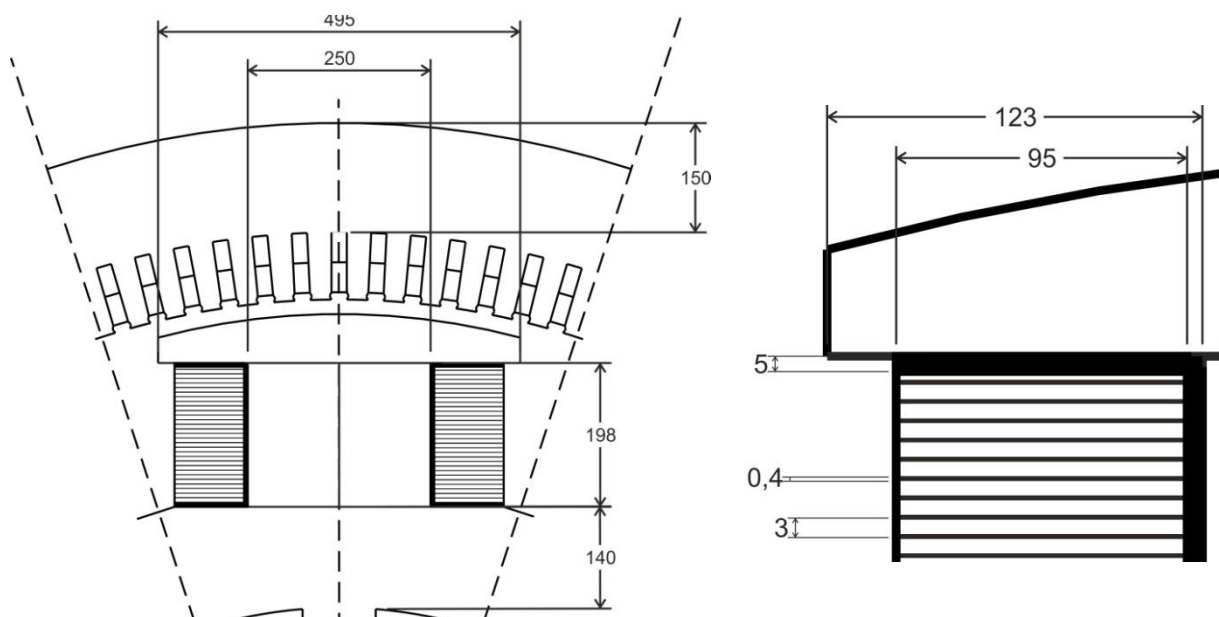
Geometrie je navržena podle vypočtených hodnot z předcházejícího elektromagnetického výpočtu. Byla nakreslena v programu SolidWorks a následně importována do programu FEMM. Na obrázcích je vidět vždy jen jeden pól navrženého stroje zbytek je souměrný.

6.1. $\alpha = 0,65$





Obrázek 6 Konstrukční rozložení stroje s $\alpha = 0,65$ a detail cívk

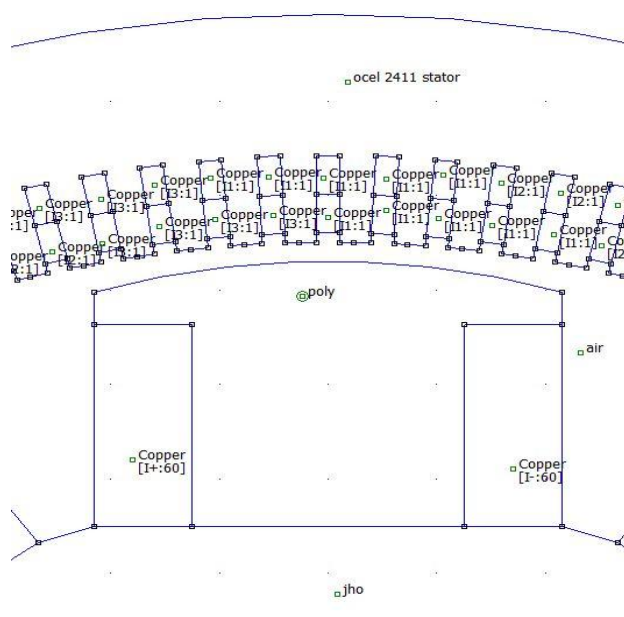
6.2. $\alpha = 0,75$




Obrázek 7 Konstrukční rozložení stroje s $\alpha = 0,75$ a detail cívk

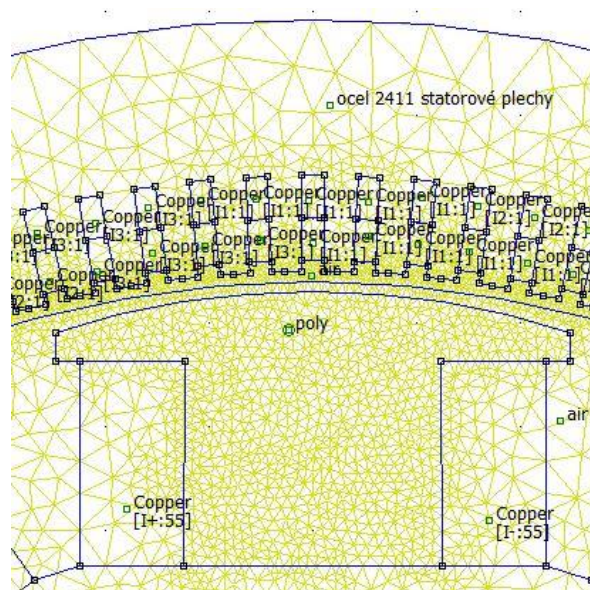
Po importování požadované geometrie je třeba nadefinovat materiály. Na stator jsou použity elektromagnetické plechy z oceli 2411 s nelineární BH charakteristikou uvedenou v příloze na str. 44. Plechy jsou tloušťky 0,5 mm a činitel plnění železa je 0,95. Póly jsou skládané ze stejného materiálu. Plechy jsou ale tloušťky 1 mm.

Na vodiče je použita čistá měď o elektrické vodivosti 58 MS/m. Přiřazení materiálů se provádí těmito tlačítky  k umístění materiálu a  k jeho přiřazení *obrázek 6.3*.





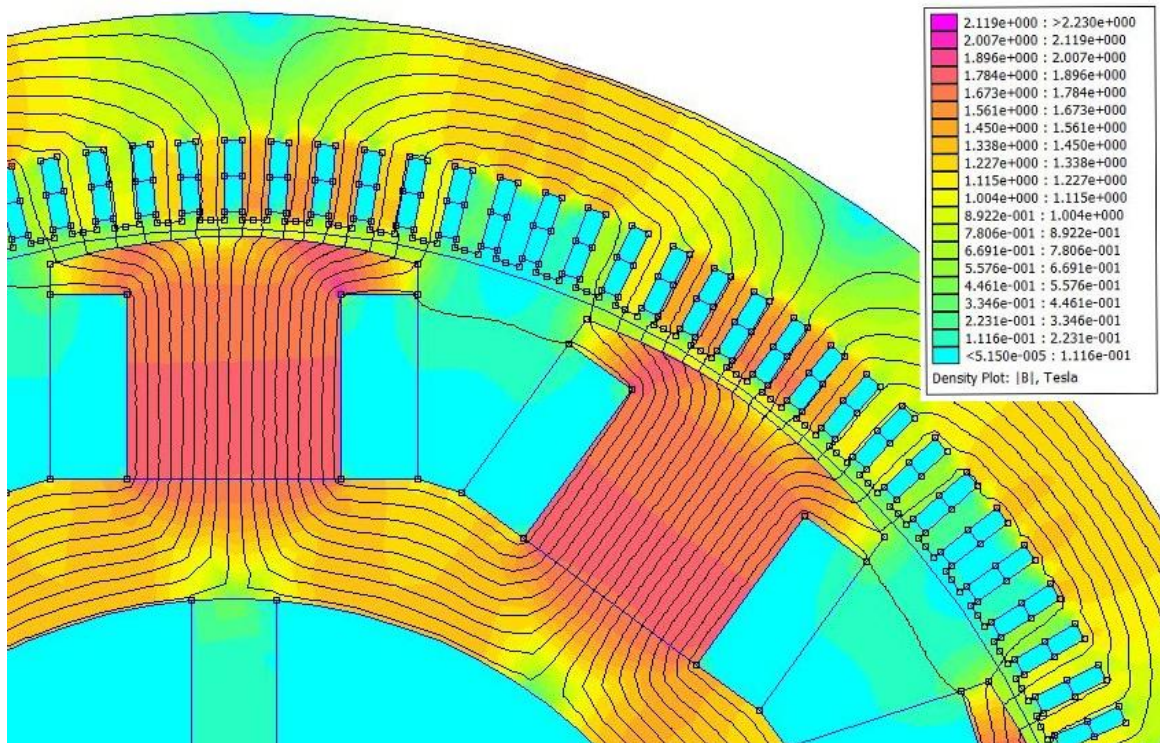
Obrázek 8 Ukázka definovaných materiálů v programu FEMM $\alpha = 0,65$

Musíme dbát na to, abychom určili všechny materiály. Po přiřazení všech materiálů můžeme přikročit k simulaci a výpočtu. Nejprve tímto tlačítkem  vytvoříme síť, jak ukazuje *obrázek 6.4*.

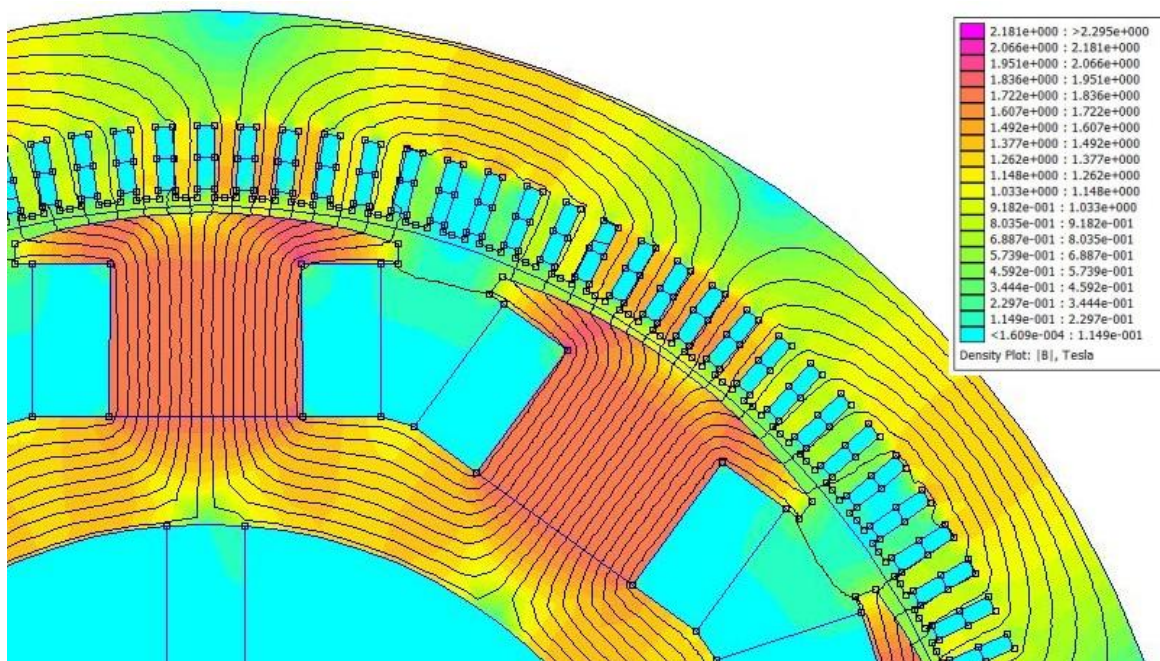


Obrázek 9 Ukázka sítě $\alpha = 0,75$

Samotný výpočet spustíme  a na výsledky se podíváme tímto tlačítkem . Průběhy magnetického pole synchronních generátorů z programu FEMM můžeme vidět na obrázcích 6.5 a 6.6.



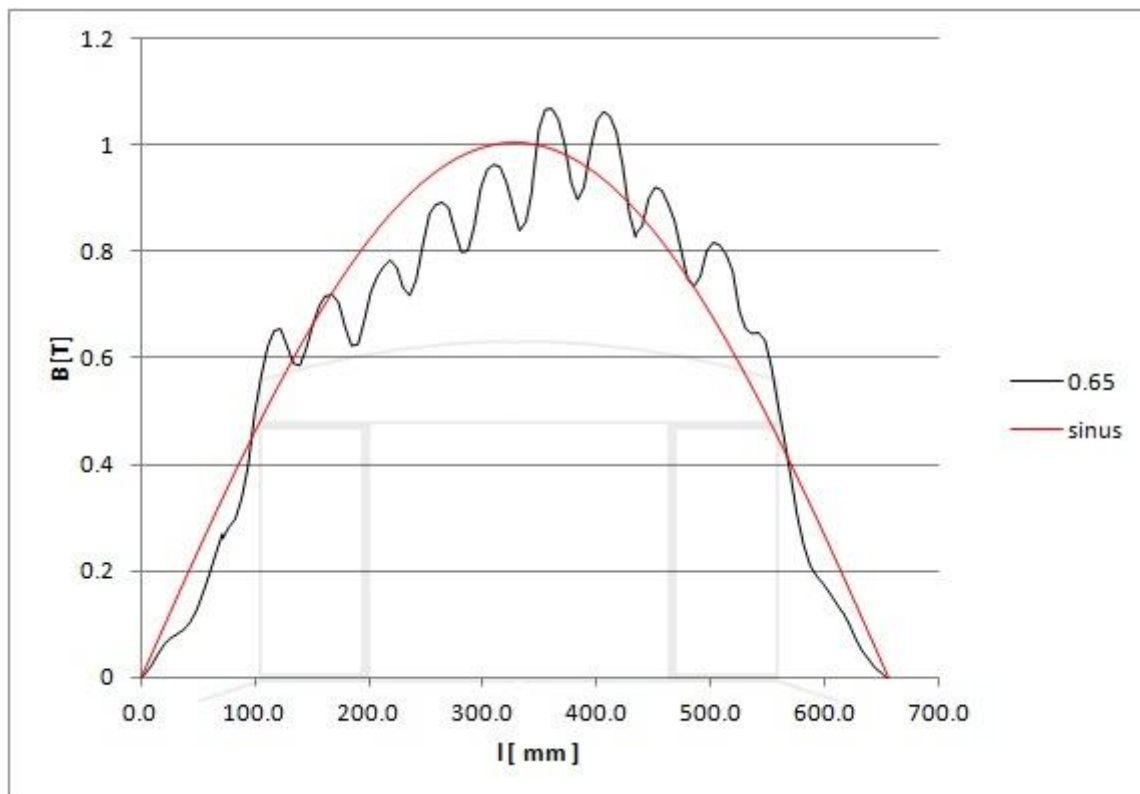
Obrázek 10 Simulace stroje $\alpha = 0,65$



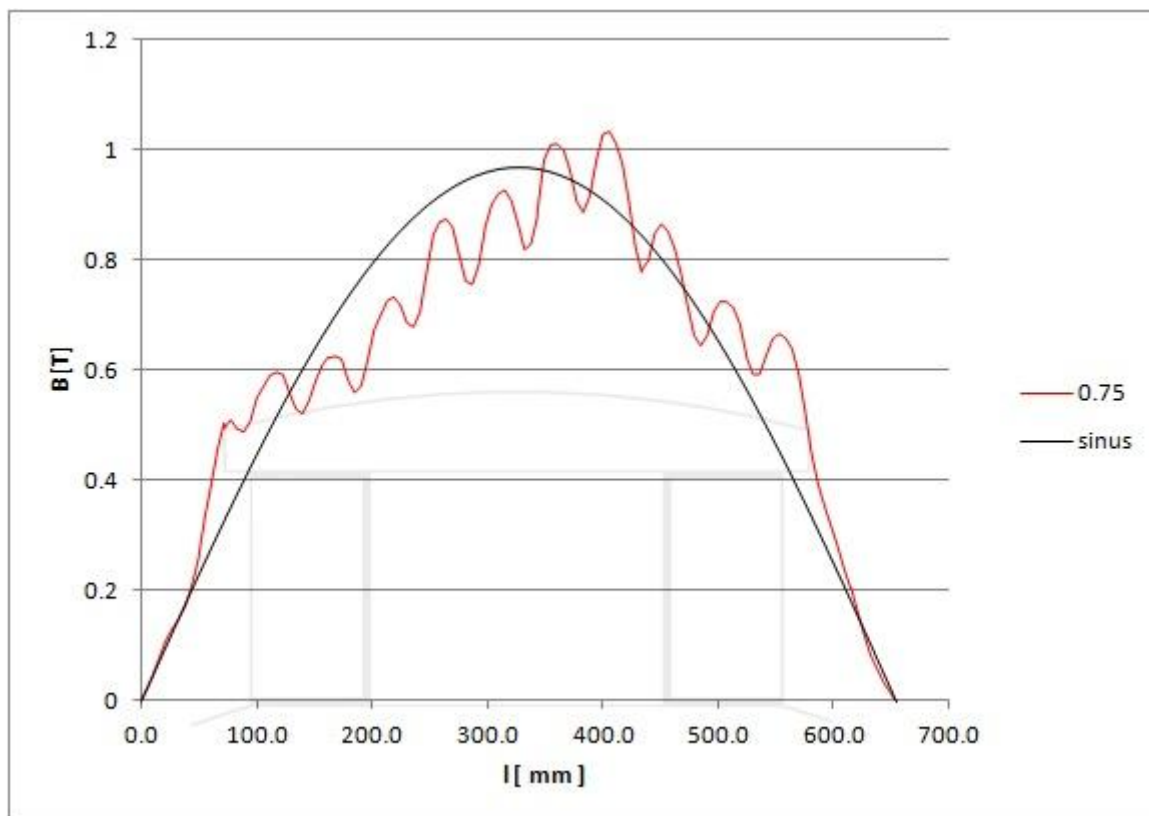
Obrázek 11 Simulace stroje $\alpha = 0,75$

7. Vyhodnocení výsledků

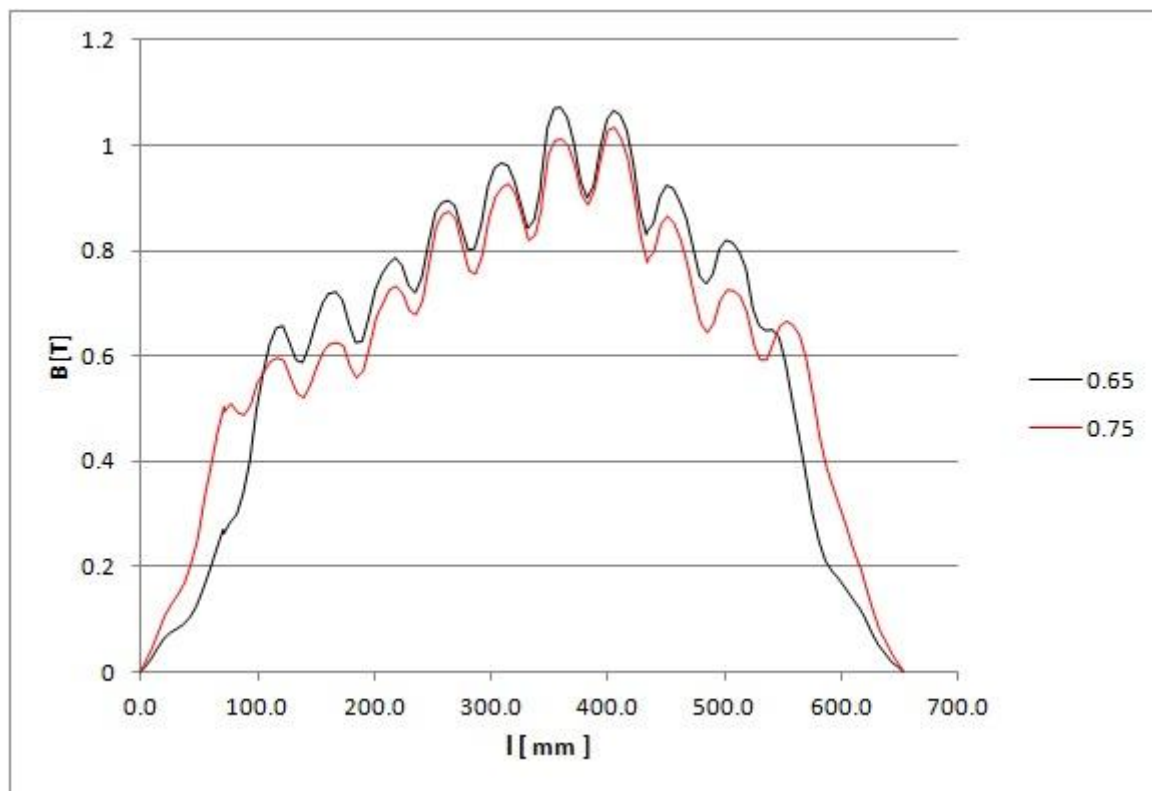
7.1. Průběhy magnetické indukce



Obrázek 13 Průběh magnetické indukce pod pólem stroje s $\alpha = 0,65$



Obrázek 14 Průběh magnetické indukce pod pólem stroje s $\alpha = 0,75$



Obrázek 15 Porovnání obou průběhů

Magnetická indukce je měřena uprostřed vzduchové mezery, vždy na jedné pólové rozteči. Zuby, které jsou na křivkách vidět jsou způsobeny vlivem drážkování statoru. Vždy pod zubem se magnetická indukce zvýší. Z grafů je vidět, že průběhy obou strojů jsou víceméně totožné. Průběh magnetické indukce pod pólovým nástavcem stroje s $\alpha = 0,65$ se více přibližuje sinusoidě.

7.2. Spektrální analýza

Průběhy obou strojů byly analyzovány spektrální analýzou pomocí programu Matlab a výpočtem magnetického toku v témže programu. Základní harmonické magnetické indukce ve vzduchové mezeře vyšla $B_{\delta 0,65} = 1,005 T$ a $B_{\delta 0,75} = 0,97 T$.

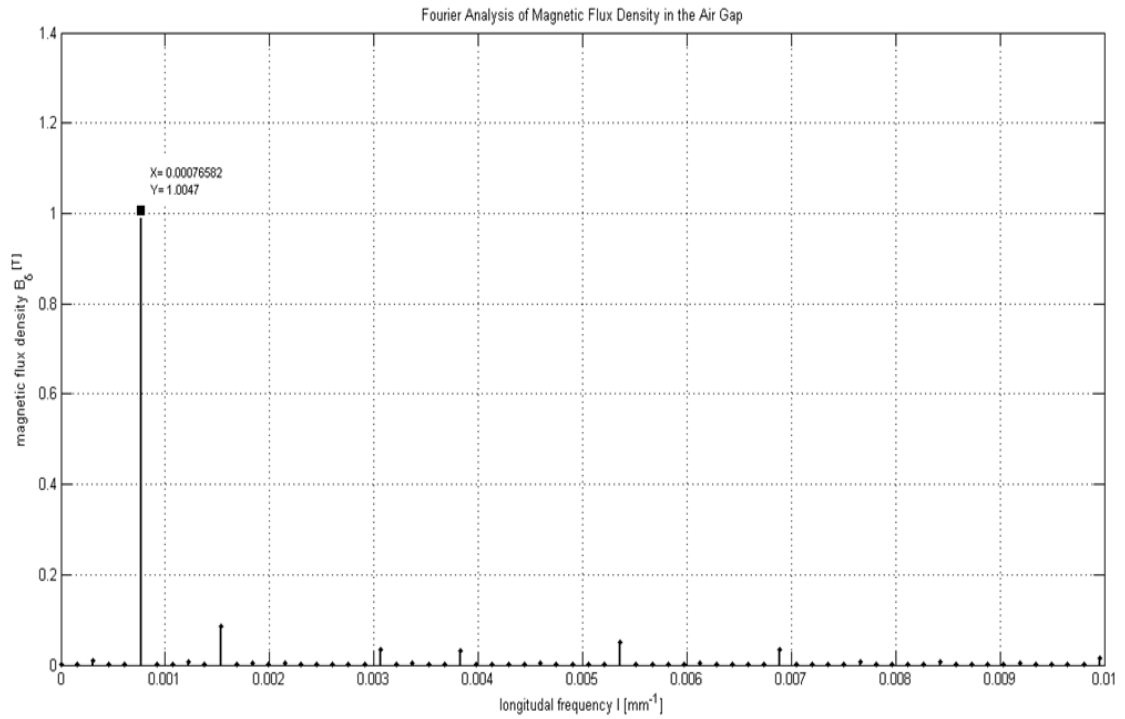
Magnetický tok je vypočítán podle vztahu

$$\phi = \int_0^{t_p} B \cdot dS$$

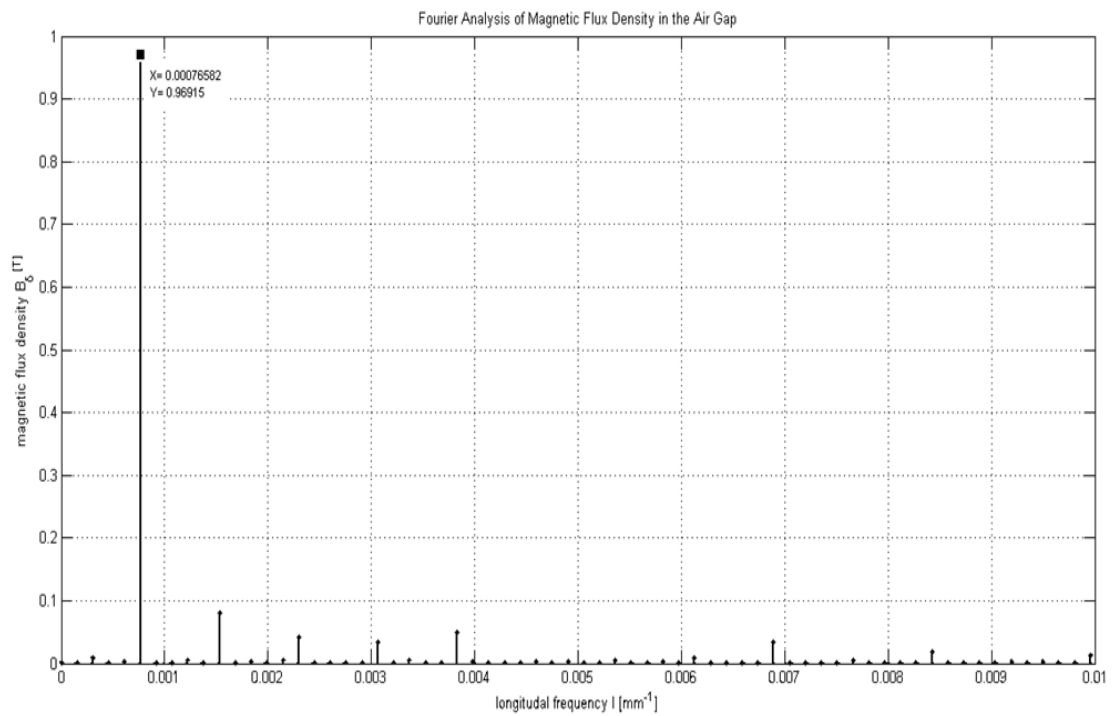
Výpočet je proveden v programu Matlab.

$$\phi_{0,65} = 0,405 Wb$$

$$\phi_{0,75} = 0,404 Wb$$



Obrázek 16 Spektrální analýza B_δ $\alpha = 0,65$



Obrázek 17 Spektrální analýza B_δ $\alpha = 0,75$

8. Závěr

Hlavním cílem této diplomové práce bylo zjistit vliv činitele pólového krytí na vlastnosti synchronního stroje. Zabýval jsem se elektromagnetickým návrhem synchronního generátoru s vyniklými póly. Nejprve pro stroj s činitelem pólového krytí $\alpha = 0,65$ a poté s $\alpha = 0,75$. Po návrhu se stroje příliš nelišili. Největší vliv měla změna činitele pólového krytí na pólový nástavec a budící cívku. Šířka pólového nástavce je u stroje s $\alpha = 0,75$ větší o 65 mm a výška pólu menší o 17 mm. Přistoupil jsem tedy k simulaci generátorů v programu FEMM. Hodnoty potřebné k simulaci stroje jsem získal z předchozího elektromagnetického návrhu.

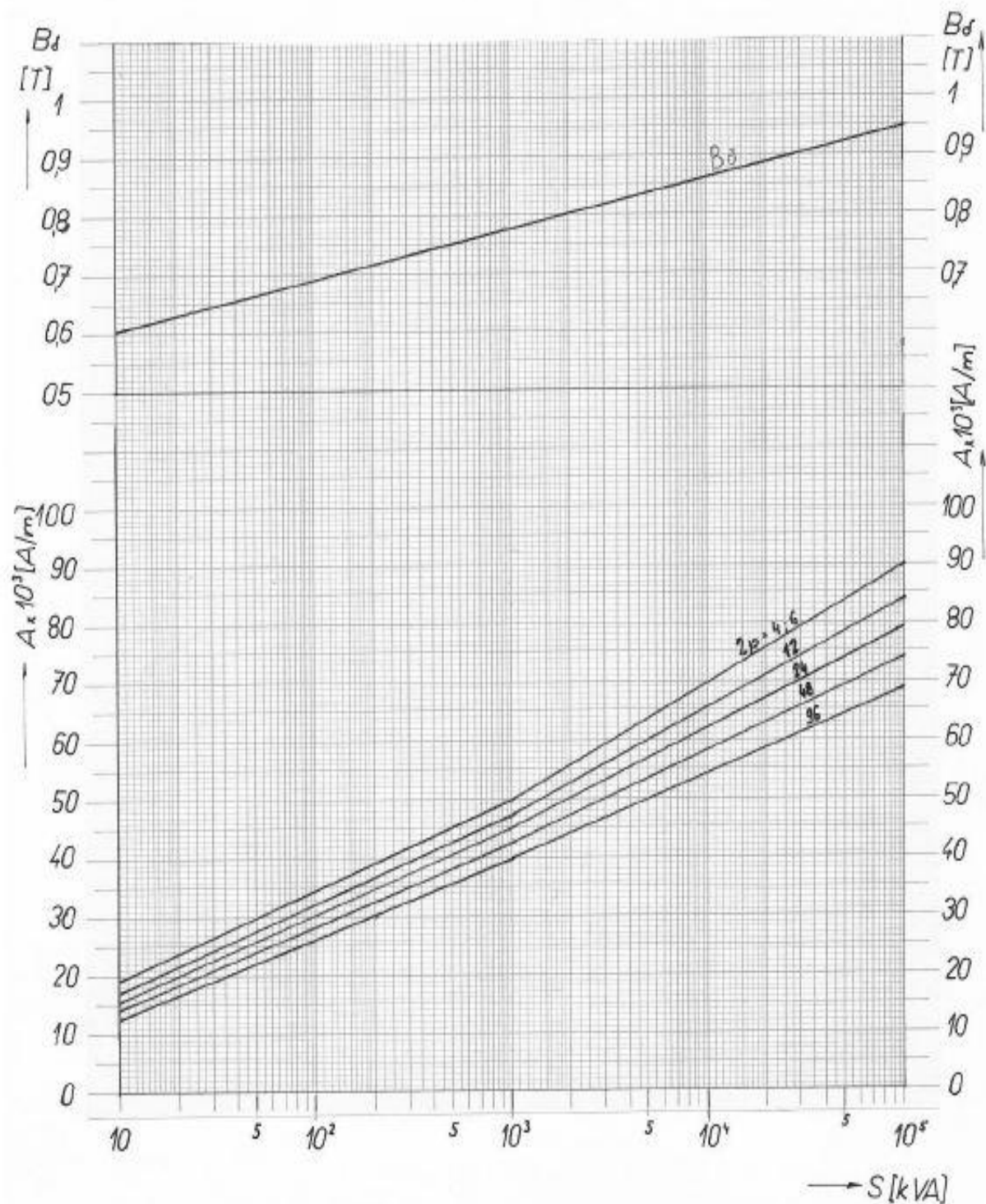
Simulací v programu FEMM se zabývá celá kapitola 6. Z výsledků vyplívajících ze simulace jsem získal velikosti základní harmonické magnetické indukce ve vzduchové mezeře $B_{\delta 0,65} = 1,005 T$, $B_{\delta 0,75} = 0,97 T$ a hodnoty magnetického toku $\phi_{0,65} = 0,405 Wb$, $\phi_{0,75} = 0,404 Wb$ na jedné pólové rozteči. Můžeme si povšimnout, že velikosti magnetického toku stroje s větším pólovým nástavcem je menší než u druhého stroje. U stroje s větším pólovým nástavcem se větší část hlavního magnetického toku změní na rozptylový. Uzavře se přes vzduchovou mezeru mezi pólovými nástavci, která je menší a má tedy menší magnetický odpor než stroj s menším pólovým krytím.

Rozdíl je ale nepatrný a na elektromagnetické využití stroje to bude mít jen malý vliv.

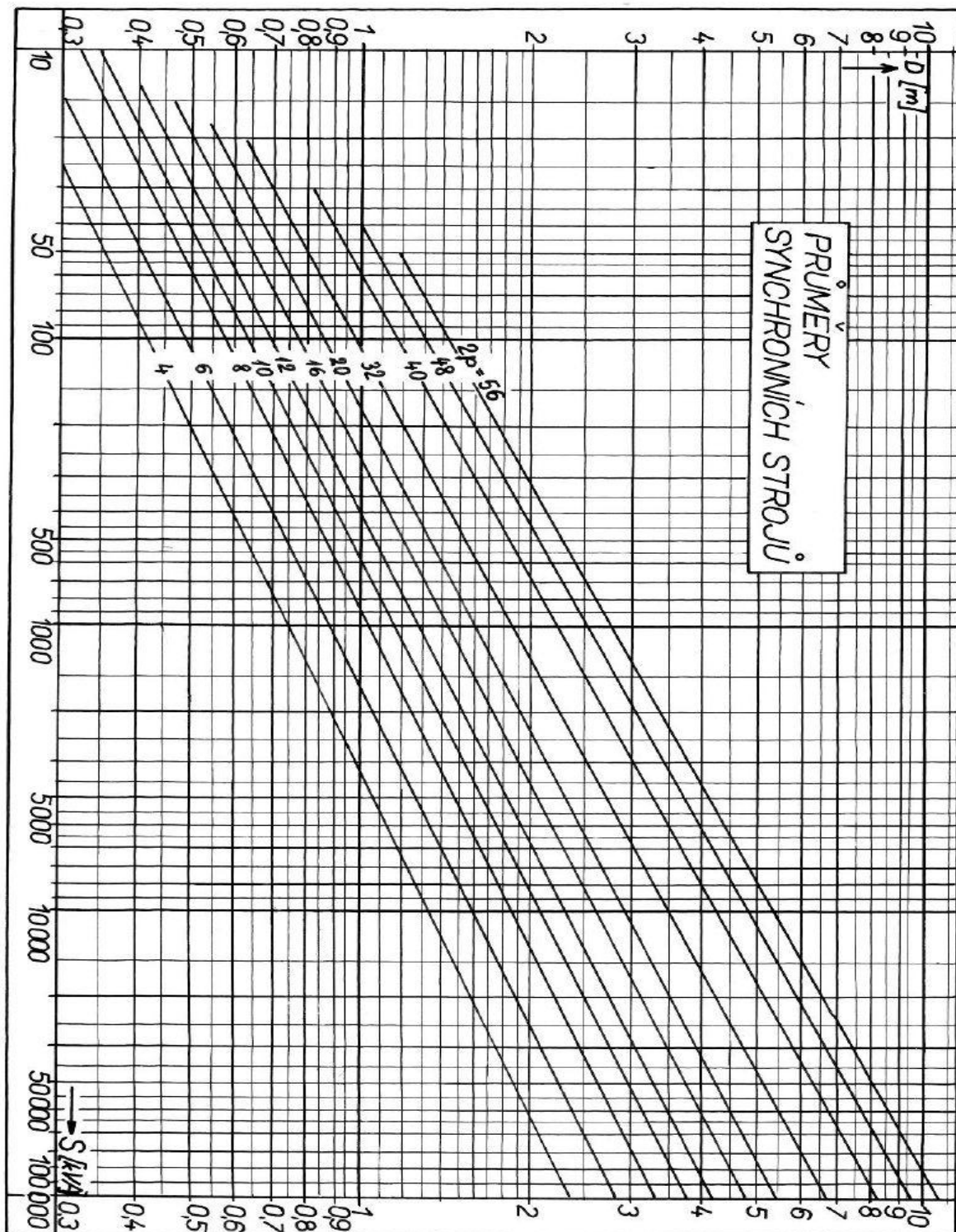
9. Literatura

- [1] G. N. PETROV.: *Elektrické stroje 1*. ACADEMIA, PRAHA, 1980
- [2] I. P. KOPYLOV A KOL.: *Stavba elektrických strojů*. SNTL, PRAHA, 1985
- [3] G. N. PETROV.: *Elektrické stroje 2*. ACADEMIA, PRAHA, 1980
- [4] LADISLAV CIGÁNEK.: *Stavba elektrických strojů*. SNTL, PRAHA, 1958
- [5] <http://cs.wikipedia.org>
- [6] Studijní materiály – *Postup při elektromagnetickém návrhu synchronního stroje*

10. Příloha



Obrázek 10.1 Grafy k určení indukce ve vzduchové mezeře B_δ a lineární proudové hustoty A [6]



Obrázek 10.1 Graf k určení průměru synchronního stroje[6]

Typář z ČSN 42 8306-1959

Rozměry měděných pásů

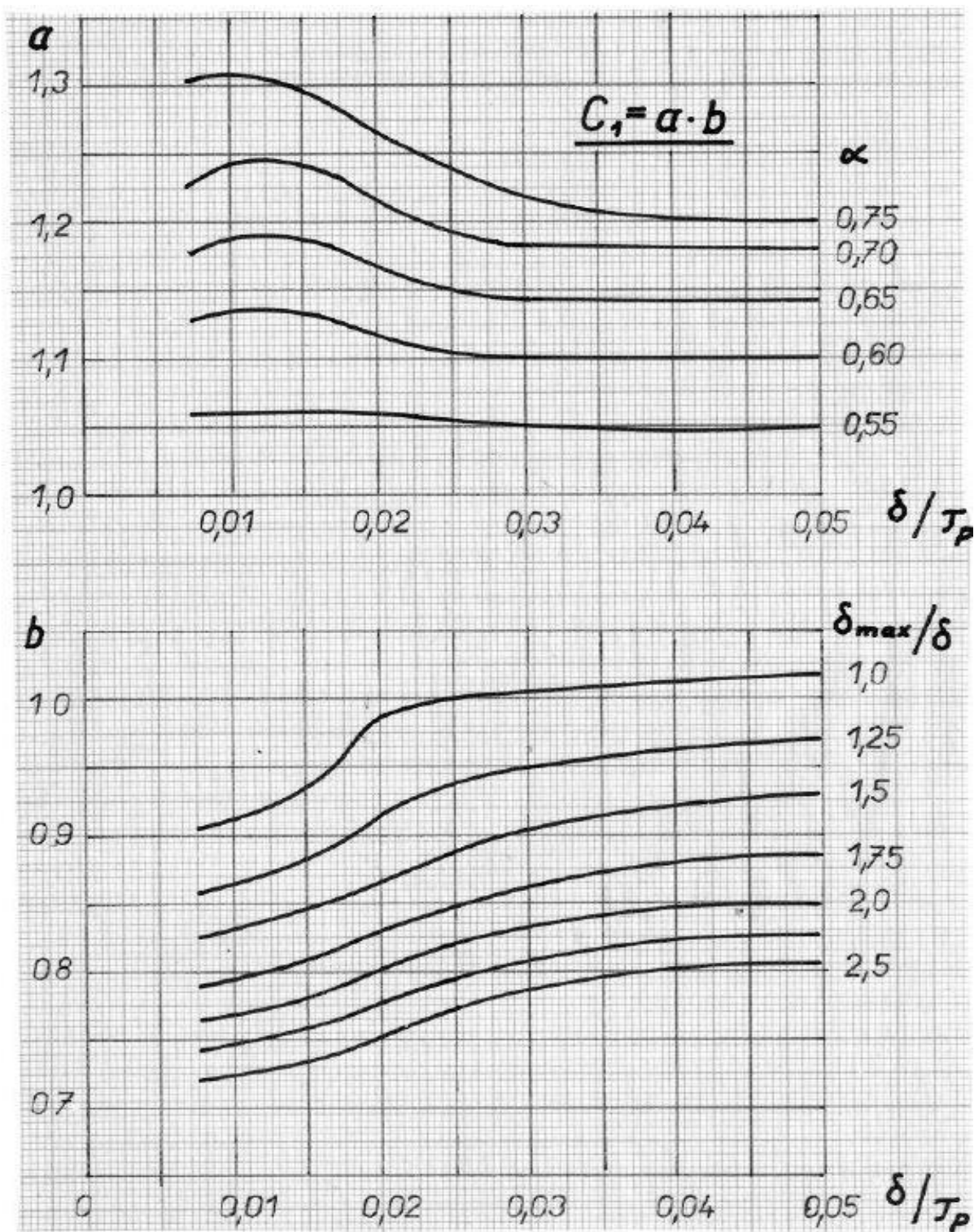
Jmenovitá tloušťka [mm]	0,8	1,0	1,1	1,2 (1,3)	1,4 (1,5)	1,6	1,8	2,0	2,2	2,6	2,8
0,30	1,8	1,3	1,66								
	2,0	1,48	1,86	2,18	2,38	2,08	2,60	2,89			
0,35	2,2	1,62	2,06	2,42	2,64	2,86	2,99	3,21			
	2,5	1,88	2,36	2,78	3,03	3,28	3,44	3,69	4,19	4,45	
0,40	2,8	2,1	2,60	2,94	3,14	3,42	3,70	3,89	4,17	4,73	5,05
	3,0	2,26	2,86	3,16	3,38	3,68	3,98	4,19	4,49	5,09	5,45
0,45	3,5	2,66	3,36	3,71	3,98	4,33	4,68	4,94	5,29	5,90	6,45
	4,0	3,08	3,86	4,26	4,58	5,28	5,69	6,09	6,89	7,45	8,25
0,50	4,5	3,46	4,36	4,81	5,18	5,63	6,08	6,44	6,89	7,79	8,45
	5,0	3,89	4,86	5,36	5,78	6,28	6,78	7,19	7,69	8,69	9,45
0,55	5,5	4,28	5,36	5,91	6,38	6,93	7,48	7,94	8,49	9,56	10,4
	6,0	4,68	5,86	6,46	6,98	7,56	8,18	8,69	9,29	10,5	11,4
0,60	6,5	5,08	6,36	7,01	7,58	8,23	8,88	9,44	10,1	11,4	12,4
	7	5,48	6,86	7,56	8,18	8,88	9,58	10,2	10,9	12,3	13,4
0,65	7,5	5,88	7,36	8,06	8,73	9,43	10,1	10,9	12,3	13,4	14,8
	8	6,28	7,86	8,66	9,38	10,2	11,0	11,7	12,5	14,1	15,4
0,70	8,5	6,68	8,36	9,16	9,93	10,7	11,5	12,3	13,1	14,8	16,0
	9	7,08	8,86	9,76	10,6	11,5	12,4	13,2	14,1	15,9	17,4
0,75	9,5	7,48	9,36	10,26	11,18	12,1	13,0	13,9	14,8	16,6	18,1
	10	7,88	9,86	10,86	11,8	12,8	13,8	14,7	15,7	17,4	19,0
0,80	10,5	8,28	10,36	11,36	12,38	13,4	14,4	15,4	16,4	18,1	19,6
	11	8,68	10,86	11,96	13,0	14,1	15,2	16,2	17,3	19,0	20,5
0,85	11,5	8,68	10,86	11,96	13,0	14,1	15,2	16,2	17,3	19,0	20,5
	12	9,08	11,36	12,56	13,66	14,76	15,86	16,96	18,06	19,8	21,3
0,90	12,5	9,08	11,36	12,56	13,66	14,76	15,86	16,96	18,06	19,8	21,3
	13	9,48	11,86	13,16	14,26	15,36	16,46	17,56	18,66	20,4	21,9
0,95	13,5	9,48	11,86	13,16	14,26	15,36	16,46	17,56	18,66	20,4	21,9
	14	9,88	12,36	13,66	14,76	15,86	16,96	18,06	19,16	20,9	22,4
1,00	14,5	9,88	12,36	13,66	14,76	15,86	16,96	18,06	19,16	20,9	22,4
	15	10,28	12,86	14,16	15,26	16,36	17,46	18,56	19,66	21,4	22,9
1,05	15,5	10,28	12,86	14,16	15,26	16,36	17,46	18,56	19,66	21,4	22,9
	16	10,68	13,36	14,66	15,76	16,86	17,96	19,06	20,16	21,9	23,4
1,10	16,5	10,68	13,36	14,66	15,76	16,86	17,96	19,06	20,16	21,9	23,4
	17	11,08	13,86	15,16	16,26	17,36	18,46	19,56	20,66	22,4	23,9
1,15	17,5	11,08	13,86	15,16	16,26	17,36	18,46	19,56	20,66	22,4	23,9
	18	11,48	14,36	15,66	16,76	17,86	18,96	20,06	21,16	22,9	24,4
1,20	18,5	11,48	14,36	15,66	16,76	17,86	18,96	20,06	21,16	22,9	24,4
	19	11,88	14,86	16,16	17,26	18,36	19,46	20,56	21,66	23,4	24,9
1,25	19,5	11,88	14,86	16,16	17,26	18,36	19,46	20,56	21,66	23,4	24,9
	20	12,28	15,36	16,66	17,76	18,86	19,96	21,06	22,16	23,9	25,4
1,30	20,5	12,28	15,36	16,66	17,76	18,86	19,96	21,06	22,16	23,9	25,4
	21	12,68	15,86	17,16	18,26	19,36	20,46	21,56	22,66	24,4	25,9
1,35	21,5	12,68	15,86	17,16	18,26	19,36	20,46	21,56	22,66	24,4	25,9
	22	13,08	16,36	17,66	18,76	19,86	20,96	22,06	23,16	24,9	26,4
1,40	22,5	13,08	16,36	17,66	18,76	19,86	20,96	22,06	23,16	24,9	26,4
	23	13,48	16,86	18,16	19,26	20,36	21,46	22,56	23,66	25,4	26,9
1,45	23,5	13,48	16,86	18,16	19,26	20,36	21,46	22,56	23,66	25,4	26,9
	24	13,88	17,36	18,66	19,76	20,86	21,96	23,06	24,16	25,9	27,4
1,50	24,5	13,88	17,36	18,66	19,76	20,86	21,96	23,06	24,16	25,9	27,4
	25	14,28	17,86	19,16	20,26	21,36	22,46	23,56	24,66	26,4	27,9
1,55	25,5	14,28	17,86	19,16	20,26	21,36	22,46	23,56	24,66	26,4	27,9
	26	14,68	18,36	19,66	20,76	21,86	22,96	24,06	25,16	26,9	28,4
1,60	26,5	14,68	18,36	19,66	20,76	21,86	22,96	24,06	25,16	26,9	28,4
	27	15,08	18,86	20,16	21,26	22,36	23,46	24,56	25,66	27,4	28,9
1,65	27,5	15,08	18,86	20,16	21,26	22,36	23,46	24,56	25,66	27,4	28,9
	28	15,48	19,36	20,66	21,76	22,86	23,96	25,06	26,16	27,9	29,4
1,70	28,5	15,48	19,36	20,66	21,76	22,86	23,96	25,06	26,16	27,9	29,4
	29	15,88	19,86	21,16	22,26	23,36	24,46	25,56	26,66	28,4	29,9
1,75	29,5	15,88	19,86	21,16	22,26	23,36	24,46	25,56	26,66	28,4	29,9
	30	16,28	20,36	21,66	22,76	23,86	24,96	26,06	27,16	28,9	30,4

Rozměry v závorkách vyplývají pro nové konstrukce.

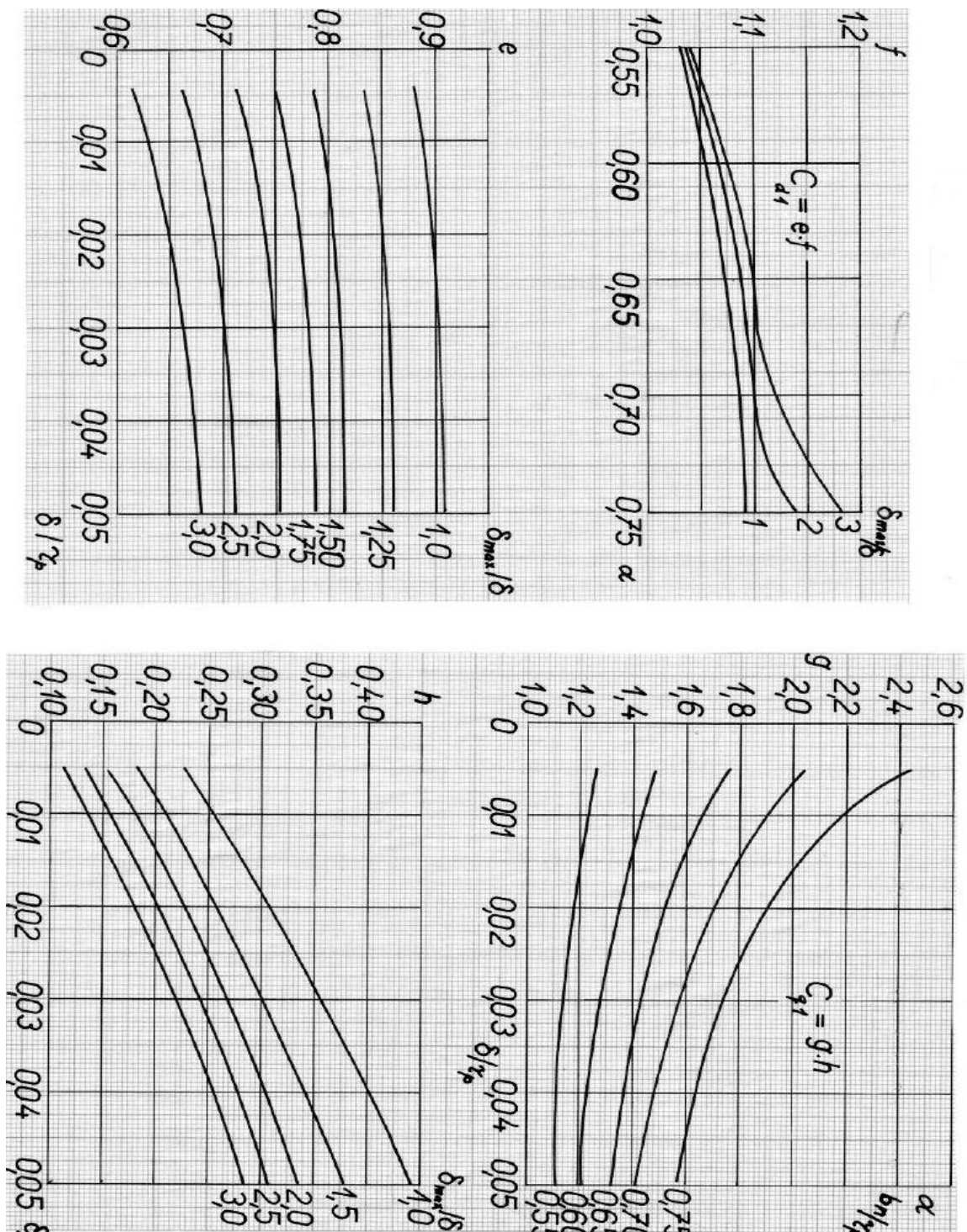
	3,0 (3,2)	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6 (6,5)	7	8	9	10
3,0												
3,5												
4												
4,5												
5												
5,5												
6												
6 (6,5)												
7												
8												
9												
10												
3,0	30,4	33,1	36,1	38,8	41,8	44,6	47,4	50,3	53,1	56,1	59,1	62,1
3,5	33,1	36,1	39,1	41,8	44,6	47,4	50,3	53,1	56,1	59,1	62,1	65,1
4	36,1	39,1	42,1	44,6	47,4	50,3	53,1	56,1	59,1	62,1	65,1	68,1
4,5	39,1	42,1	45,1	47,4	50,3	53,1	56,1	59,1	62,1	65,1	68,1	71,1
5	42,1	45,1	48,1	50,3	53,1	56,1	59,1	62,1	65,1	68,1	71,1	74,1
5,5	45,1	48,1	51,1	53,1	56,1	59,1	62,1	65,1	68,1	71,1	74,1	77,1
6	48,1	51,1	54,1	56,1	59,1	62,1	65,1	68,1	71,1	74,1	77,1	80,1
6 (6,5)	51,1	54,1	57,1	59,1	62,1	65,1	68,1	71,1	74,1	77,1	80,1	83,1
7	54,1	57,1	60,1	62,1	65,1	68,1	71,1	74,1	77,1	80,1	83,1	86,1
8	57,1	60,1	63,1	65,1	68,1	71,1	74,1	77,1	80,1	83,1	86,1	89,1
9	60,1	63,1	66,1	68,1	71,1	74,1	77,1	80,1	83,1	86,1	89,1	92,1
10	63,1	66,1	69,1	71,1	74,1	77,1	80,1	83,1	86,1	89,1	92,1	95,1

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

Obrázek 10.2 Tabulka s rozměry měděných pásů podle ČSN 42 8306 – 1959 [6]



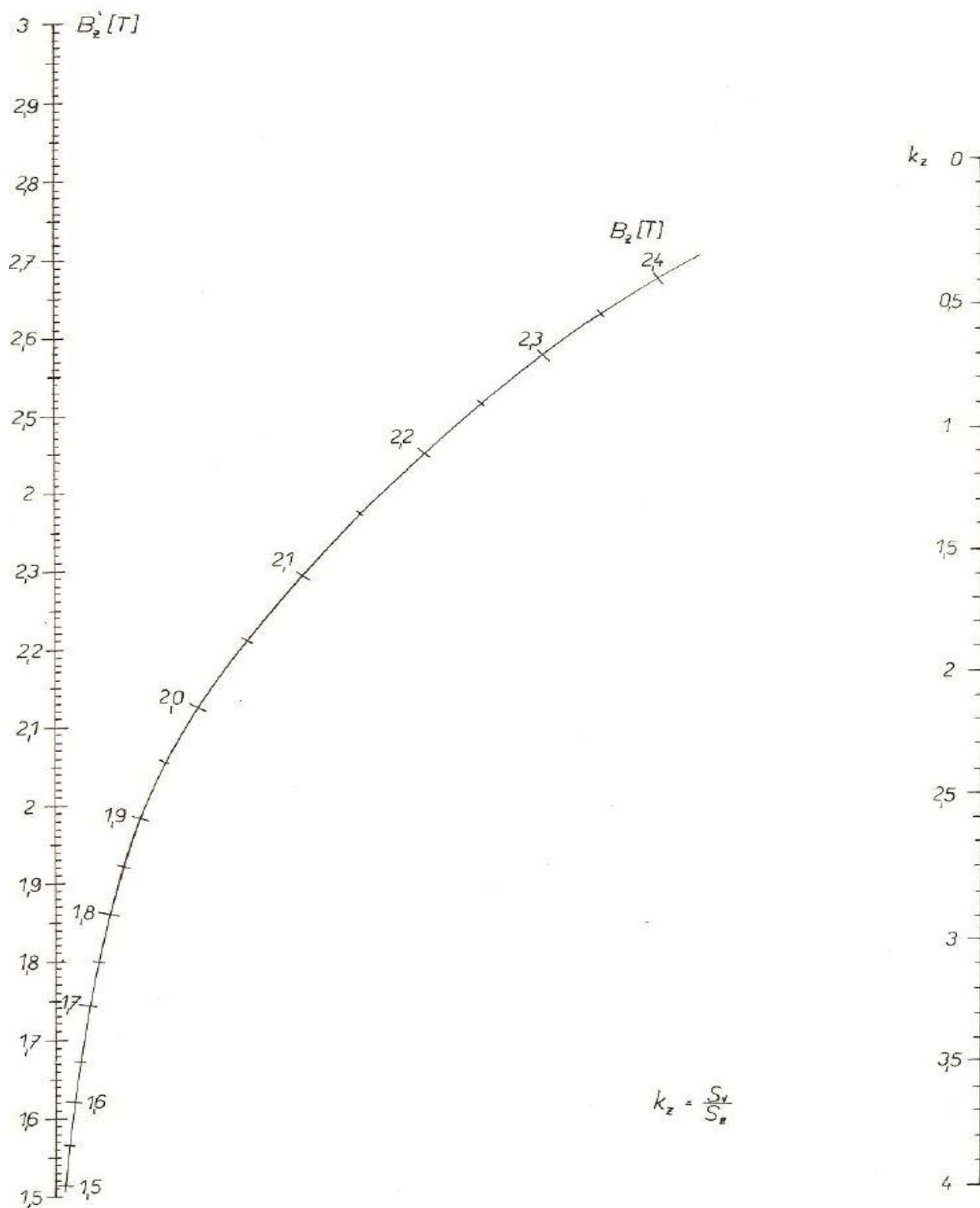
Obrázek 10.4 Grafy pro výpočet činitele základní harmonické magnetické indukce [6]



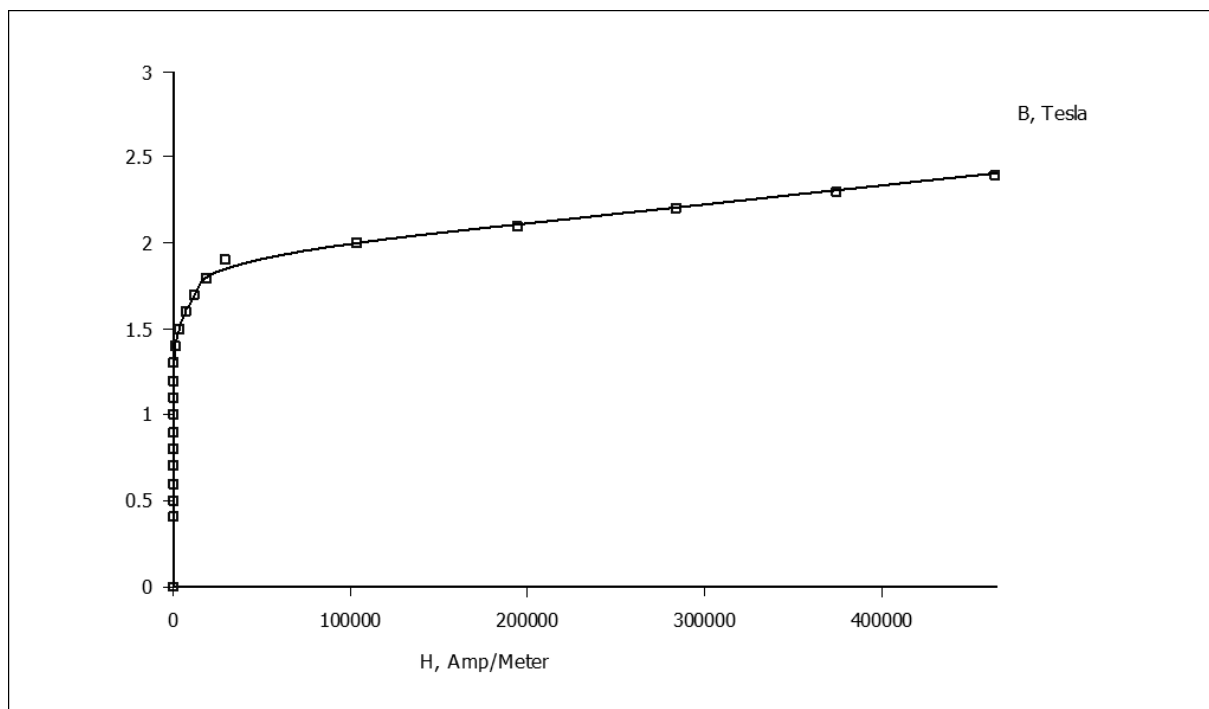
Obrázek 10.5 Grafy pro výpočet činitelů C_{d1} a C_{q1} [6]

Nomogram k určení skutečné indukce v zubech induktu

Dynamový plech tl. 0,5 $\Delta p_{Fe1.0} = 1,8$



Obrázek 10.6 Nomogram k určení skutečné magnetické indukce v zubech [6]



Obrázek 10.7 B-H charakteristika oceli 2411 použité na elektrotechnické plechy [6]

B (T)	0	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3	1.4
H (A*m⁻¹)	0	72	83	99	119	147	187	252	344	460	860	1750
1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2	2.1	2.2	2.3	2.4			
3540	7120	12500	19100	30000	104000	194000	284000	374000	464000			

Tabulka 10. 1 B-H charakteristika oceli 2411 použité na elektrotechnické plechy [6]