

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A  
VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Návrh synchronního generátoru**

Design of synchronous generator

**2012**

**Bc. Jan Tampír**

# **Téma práce**

Návrh synchronního generátoru

## **Anotace**

Cílem této diplomové práce je výpočet elektromagnetického návrhu synchronního generátoru podle požadovaných parametrů. Zaměřuje se na návrh synchronního generátoru, nákres 3D modelu v programu SolidWorks a výpočet mechanického namáhání rotoru pomocí programu ANSYS.

## **Klíčová slova**

Synchronní generátor, stator, rotor, charakteristika naprázdno, vinutí, ztráty, magnetické pole, ANSYS

## **Topic of the thesis**

Design of synchronous generator

## **Annotation**

The aim of this graduation thesis is calculation the electromagnetic design of synchronous generator according to desired parameters. It directs on concept of synchronous generator, scheme 3D figure in SOLIDWORKS program and calculation of mechanical stress rotor via ANSYS program.

## **Keywords**

Synchronous generator, stator, rotor, open-circuit characteristic, winding, magnetic field, ANSYS.

# **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.

V Plzni dne 11.5.2012

.....

**Bc. Jan Tampír**

## **Poděkování**

Chtěl bych touto formou poděkovat všem lidem, kteří mi pomáhali při tvorbě této diplomové práce zejména Doc. Josefu Červenému, Ing. Romanu Pechánkovi a Ing. Jiřímu Svobodovi za cenné rady při tvorbě diplomové práce.

## Obsah

Úvod .....	8
1 Elektromagnetický výpočet .....	9
1.1 Konstrukční provedení turboalternátoru .....	9
1.1.1 IP .....	9
1.1.2 IM (International Mounting) .....	9
1.1.3 IC (International Cooling) .....	9
1.2 Zadání návrhu .....	10
2 Elektromagnetický výpočet synchronního stroje .....	11
2.1 Výpočet hlavních parametrů .....	11
2.2 Určení parametrů vinutí induktu: .....	12
2.2.1 Návrh statorové drážky .....	14
2.2.2 Odpor a rozptylová reaktance: .....	17
2.3 Návrh magnetického obvodu .....	18
2.3.1 Magnetická bilance statoru .....	20
2.3.2 Návrh vinutí rotoru .....	21
2.3.3 Magnetická bilance rotoru .....	22
2.4 Charakteristika naprázdno .....	23
2.5 Výpočet budícího vinutí .....	23
2.6 Ztráty .....	23
2.7 Mechanické namáhání rotoru .....	26
3 Konstrukční řešení synchronního stroje .....	28
3.1 Popis konstrukčních součástí .....	28
3.1.1 Statorový svazek .....	28
3.1.2 Kostra statoru .....	28
3.1.3 Rotor .....	29
3.1.4 Hřídel .....	29
3.1.5 Vinutí .....	29
3.2 Chlazení synchronního generátoru .....	30
3.2.1 Chlazení konstruovaného stroje .....	31
3.3 Konstrukční řešení turbogenerátoru v CAD .....	31
4 Modelování synchronního generátoru .....	35

4.1	Modální analýza.....	35
4.2	Simulace.....	35
4.3	Výstup ze simulace zatěžovaného modelu .....	38
5	Porovnání výpočtu .....	41
6	Závěr .....	43
	Příloha.....	45
	Zadání výpočtu: .....	45
	Výpočet základních parametrů .....	45
	Parametry vinutí.....	46
	Konstrukční parametry vinutí.....	49
	Návrh magnetického obvodu .....	51
	Výpočet rotorových parametrů .....	53
	Charakteristika naprázdno: .....	54
	Rotorové vinutí .....	55
	Ztráty.....	57
	Mechanické namáhání zubu rotoru.....	58
	Obrazové přílohy .....	62
	Graf $B_\delta$ a $A$ v závislosti na výkonu a počtu pólu stroje.....	62
	Tabulka měděných pasů .....	62
	Tabulka měděných pasů .....	63
	Monogram k určení skutečné indukce v zubu .....	64
	Magnetizační charakteristika M310-50A .....	64
	Magnetizační charakteristika M310-50A .....	65
	Magnetizační křivka turbooceli CrNiMoV .....	66
	Magnetizační tabulka statoru, magnetizační tabulka rotoru .....	67
	Magnetizační tabulka celého magnetického obvodu.....	68
	Charakteristika naprázdno .....	69

## Úvod

Nejpoužívanějšími elektrickými stroji na výrobu elektrického proudu jsou převážně synchronní generátory. Tyto stroje od svého vzniku prošly rozsáhlým vývojem. Jsou používány pro výrobu elektrického vyráběných od malých strojů s vyniklými póly až po velké turboalternátory. Synchronní generátory s vyniklými póly jsou používány pro nižší otáčky např. vodní elektrárny, trakce, lodní motory. Synchronní generátory s hladkým rotorem jsou využívány pro výrobu elektrického proudu ve spojení parní, nebo plynovou turbínou. Jedná se tedy o teplárny, plynové, uhelné a jaderné elektrárny. Tato diplomová práce se zabývá turboalternátorem středního výkonu, který lze využít v teplárenských blocích.

Dnešní turbogenerátory jsou oproti svým předchůdcům menší, propracovanější, jednodušší na výrobu, kde pro výpočet a konstrukci jsou použity výpočetní software a moderní materiály.



# 1 Elektromagnetický výpočet

## 1.1 Konstrukční provedení turboalternátoru.

Mezi důležité údaje elektrických strojů patří tři údaje: krytí IP, konstrukční uspořádání na navazující technologii IM a chlazením IC.

### 1.1.1 IP

Označení IP ABCD označuje způsob ochrany před vnikem cizích předmětů a vniknutí vody.

A – ochrana před vniknutím cizích předmětů a před dotykem živých částí (0 až 6).

B – ochrana před vnikem vody (0 až 8)

C – přídatné písmeno (zkoušení pomocí zkušebních sond)

D – doplňkové písmeno

### 1.1.2 IM (International Mounting)

Označení IM vymezuje konstrukční a montážní označení stroje např. umístění svorkovnice, konec hřídele, ložiskové stojany apod. Podle převzaté mezinárodní normy ČSN EN 60034–7 lze označovat tvar elektrického točivého stroje dvěma možnými způsoby (starým a novým označením). Písmenný kód je psán ve tvaru podle nového značení:

IM ABCD

A – skupinové číslo tvaru stroje (0–9)

B,C – číselný znak pro způsob montáže (0–9)

D – číslo označující provedení konce hřídele (0–9)

### 1.1.3 IC (International Cooling)

Představuje systém chlazení a použité chladivo elektrického stroje dle normy ČSN EN 660034–6. Pro chlazení elektrických strojů točivých lze využít:

a, přirozené chlazení (nerovnosti na rotoru, konstrukční vlastnosti – vyniklé póly)

b, vlastní chlazení (ventilátor na hřídeli)

c, přirozené vlastní chlazení (kombinace přirozeného a vnějšího chlazení ofukování)

d, cizí chlazení

Systematika označení umožňuje použít zkráceného označení, vypouští se označení chladiwa. Kód IC je uváděn ve tvaru:

IM ABCDE

A – uspořádání chladícího okruhu (0–8)

B – primární chladiwo (lze vypustit pro vzduch)

C – způsob proudění primárního chladiwa

D – sekundární chladiwo (lze vypustit pro vzduch)

E – způsob proudění sekundárního chladiwa

## 1.2 Zadání návrhu

Pro úplné zadání návrhu synchronního stroje je důležité znát vazby na použitou technologii, je potřeba zvolit výchozí jmenovité hodnoty a další technické parametry, kterými zpravidla jsou.

a, Jmenovitý výkon stroje. Zdánlivý a činný výkon generátorů na svorkách stroje.

b, Počet fází a zapojení statorového vinutí (většinou zapojení trojfázového vinutí zapojené do hvězdy).

c, Jmenovitá hodnota frekvence (je dána frekvencí sítě 16 a 2/3, 50 a 60 Hz)

d, Jmenovité otáčky (volí se podle hnacího soustrojí, vodní, tepelné elektrárny, diesel generátory, případně převodovky apod.)

e, Jmenovité napětí statorového vinutí, volí se zpravidla podle výkonu stroje v napěťové řadě 0,4; 3,15; 6,3; 10,5; 13,8; 15,7; 18; 24

f, Účinník  $\cos\varphi$  nabývá u generátorů přibližně 0,8.

g, Vlastnosti budící soustavy a budícího vinutí.

h, Systém chlazení (IC), krytí (IP) a konstrukční uspořádání (IM).

## 2 Elektromagnetický výpočet synchronního stroje

### 2.1 Výpočet hlavních parametrů

Pro určení rozměrů synchronních strojů je důležité znát: zdánlivý výkon  $S$ , jmenovité otáčky  $n_n$ , účinník  $\cos\varphi$  a typ stroje. Rozměry synchronního stroje určíme pomocí Essonova činitele. V praxi se pro výpočet rozměrů elektrických strojů využívají různé strojové konstanty (Adlerova, Richterova), které se vztahují pro různé metody výpočtu rozměrů strojů. Hlavní rozměry  $d_i$  a  $l_i$  se určují pomocí vztahu dosazením hodnot  $S_{i,n}$  a  $C$ .

$$\text{Vnitřní výkon: } S_i = C d_i^2 l_i n$$

$$\text{Essonův činitel: } C = \frac{\pi^2}{60\sqrt{2}} B_\delta A k_v$$

$$\text{Výpočet objemu stroje: } d_i^2 l_i = \frac{S}{C n}$$

$$n = \frac{60f}{p}$$

Velikost  $d_i$  a  $l_i$  určujeme podle účelu stroje a konstrukčních vlastností.

- a, velikosti otáček (max. obvodová rychlost)
- b, doprava stroje na místo určení (dopravní profil)
- c, daný poměr  $l_i/d_i$  daný řadou (optimální ztráty, materiálová náročnost apod.)
- d, velikost momentu setrvačnosti (nízký moment pro reverzaci pohonu, vysoký pro generátory apod.)
- e, výkonu určíme pomocí diagramu, kde odečteme  $D_i$  v závislosti na výkonu.
- f, pomocí empirického vzorce např.  $D_i = 0,08 \cdot (2p)^{0,625} \cdot S^{0,185}$

$$\text{Činný výkon stroje: } P = S \cos\varphi$$

$$\text{Napětí v jedné fázi: } U_f = \frac{U_s}{\sqrt{3}}$$

$$\text{Proud v jedné fázi: } I_1 = \frac{S}{\sqrt{3}U_s}$$

Počet pólových dvojic je určen pomocí vzorce pro určenou frekvenci sítě a otáček rotoru (statoru).  $p = \frac{60f}{n}$

Pro předběžný výpočet Essonova činitele je potřeba určit indukci  $B_\delta$  ve vzduchové mezeře a proudovou hustotu  $A$ . Hodnoty  $B_\delta$  a  $A$  lze určit pomocí diagramu

$$\text{Činitel využití (předběžně): } C = \frac{\pi^2}{60 \cdot \sqrt{2}} AB_\delta k_{v1}$$

$$\text{Pólová rozteč: } t_p = \frac{\pi D_i}{2p}$$

## 2.2 Určení parametrů vinutí induktu:

Vinutí induktu se nachází na statoru, vinutí induktu je podobné vinutí asynchronního stroje. Může být zlomkové, jelikož synchronní stroje nemají diferenční rozptyl. Vhodnou křivku indukovaného napětí lze zabezpečit velkým počtem drážek, zlomkovým počtem drážek na pól a fázi, zešíkmením pólu a vhodným zkrácením kroku vinutí. Turboalternátory mají lichoběžníkové magnetické pole. Pro vytvoření sinusového pole, je vhodné uvažovat především zvýšením počet drážek na pól a fázi vhodným zkrácením cívkového kroku.

Drážková rozteč statoru:  $t_{d1} = 15 \div 60 \text{ mm}$

$$\text{Počet drážek: } Q = \frac{\pi D_1}{t_{d1}}$$

Počet drážek na pól a fázi se volí tak, aby vinutí bylo zlomkové, nebo vinutí s velkým  $q$ .

$$\text{Počet drážek na pól a fázi } q = \frac{Q}{2pm}$$

$$\text{Počet drážek na fázi: } Q_f = \frac{Q}{m} = \frac{2pmq}{m} = 2pq = 2p \frac{n}{c}$$

$$\text{Přepočítaný počet drážek: } Q = 2pmq$$

$$\text{Počet drážek na pól: } Q_p = \frac{Q}{2p}$$

$$\text{Počet závitů v sérii: } N_s = \frac{\pi D_1 A}{2mI_1}$$

Počet paralelních větví  $a_{\approx}$  volíme tak aby vycházela hodnota  $n_d$  na celé sudé číslo.

$$\text{Počet vodičů v drážce: } n_d = \frac{a_{\approx} N_s}{pq}$$

Výsledné  $n_d$  zaokrouhlíme na nejbližší číslo, dále přepočteme počet závitů.

$$\text{Počet závitů v sérii: } N_s = \frac{n_d pq}{a_{\approx}}$$

Dále určíme obvodovou proudová hustotu, vypočteme odchylku, odchylka se nesmí

$$\text{být větší než 10\% : } A = \frac{2mI_1 N^2}{\pi D_1}$$

Z důvodu vhodné křivky indukovaného napětí je potřeba zkrátit cívkový krok, kvůli potlačení lichých harmonických proudů. Pokud by tato harmonická napětí dosahovala vysokých hodnot, byla by křivka indukovaného napětí zvlněná. Činitel zkrácení se volí prodloužený, nebo zkrácený (od 0,8 do 0,85). Prodloužený krok není vhodný, protože prodlužuje čela vinutí (nedošlo by materiálové úspore). Cívkový krok  $y_{1d}$  většinou bývá celé číslo. Nejvýhodnější potlačení 3 harmonické dochází při zkrácení  $\beta=5/6$ .

$$y_{1d} = \beta Q_p$$

$$\text{Zpětné určení činitel zkrácení kroku: } \beta = \frac{y_{1d}}{Q_p}$$

Pro výpočet fiktivního kroku na komutátoru je potřeba znát druh vinutí a zda-li je vinutí křížené či nekřížené. Parametr  $\varepsilon$  označuje, zda-li je vinutí vlnové  $\varepsilon=1$ , vinutí smyčkové  $\varepsilon=0$ , parametr  $a_{II}$  nabývá takové hodnoty, tak aby vycházel krok na

$$\text{komutátoru celé číslo. } y_k = \frac{\varepsilon Q \pm a_{II}}{p}$$

Kroky v počtu cívkových stran:

$$\text{Přední cívkový krok: } y_1 = 2y_{1d} + 1$$

$$\text{Zadní cívkový krok: } y_2 = 2y_k - y_1$$

Počet skupin podle  $a_s m'$  kde  $m'$  je matematický počet fází. Tato hodnota zvyšuje činitel  $k_f$

Počet skupin na fázi:  $\frac{a_s m'}{m}$

Počet cívek na skupinu určuje jak je možno zapojit cívky. Cívky se mohou zapojit sériově, paralelně, nebo sérioparalelně.  $\frac{Q}{a_s m'}$

Činitelé využití pro  $v$ -té harmonické, tento činitel udává, jak velkých hodnot dosahují liché harmonické ( $v = 1, 5, 7$ ). Liché harmonické nejvíce ovlivňují křivku indukovaného napětí.

$$k_{v1} = \sin\left(v\beta \frac{\pi}{2}\right) \frac{\sin v \frac{\pi}{m'}}{n \sin v \frac{\pi}{m'n}}$$

Skutečný činitel využití elektrické stroje:

$$C = \frac{\pi^2}{60\sqrt{2}} AB_\delta k_{v1}$$

Délka stroje se vypočítá podle essonova činitele:  $l_e = \frac{S[\text{kVA}]}{CD_1 n}$

Chlazení rotoru synchronního stroje je řešeno cirkulací vzduchu přes větrací štěrby. Štěrby jsou umístěny mezi pakety, velikost štěrbin bývá přibližně 10mm. Velikost jednotlivých paketů nabývá rozměru 40-50mm.

Počet paketů:  $i = \frac{l_e}{\check{s}_p}$

Celková délka stroje:  $L = l_e + \check{s}_k (i - 1)$

### 2.2.1 Návrh satorové drážky

Z nejpoužívanějších drážek pro stator synchronních strojů jsou otevřené rovnoběžné drážky: M a N, tak aby bylo možné vložit tyčové vinutí.

Pro drážku typu N a M lze psát:

šířka drážky:  $b_d = b_1 = b_0$

šířka můstku  $h_0$  jednotky mm u turboalternátoru navrženého v ČKD cca 10mm.

výška klínu  $h_1$  přibližně 6mm, zub klínu  $x_1$  jednotky mm

Indukce v zubu nabývá většinou hodnoty až:  $B'_{z1} = 2 \text{ T}$

Vzdálenost od okraje vodiče po vrchol drážky

$$h'_1 = h_0 + h_1 + \text{vložka pod klín} + 0,5 \times \text{izolace proti Fe} + \text{vložka pod klín}$$

Vzdálenost mezi kraji vodičů

$$h'_2 = h_d - h_1 - 0,25 \times \text{izolace proti Fe} - \text{vložka na dno}$$

Velikost drážkové rozteče na průměru induktu  $D_1$ :  $t_{d1} = \frac{\pi D_1}{Q}$

$$\text{Šířka zubu: } z_1 = \frac{B_\delta t_{d1}}{B'_{z1} k_{Fe}}$$

Činitel plnění železa  $k_{Fe}$  dosahuje hodnoty přibližně 0,97.

Šířka drážky může být volena pomocí příslušných tabulek, volíme nejbližší nižší normalizovaný rozměr, nebo může být ponechána jak byla vypočtena:  $b_d = t_{d1} - z_1$

$$\text{Skutečná šířka zubu: } z_1 = t_{d1} - b_d$$

$$\text{Zpětný přepočít indukce v zubu: } B'_{z1} = \frac{B_\delta t_{d1}}{z_1 k_{Fe}}$$

$$\text{Šířka vodiče: } b'_v = b_d - 2t_1$$

Proudová hustota je volena pomocí empirického vzorce, velikost konstanty  $K$  je volena podle jmenovitého napětí statoru:

$$\sigma_{Cu} = \sqrt{\frac{K}{b'_v}}$$

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

$b'_v$  šířka holého vodiče v drážce

Výška vodiče  $h_v$  při jeho šířce  $b'_v$ , jak vychází z bilance drážky na šířku:

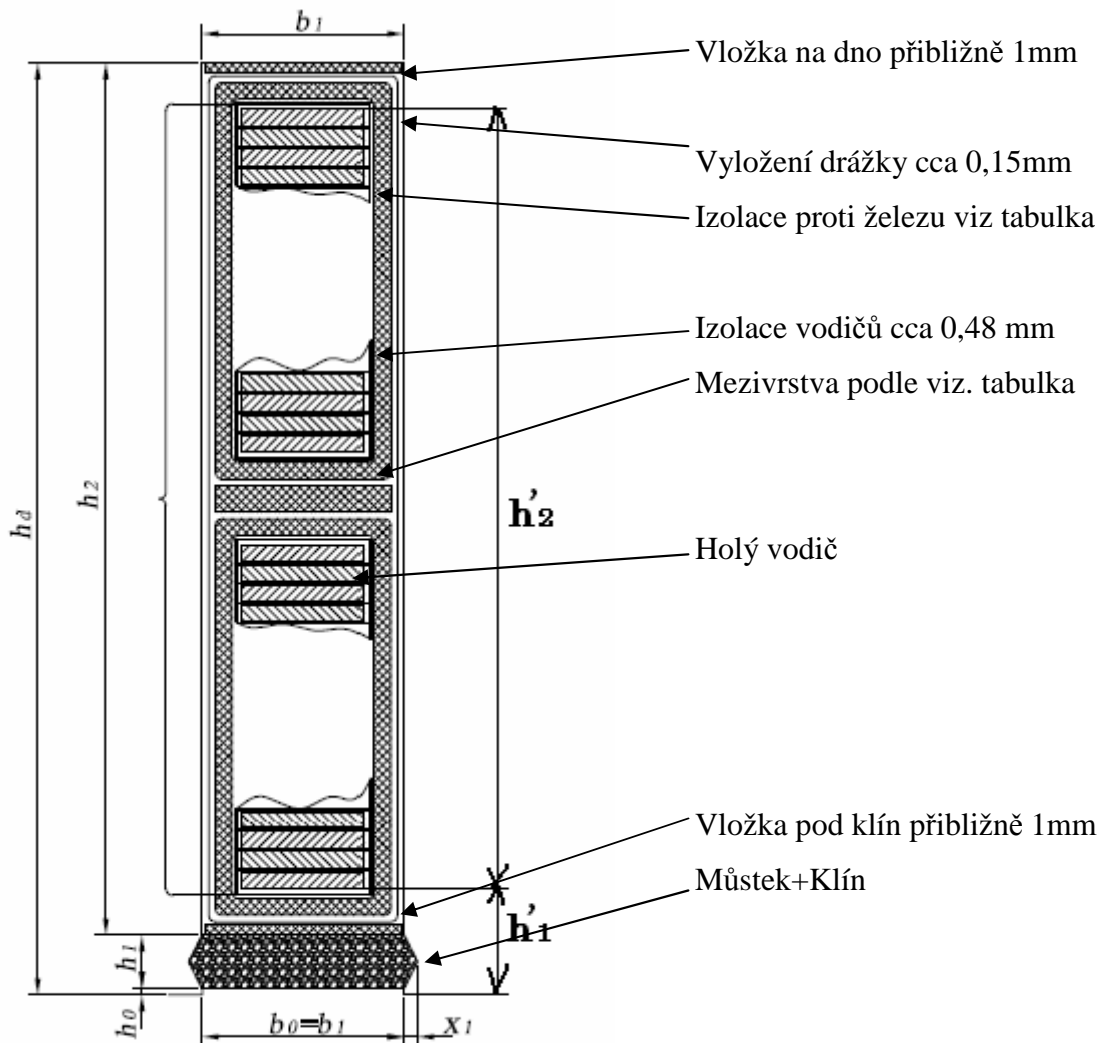
$$h_v = \frac{S_{Cu1}}{b'_v}$$

Vyšel by vysoký vodič, vznikaly by v něm ztráty vířivými proudy, proto je vhodné vodič rozdělit na několik tenčích vodičů (normalizované měděné pasy) a pak z těchto vodičů vytvořit Roebelovu tyč. Přibližná výška samotného vodiče by měla být přibližně 2mm. Výsledný průřez  $S_{Cu}$  je dán součtem průřezů jednotlivých měděných

pasů  $S_{Cu} = j \cdot i \cdot S_1$ , kde  $j$  je rovno počtu vodičů vedle sebe a  $i$  rovno počtu vodičů nad sebou.

Výsledná proudová hustota tyče:  $\sigma_{Cu} = \frac{I_1}{a \cdot S_{Cu}}$

### Řez drážkou



Obr 1. rozměry drážky



Tabulka izolací pro drážku

Napětí (kV)	Izolace proti železu – t : ( mm /)			Mezivrstva m: (mm)
	obyčejná	lepší	Typ samicatherm	
0,4 až 1,5	0,45	-	-	3
3,0	1,8	1,6	1,4	3
6,3	3,0	2,7	2,4	4
10,5	3,5	3,3	3,1	6
13,8	4,5	4,2	4,0	6
15,7	-	4,6	4,4	7
18,0	-	5,5	5,0	7

Tabulka 1 pro určení izolace proti železu a tloušťka mezivrstvy

### 2.2.2 Odpor a rozptylová reaktance:

$$\text{Vzdálenost mezi sousedními čely: } c = 4 + \frac{U[\text{kV}]}{2}$$

$$\text{Šířka čel vinutí: } b_{\xi} = b_d$$

$$\sin \alpha_{\xi} = \frac{b_{\xi} + c}{t_{d1}}$$

$$\text{Úhel výstupu čela z drážky (40 - 45°): } \alpha_{\xi} = \arcsin \varphi$$

$$\text{Délka poloviny čela bez ohybu: } x = \frac{\beta t_p}{2 \cos \alpha_{\xi}}$$

$$B = r + \frac{h_2}{2}$$

$$y = \frac{\beta t_p}{2} \operatorname{tg} \alpha_{\xi}$$

$$\text{Výška čela + vnitřní poloměr ohybu tyče: } R = \frac{h_2}{2} + r$$

$$\text{Obvod čtvrtiny ohybu tyče: } o = \frac{\pi R}{2}$$

$$\text{Délka čela: } l_{\xi} = 2(x + o + v)$$

Celková délka tyče  $l_v = L + l_\xi$

### Určení odporů vinutí

Odpor při teplotě 20°C:  $R'_{1/20} = \rho_{Cu} \frac{2 \cdot l_v \cdot N_s}{a_{st} S_{Cu1}}$

kde  $\rho_{Cu}$  je měrný odpor měděného vodiče při teplotě 20°C  $\left[ \frac{\Omega \cdot m}{mm^2} \right]$

Vliv skinefektu:

Náhradní výška vodiče:  $\xi = 2h_v \pi \sqrt{\frac{j b_v f}{b_d \rho}} 10^{-7}$

Činitel zvýšení elektrického odporu:  $k_{Cu} = \frac{g^2 - 0,2}{9} \xi^4$ , kde  $g = i \cdot n_d$

Odpor při střídavém proudu při 20°C:  $R_{1/20} = (1 + k_{Cu}) \cdot R'_{1/20}$

Odpor při 75°C:  $R_{1/75} = 1,22 \cdot R_{1/20}$

procentní hodnota úbytku napětí na ohmickém odporu:  $u_R = \frac{R_{1/75} \cdot I_1}{U_f} \cdot 100\%$

Rozptylová reaktance by měla nabývat co největší hodnoty kvůli lepšímu zkratovému poměru.

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

## 2.3 Návrh magnetického obvodu.

Při návrhu magnetického obvodu se vychází z 1. Maxwellovy rovnice:  $U_m = \oint H \cdot dl$ .

Vzduchová mezera:  $\delta = 0,3 \cdot \frac{t_p A}{B_\delta} \cdot 10^{-6}$

Magnetický tok:  $\Phi = \frac{U_f}{4,44 f N_s \cdot k_{v1}}$

Carterův činitel určuje vliv drážkování na magnetickou vodivost vzduchové mezery

Určení Carterova činitele statoru:  $k_{cs} = \frac{t_{d1}}{t_{d1} + \gamma_1 \delta}$

$$\gamma_1 = \frac{\left(\frac{b_d}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{b_d}{\delta}}$$

Průměr rotoru:  $D_r = D_1 - 2\delta$

dělení rotoru:  $Q_r$

Počet drážek vyplněných rotorovým vinutím:  $Q_{rv}$

$$\text{Šířka drážky rotoru: } d_r = \frac{1}{Q_r}$$

$$\text{Drážková rozteč rotoru: } t_{dr} = \frac{D_r}{Q_r}$$

Šířka zubu rotoru:  $z_r = t_{dr} - b_{dr}$

Výpočet Carterova činitele příčné osy rotoru:  $k_{crq} = \frac{t_{dr}}{t_{dr} + \gamma_2 \delta}$

$$\gamma_2 = \frac{\left(\frac{b_{dr}}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{b_{dr}}{\delta}}$$

Carterův činitel v příčné ose:  $k_{cq} = k_{cs} k_{crq}$

Činitel respektující rozšíření toku vlivem chladících kanálů:  $k_1 = \frac{1}{1 + \frac{\check{s}_k(i+1)\delta}{l_e(2+\delta)}}$

Činitel zúžení magnetického toku ve větší části vzduchové mezeře mezi povrchem rotoru a statoru:  $k_d = \frac{D_1}{D_1 - \delta}$

Celkový Carterův činitel:  $k_c = k_{cq} k_d k_1$

Skutečná indukce  $B_v$  nemá ve vzduchové mezeře harmonický průběh, ale lichoběžníkový (zubový od drážek). Pro konstrukci charakteristiky naprázdno musíme znát skutečnou amplitudu magnetického toku  $\Phi_v$  a indukce  $B_v$

Činitel tvaru magnetického toku:  $C_t = \frac{\frac{\gamma_r \pi}{4k_{cq}} + \frac{\pi}{2}(1 - \gamma_r)}{C_1}$

Činitel  $C_1$  lze odečíst z příslušných tabulek uvedených v literatuře [8] str.483.

$$\text{Drážkové krytí rotoru } \gamma_r = \frac{Q_{rv}}{Q_r}$$

$$\text{Skutečná magnetická indukce: } B_v = \frac{B_\delta}{C_1}$$

$$\text{Skutečný magnetický tok: } \Phi_v = C_t \Phi$$

### 2.3.1 Magnetická bilance statoru

Pro sestrojení charakteristiky naprázdno je potřeba sestrojít magnetické napětí pro 100%, 115% a 130% fázového napětí. Jednotlivá magnetická napětí určíme a sečteme dohromady.

$$\text{Magnetické napětí ve vzduchové mezeře: } F_\delta = 0,8k_c B_v \delta \cdot 10^{-6}$$

Magnetické napětí zubové vrstvy statoru

Pro výpočet skutečné indukce  $B_z$  pomocí monogramu je potřeba určit koeficient  $k_{zi}$  a zdánlivou indukci  $B'_z$ . Indukci počítáme pro hlavu, střed a dno drážky, a to při 100%, 115% a 130%. Pomocí B–H charakteristiky elektrotechnického plechu a Simpsonova pravidla určíme magnetické napětí  $F_z$ . Vypočtená napětí jsou přenesena do magnetizační tabulky pro stator

$$\text{Drážková rozteč induktu: } t_{d1} = \frac{\pi D_1}{Q_s}$$

$$\text{Drážková rozteč v polovině statorové drážky: } t_{d2} = \frac{\pi D_1 + h_d}{Q_s}$$

$$\text{Drážková rozteč dvě statorové drážky: } t_{d3} = \frac{\pi D_1 + 2h_d}{Q_s}$$

$$\text{Šířka zubu: } z_i = t_{di} - b_d$$

$$\text{Činitel: } k_{zi} = \frac{t_{di} L}{k_{Fe} z_i l_e}$$

$$\text{Zdánlivá indukce: } B'_{zi} = \frac{B_v t_{di}}{k_{Fe} z_i}$$

Simpsonovo pravidlo pro výpočet střední hodnoty intenzity  $H_{zstř}$ :

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

Magnetické napětí zubu:  $F_z = H_{zstř} h_d$

Indukci jha pro stator lze volit až 1,5 T.

$$\text{Výška jha statoru: } h_{ji} = \frac{\Phi}{2B_{ji} l_e k_{Fe}}$$

Průměr statoru:  $D_2 = D_1 + 2(h_d + h_{ji})$

$$\text{Délka siločáry: } l_{ji} = \frac{\pi D_2}{2p}$$

Magnetické napětí jha:  $F_{ji} = H_{ji} l_{ji}$

### 2.3.2 Návrh vinutí rotoru

Počet rotorových drážek rotoru je často volen podle průměru rotoru.

Průměr rotoru:  $D_r = D_1 - 2\delta$

dělení rotoru:  $Q_r$

Počet drážek vyplněných rotorovým vinutím:  $Q_{rv}$

Dělení rotoru s počet vyplněných drážek lze najít v [8] str. 482

$$\text{Šířka drážky rotoru: } d_r = \frac{1}{Q_r}$$

$$\text{Drážková rozteč rotoru: } t_{dr} = \frac{D_r}{Q_r}$$

Délka rotoru je o 100–150mm delší než induktu:  $l_{cr1} = 0,1 - 0,15$

$$\text{Střední rozteč cívky: } l_{cr2} = \frac{\pi}{3} D_r$$

Střední délka závitu:  $l_s = 2L + 2l_{cr1} + 2l_{cr2}$

Měrný odpor mědi:  $\rho_{120} = \rho_{20} (1 + \alpha_{Cu} (120^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}))$

Průměr hřídele rotoru je stanoven podle vzorce:  $D_h = k_h \cdot \sqrt[3]{\frac{P[\text{kW}]}{n}}$ , činitel  $k_h$

dosahuje hodnot od 0,18-0,2

### 2.3.3 Magnetická bilance rotoru

Postup je podobný jako u výpočtu magnetického napětí statoru. Široký zub rotoru je rozdělen na dno, střed a hlavu. Je určena střední hodnota intenzity v zubu, ze které je následně vypočítáno magnetické napětí. Dále je potřeba určit magnetické napětí jha rotoru. Jednotlivá magnetická napětí pro hodnoty 100%, 115% a 130% jsou zapsána do magnetizační tabulky rotoru.

Magnetická indukce ve vzduchu přepočtená na rotor:  $B_{vr} = \frac{B_v L}{l_r}$

Magnetická vodivost napříč drážkou:  $\Lambda_D = \frac{h_m}{2b_{dr}} + \frac{h_k}{b_{dr}}$ , kde  $h_m$  je výška mědi

v drážce+izolace,  $h_k$  je klín + vložka pod klín

Magnetická vodivost přes hlavy zubů:  $\Lambda_H = \frac{5 \frac{\delta}{b_{dr}}}{5 + 4 \frac{\delta}{b_{dr}}}$

Magnetické napětí dvou vzduchových mezer, zubů a jha:  $F_{zj} = 2(F_\delta + F_z + F_{ji})$

Rozptylový tok rotoru:  $\Phi_{r\sigma} = \frac{2 \cdot 1,25 \cdot F_{zj} \cdot l_r (\Lambda_D + \Lambda_H) \cdot 10^{-6}}{Q_p}$

Poměr rozptylových toků:  $\tau = \frac{\Phi_{r\sigma}}{\Phi_v}$

Magnetické napětí jha rotoru

Délka jednoho půlzávitu rotorového vinutí:  $l_r = L + l_{cr1} + 0,15$

Uvažovaná plocha:  $S = (d_r - 2h_{drc})l_r$

Magnetická indukce:  $B_{jr} = \frac{\Phi_v (1 + \tau)}{S}$

Délka střední siločáry:  $l_{jr} = \frac{d_{rk}}{2}$

Magnetické napětí,  $H_{jr}$  je odečteno z B-H charakteristiky:  $F_{jr} = H_{jr} l_{jr}$

Určení reakčního magnetického napětí:  $F_r = \frac{2,7}{2p} N_s I_1 k_{v1}$

## 2.4 Charakteristika naprázdno

K jejímu sestrojení je potřeba znát veškerá magnetická napětí ve stroji, napětí jsou sečtena v magnetizační tabulce a vynesena pro hodnoty 100%, 115% a 130%, výstupem ze sestrojené charakteristiky je budící magnetické napětí. Toto magnetické napětí je potřebné pro stanovení parametrů budícího vinutí.

## 2.5 Výpočet budícího vinutí

Magnetické budící napětí je odměřeno v charakteristice naprázdno. Budící napětí rotoru je voleno přibližně do 600V, hodnota budícího napětí může být zvolena podle řady budících napětí, nebo individuálně. Proudová hustota budícího napětí může dosahovat až  $6\text{A/mm}^2$ .

$$\text{Předběžný průřez vodiče rotoru: } S_{\text{Cu}2} = \frac{2F_b I_s}{\gamma_{120} U_b}$$

Průřez vodiče volíme nejbližší vyšší podle vypočteného průřezu.

$$\text{Proud budícím vinutím } I_2 = J_{\text{Cu}2} S_{\text{Cu}2}$$

$$\text{Počet vodičů na pól: } z_p = \frac{F_b}{I_2}$$

Počet vodičů na drážku:

$$z_i = \frac{z_p}{n_{\text{dr}}}$$

Počet vodičů v drážce se může měnit, krajní drážky (1-2) mohou být méně hluboké než zbývající drážky, to je výhodné kvůli rozložení magnetického pole v rotoru.

## 2.6 Ztráty

Mechanické ztráty jsou tvořeny ztrátami v ložiskách, třením rotorového svazku o vzduch, ztrátami ventilací. Ve výpočtu uvažujeme jen ztráty třením o vzduch.

$$\text{Mechanické ztráty: } \Delta P_m = 0,9 v^{2,5} d_r \sqrt{I_r}$$

$$\text{Obvodová rychlost: } v = \pi d_r \frac{n}{60}$$

Ztráty v zubech statoru

Plechový svazek je tvořen elektrotechnickými plechy, které jsou legované křemíkem z důvodu snížení hysterezních ztrát.

Pro statory synchronních strojů jsou využívány většinou elektrotechnické plechy o tloušťce 0,5mm.

$$\text{Měrná hmotnost plechů: } \rho = 7600 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$\text{Plocha jedné drážky: } S_{ds} = h_d b_d$$

$$\text{Plocha zubů a drážek: } S_{zds} = \frac{\pi(D_1 + 2h_d)^2}{4} - \frac{\pi D_1^2}{4}$$

$$\text{Plocha zubů: } S_{zs} = S_{zds} - (S_{ds} Q_s)$$

$$\text{Objem zubů: } V_{zs} = S_{zs} l_e$$

$$\text{Hmotnost zubů: } G_{zs} = V_{zs} \rho$$

$$\text{Ztráty v železe statoru: } \Delta P_{Fes} = 2p_{1,0} G_{zs} B_z^2$$

$$\text{Plocha jha: } S_{js} = \frac{\pi D_2^2}{4} + \frac{\pi(D_1 + 2h_d)^2}{4}$$

$$\text{Objem jha: } V_{jzs} = S_{js} l_e$$

$$\text{Hmotnost jha: } G_{js} = V_{jzs} \rho$$

$$\text{Ztráty ve jhu statoru: } \Delta P_{Fej} = 1,4p_{1,0} G_{js} B_j^2$$

$$\text{Joelovy ztráty ve statoru: } \Delta P_{Cu1} = 3R'_{1/75} I_1^2$$

V rotoru

$$\text{Drážková část: } R_{20} = \rho_{20} \frac{2z_p l_r}{S_{Cu2}}$$

$$\text{Odpor při } 75^\circ\text{C: } R_{75} = 1,22R_{20}$$

$$\text{Ztráty v rotoru: } \Delta P_{Cu} = R_{75} I_{r1}^2$$

$$\text{Přídavné ztráty: } \Delta P_{př} = 0,003S[\text{kVA}]$$

$$\text{Celkové ztráty: } \sum \Delta P = \Delta P_m + \Delta P_{Fes} + \Delta P_{Fej} + \Delta P_{Cu1} + \Delta P_{Cu2} + \Delta P_{př}$$



$$\text{Účinnost stroje: } \eta = \frac{P}{P + \sum \Delta P} 100\%$$

## 2.7 Mechanické namáhání rotoru

Zub rotoru generátoru je vystavován vysokým otáčkám (3000 ot/min) a je namáhán ve svém nejužším místě, tedy na dně drážky. Vinutí je v drážce zajištěno mosazným klínem, zub je tedy namáhán vlastní odstředivou silou a odstředivou silou vinutí a klínu. Namáhání rotoru je počítáno pro vyšší otáčky (3600 ot/min.)

$$\text{Plocha klínu: } S_1 = \frac{b_{dr} + b_{d2}}{2} h_k \quad [\text{mm}^2]$$

$$\text{Plocha drážkové části: } S_2 = h_{dr} b_{dr} \quad [\text{mm}^2]$$

$$\text{Plocha hlavy zubu: } S_3 = \frac{z_{dr} + z_{d2}}{2} h_k \quad [\text{mm}^2]$$

$$\text{Plocha těla zubu: } S_4 = \frac{t_{d2} - b_{dr} + z_{d6}}{2} h_k \quad [\text{mm}^2]$$

Hustoty jednotlivých materiálů

$$\text{Meď: } \rho_{Cu} = 8930 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Bronz: } \rho_{Ms} = 8800 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Ocel: } \rho_{ocel} = 7800 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Pro další výpočet je nutné vypočítat objem klínu, drážkové části, hlavy zubu a těla zubu na délku 1 m, dále jejich hmotnost:

$$r_1 = \frac{d_r}{2} - \frac{h_k}{3} \cdot \frac{b_d + 2b_k}{b_d + b_k}$$

$$r_2 = \frac{d_r}{2} - h_k - \frac{h_{dr}}{2}$$

$$r_3 = \frac{d_r}{2} - \frac{h_k}{3} \cdot \frac{(t_{dr} - b_d) + 2 \left( \frac{\pi(d_r - 2h_k)}{36} - b_k \right)}{(t_{dr} - b_d) + \left( \frac{\pi(d_r - 2h_k)}{36} - b_k \right)}$$

$$r_4 = \frac{d_r}{2} - h_k - \frac{h_{dr}}{3} \cdot \frac{\left(\frac{\pi(d_r - 2h_k)}{36} - b_d\right) + 2\left(\frac{\pi(d_r - 2h_d)}{36} - b_d\right)}{\left(\frac{\pi(d_r - 2h_k)}{36} - b_d\right) - \left(\frac{\pi(d_r - 2h_d)}{36} - b_d\right)}$$

Hmotnost jednotlivých částí na 1m délky:

$$G_1 = \rho_{Br} \cdot S_1^{-6}$$

$$G_2 = \rho_{Cu} \cdot S_2$$

$$G_3 = \rho_{Ocel} \cdot S_3$$

$$G_4 = \rho_{Ocel} \cdot S_4$$

Odstředivé síly jsou vypočítány pro maximální otáčky 3600 ot/min.

$$F_1 = G_1 r_1 \left( \frac{\pi \cdot n_{max}}{30} \right)^2$$

$$F_2 = G_2 r_2 \left( \frac{\pi \cdot n_{max}}{30} \right)^2$$

$$F_3 = G_3 r_3 \left( \frac{\pi \cdot n_{max}}{30} \right)^2$$

$$F_4 = G_4 r_4 \left( \frac{\pi \cdot n_{max}}{30} \right)^2$$

$$\text{Celková odstředivá síla: } F_c = \sum_{i=1}^4 F_i$$

Mechanické namáhání zubu rotoru vyhoví, pokud je tahové napětí zubu menší než 300MPa pro chromoniklovou ocel.

$$\text{Tahové napětí: } \sigma_{iz} = \frac{F_c}{\frac{\pi(d_r - 2h_d)}{36} - b_d}$$

## 3 Konstrukční řešení synchronního stroje

### 3.1 Popis konstrukčních součástí

Konstrukční návrh synchronních strojů se zpravidla provádí po elektromagnetickém návrhu, kde jsou známé potřebné rozměry. V konstrukčním návrhu synchronního generátoru se využívá dlouholetých znalostí z konstrukčních návrhů synchronních strojů.

Konstrukční návrh synchronního generátoru v této diplomové práci je vytvořen s ohledem na konstrukční uspořádání podle IM7311

#### 3.1.1 Statorový svazek

Stator turboalternátoru je složen z ocelových plechů o tloušťce 0,5mm, legovaných křemíkem. Průměr statoru synchronních strojů je určen při elektromagnetickém návrhu, podle návrhu je počítáno  $D_1=0,81\text{m}$ . Přibližně do velikosti 1m vnějšího průměru svazku statoru je statorový plech celý vystřižen. V této diplomové práci není statorový plech vytvořen z jednoho kusu plechu, ale je složen ze  $n_s=4$  segmentů s přesahem  $k=3$ . Počet drážek ve statoru je volen  $Q_s=72$ . Při dlouhých osových délkách se do statoru přidávají chladicí kanály, pak se celý statorový svazek skládá z chladících kanálů a paketů, kde doporučená šířka paketu je 40 – 60 mm a ventilačních kanálů 10 mm (v práci je počítáno s šířkou paketu 50mm). Ventilační kanály jsou vyztuženy pomocí profilů. Uchytení statorového svazku pro statory s průměrem nad 1m je nejčastěji řešeno svorníky. Statorový svazek je složen z jednotlivých segmentů a vložen mezi magnetické stahovací kruhové desky s nemagnetickými palci, pomocí lisu je stator stažen a pak přivařen k pravítkům. Rozměry statorového svazku jsou v této diplomové práci: délka 1970mm, vnitřní průměr 810mm a vnější průměr 1620mm.

#### 3.1.2 Kostra statoru

Kostra statoru je pro velký výkon svařovaná. Je svařovaná ze železných plátů do tvaru skříňové konstrukce. Součástí svařované kostry jsou podélné trámce s pravítky, dále mezi žebry jsou vytvořeny chladicí kanály pro chlazení statorového svazku.

Statorový svazek je pomocí přivařených žeber připevněn do skříňové konstrukce. Skříň je pomocí patek připevněna k podestě.

Hřídel synchronního generátoru je upevněn do ložiskových stojanů, které leží mimo kostru. Otvory pro nasávání chladného a vypouštění teplého vzduchu jsou umístěné na dně kostry.

### **3.1.3 Rotor**

Rotor v této je uvažován jako hladký rotor, který je vysoustružen spolu s hřídelem v jeden celek, v hřídeli jsou vysoustruženy drážky pro budící vinutí. Průměr rotoru je 756mm. Součástí rotoru jsou vytvořené drážky s chladícím kanálem, který je umístěn pod drážkou, vše o celkové hloubce 105mm. Krajiní drážky jsou mělčí než ostatní drážky, délka krajiních drážek je 78mm.

### **3.1.4 Hřídel**

Jde o nejvíce namáhanou část v turboalternátoru, spolu s rotorem tvoří jeden celek, rotor je součástí hřídele. Hřídel turboalternátoru je dimenzován pro otáčky 3000 ot./min. a maximální otáčky 3600 ot./min. Pro velké osové délky se používají především pružné hřídele vyrobené z kvalitní chromniklové oceli. Tyto hřídele jsou vyrobeny z celistvého kusu oceli, dříve se objevovaly skládané hřídele. V této práci je použita hřídel o průměru 380mm.

### **3.1.5 Vinutí**

#### **3.1.5.1 Statorové vinutí**

Třífázové statorové vinutí je uloženo v drážkách statoru, je provedeno stejně jako u asynchronních strojů. V drážkách je uloženo dvojvrstvé vlnové vinutí křížené. Vinutí je provedeno pomocí tyčí, jde o tzv. tyčové vinutí. Které je kvůli zlepšení elektrických vlastností vhodně zkrouceno, toto vinutí nazýváme Roebelovou permutovanou tyčí. V této diplomové práci je uvažováno vinutí o rozměrech permutované tyče 18x40mm, které je složeno z 28 menších vodičů o rozměrech 6,9x2,4mm.

### 3.1.5.2 Rotorové vinutí

Je použito jednovrstvé koncentrické vinutí uložené v rotorových drážkách. V první drážce od širokého zubu je vytvořena mělká drážka, do které je vloženo 16 závitů o rozměrech 25,4x3,4mm, které tvoří cívku o rozměrech 25,4x54,4mm a do zbývajících drážek je vloženo vinutí po 24 závitěch o rozměrech 25,4 x 81,6mm

Rotorové vinutí je v čelech staženo stahovacím kruhem.

## 3.2 Chlazení synchronního generátoru

V dnešní době jsou synchronní stroje chlazeny vzduchem vodou a vodíkem. Jednotlivá chladicí média se používají podle výkonu stroje.

Stroje do výkonu cca 200MW jsou chlazeny pouze vzduchem. Výhoda toho způsobu chlazení je v jednoduchosti aplikace není potřeba složitých zařízení pro úpravu chladicího vzduchu (jen ventilátory, potrubí, výměníky, apod.)

Stroje do výkonu přibližně 1000MW jsou chlazeny vodíkem v rotoru a demineralizovanou vodou ve statoru. Chlazení vodíkem je složitější o vodíkové hospodářství a problém je i v jeho výbušnosti při smíchání se vzduchem. To přináší složitější manipulace při údržbě stroje. Výhoda vodíku spočívá ve 14x větší tepelné kapacitě oproti vzduchu a je oproti vzduchu řidší a tím dochází ke snížením ztrát třením. Chlazení statoru demineralizovanou vodou se využívá její vysoká tepelná kapacita. Stator stroje musí být pro použití demineralizované vody uzpůsoben, voda protéká dutými vodiči vinutí.

Stroj nad 1000MW je chlazen demineralizovanou vodou v rotoru i ve statoru. Voda je přiváděna do rotoru do dutých vodičů vinutí. Stator je sejný jako při použití vodíkového chlazení.

### **3.2.1 Chlazení konstruovaného stroje**

Chlazení synchronního stroje je navrženo podle IC(A)91W, kde ohřátý vzduch vychází z turbogenerátoru ven a zpět je do stroje vháněn ochlazený vzduch přes výměník tepla. V tepelném výměníku předává teplý vzduch (A) své teplo chladicí vodě (W). Výměník tepla je umístěn pod kostrou stroje. Vzduch je do stroje vháněn ventilátory umístěnými na rotoru stroje

#### **3.2.1.1 Chlazení statoru**

Jako chladicí systém generátoru je použit komorový chladicí systém. Prostor v kostře nad statorovým svazkem je rozdělen na lichý počet komor a to na komory přetlakové a komory podtlakové. Přetlakové komory jsou propojeny soustavou trubek.

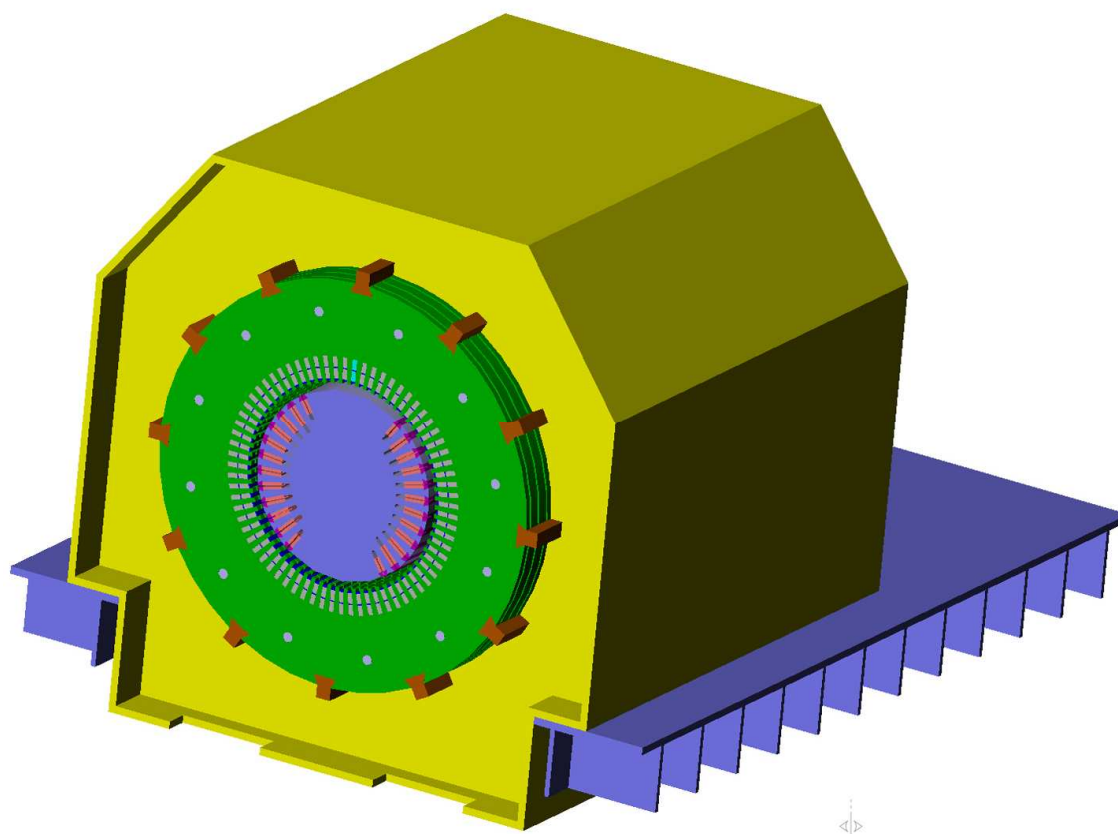
#### **3.2.1.2 Chlazení rotoru**

Rotor turboalternátoru je ochlazován vzduchem, který proudí skrze kanály vysoustružené v rotoru a vysoustruženým kanálem vytvořeným ve vodiči a klínu.

## **3.3 Konstrukční řešení turbogenerátoru v CAD**

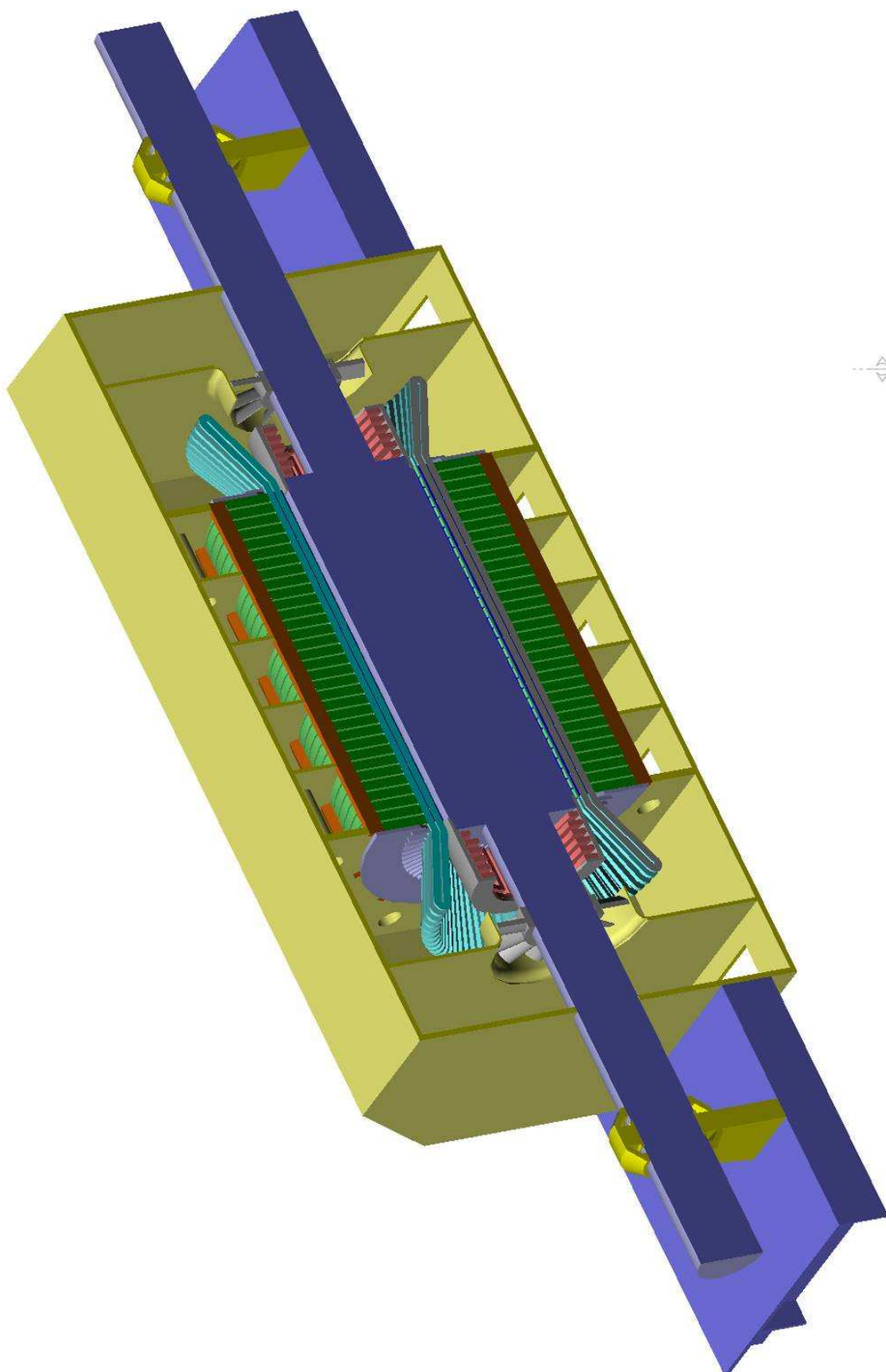
Turbogenerátor byl nakreslen v konstrukčním 3D programu SolidWorks. Jednotlivé řešení součástí je vytvořené podle předešlých odstavců této kapitoly.

Rozměrový výkres turbogenerátoru je přiložen v příloze

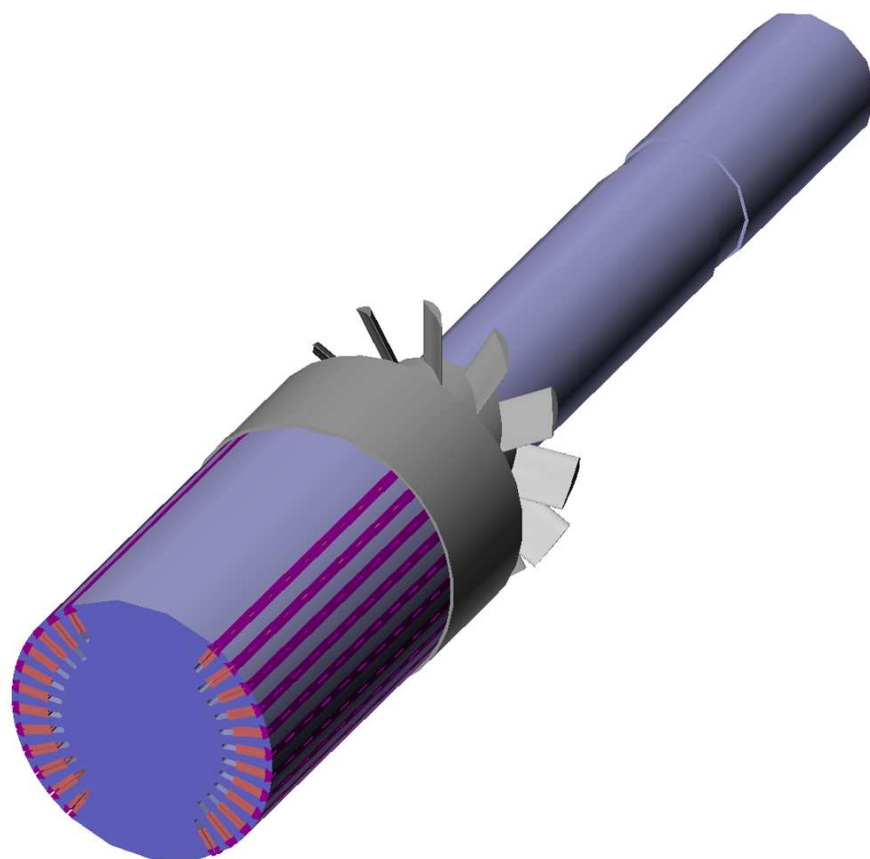


Obr 2. Příčný řez turbogenerátoru

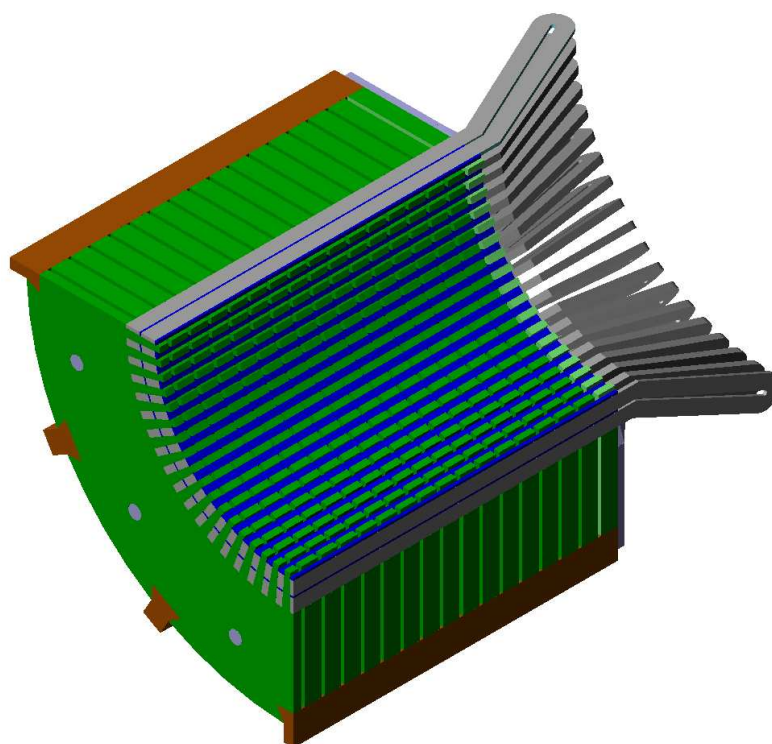




Obr 3. Podélný řez turbogenerátoru



Obr.4 Příčný řez rotoru



Obr. 5 Řez statorovým svazkem

## 4 Modelování synchronního generátoru

Synchronní generátor byl nakreslen v 3D konstrukčním software Solid Works a posléze nasimulován v software Ansys.

### 4.1 Modální analýza

Modální analýza je podoblast dynamiky. Pomocí této metody získáváme matematický popis mechanické soustavy. Problematika mechanického chvění a nadměrného hluku je spojena vlastnostmi samostatného systému. Vlastnosti mechanické soustavy se vyhodnocují v rámci modální analýzy.

K výstupům modální analýzy patří:

frekvence soustavy

tlumení tvary kmitů

Využití modální analýzy:

Při určení vlastních frekvencí lze určit při jakých frekvencích dochází k nepříznivým stavům mechanického systému. Došlo by k rezonanci a mechanický systém by byl vystaven k několikanásobnému zkrácení životnosti, nespolehlivosti a poškození.

Díky této analýze lze zjistit místa , která jsou vystavená velkému mechanickému namáhání. Tato místa lze následně upravit například přidáním dalších prvků, nebo vlastností.

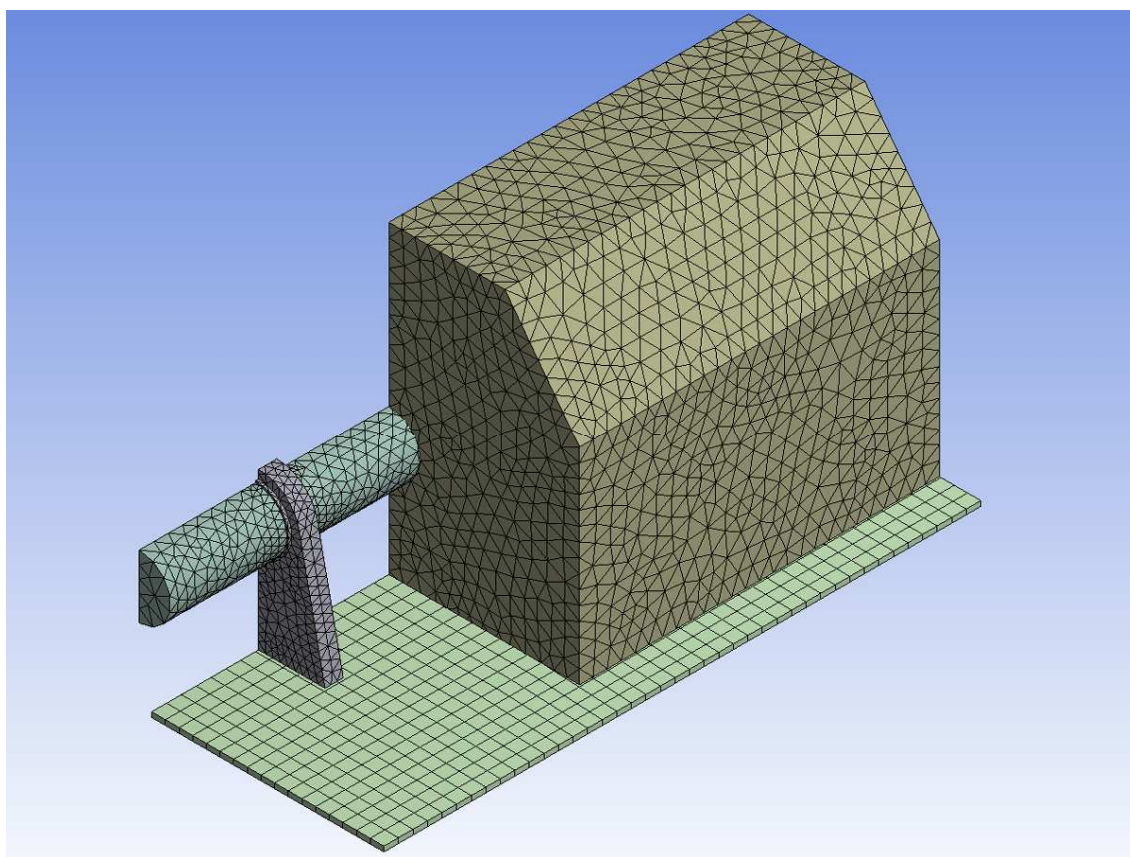
### 4.2 Simulace

V konstrukčním programu SolidWorks byl model nakreslen ve dvou provedeních. Ve zjednodušené verzi byl model zatěžován v programu Ansys a ve druhé složitější verzi byl nakreslen jeho konstrukční návrh. V programu Ansys byl model posléze tzv. nasíťován a zatížen. Pro simulaci byla zvolena modální analýza.

Model byl oproti konstrukčnímu návrhu zjednodušen o vyjmutí bronzových čel statorového svazku, odstranění kanálů ve vinutí rotoru stroje. Dále došlo ke zjednodušení ventilátoru, ložiskových stojanů a podesty.

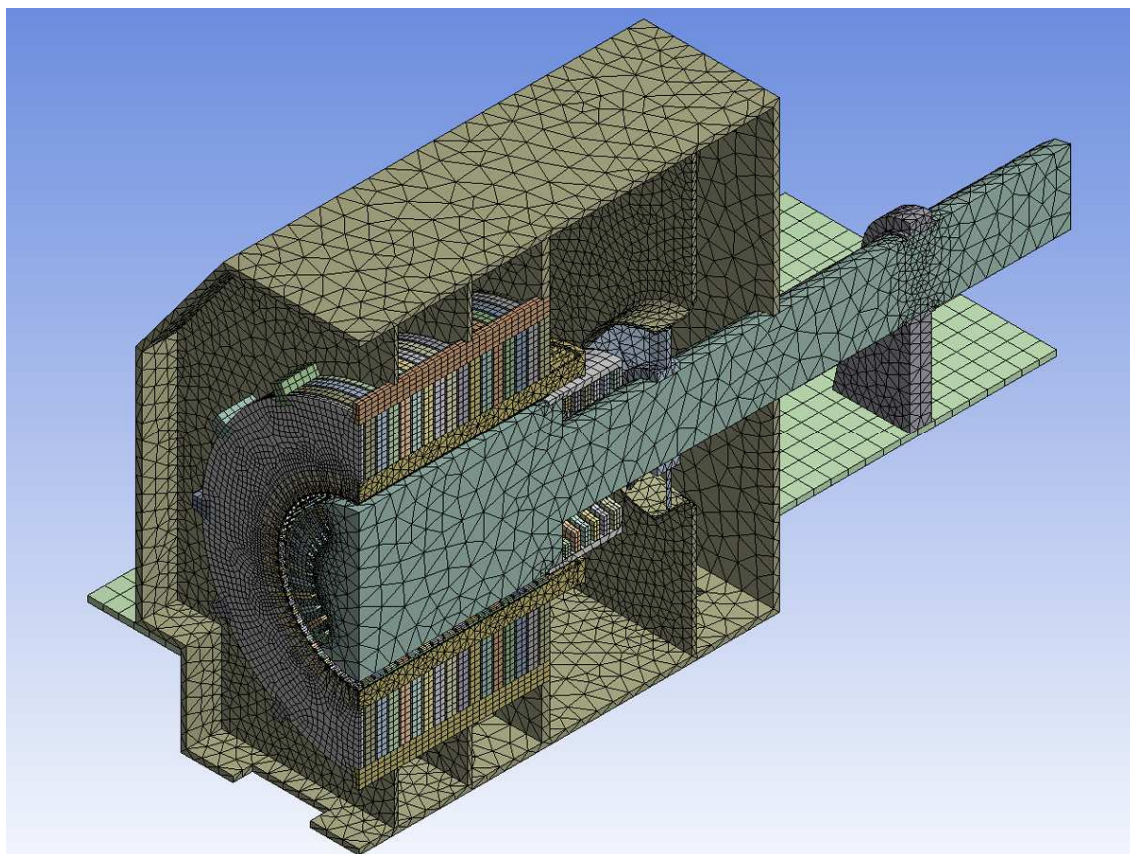
Na obrázcích jsou vytvořeny pohledy na zatěžovaný model, modelována byla 1/4 modelu a to kvůli souměrnosti modelu a zjednodušení simulace. Posléze byla pro model vytvořena síť pro výpočet a nastaveny okrajové podmínky.

Jako okrajová podmínka byla v modelu zvolena fixace podesty stroje. Jednotlivé kontaktní plochy jednotlivých dílů sestavy byly nastaveny tak, aby nepovolovaly vzájemné pohyby. Kontaktní plocha mezi rotorem a kostrou stroje byla nastavena tak, aby umožňovala pohyb bez tření.

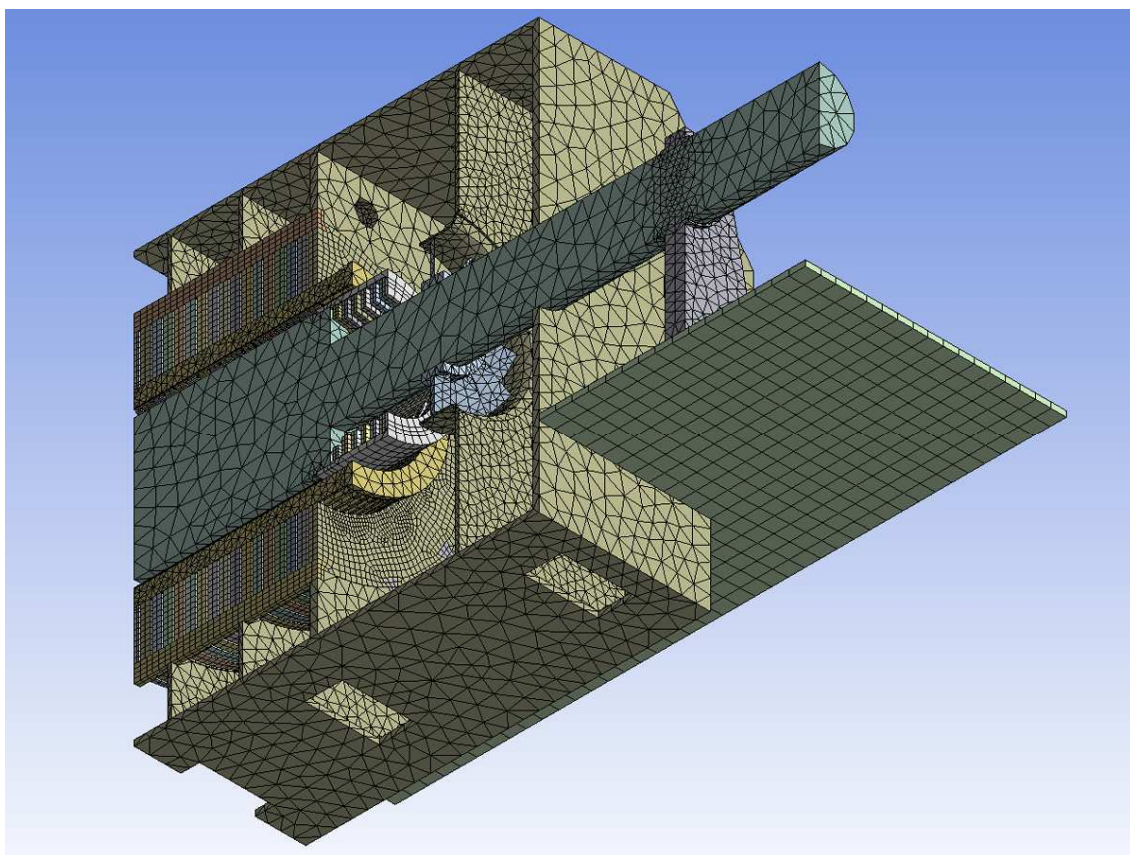


Obr. 6 Vnější pohled nasítovaného modelu





Obr. 7 Nameshovaný model (pohled na stator rotor)



Obr. 8 Nameshovaný model (prostor čela vinutí)

### 4.3 Výstup ze simulace zatěžovaného modelu

Výstupem simulačního software Ansys jsou vygenerovány budící frekvence při kterých dochází k deformacím stroje.

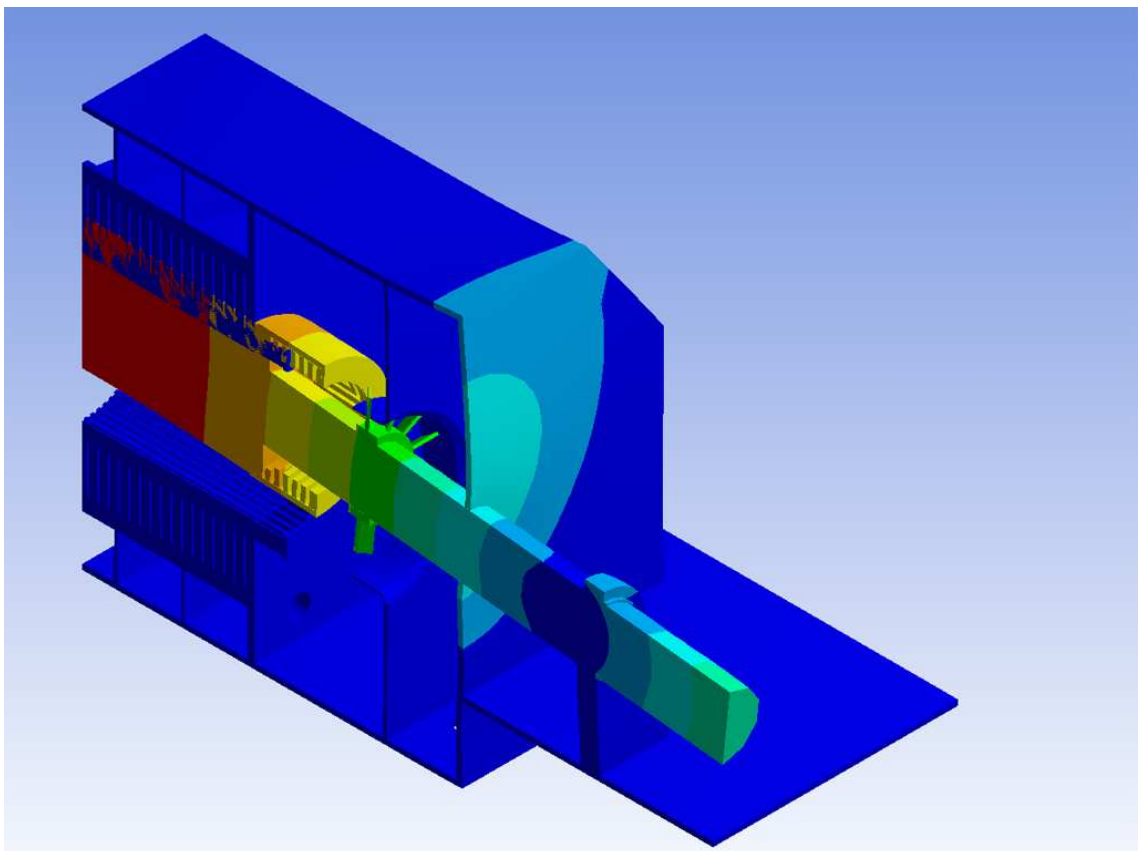
Při frekvenci 100,38Hz (obr. 9) se vyskytují deformace v prostoru rotoru a v přední části kostry při pohybu rotoru.

Při frekvenci 14,09Hz (obr. 10) dochází k deformaci jen v oblasti ventilátoru, tloušťka materiálu je v této oblasti 20mm.

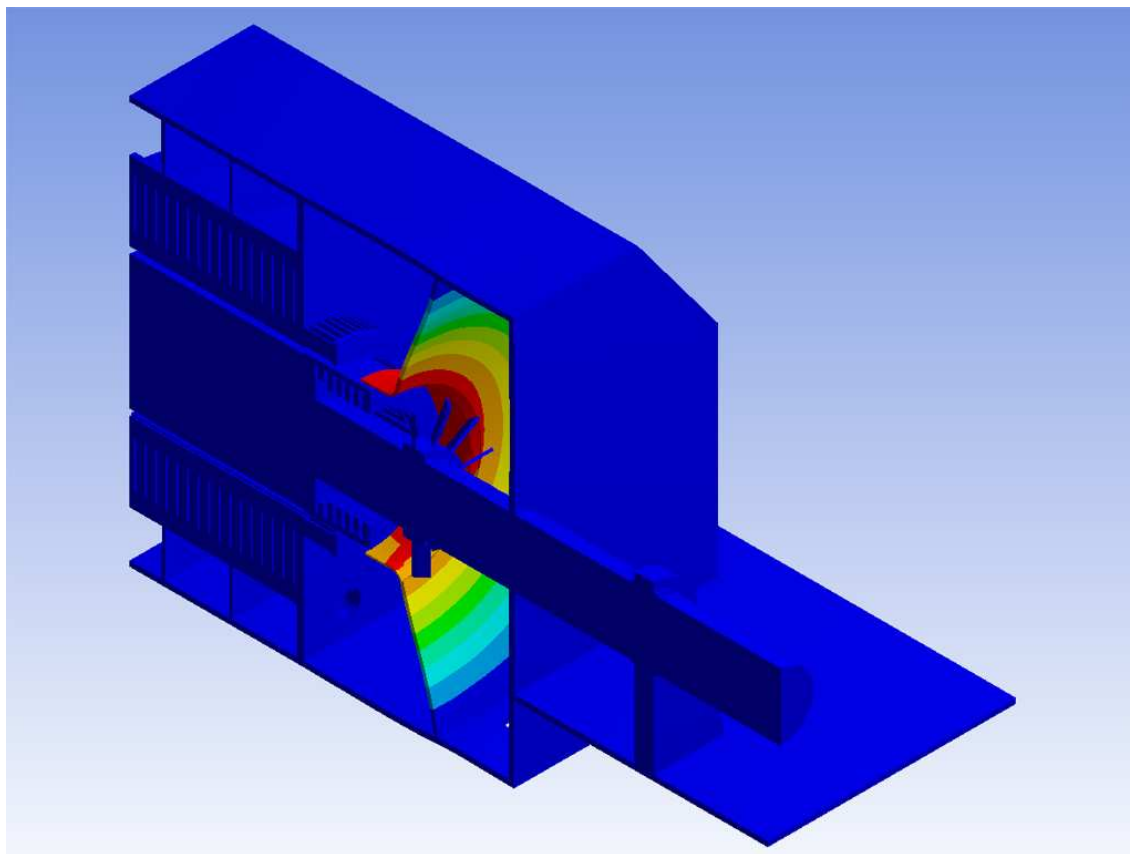
Při frekvenci 274,38Hz (obr. 11) dochází k deformaci přední části kostry, která má tloušťku 30mm.

Při frekvenci 408,29Hz (obr. 12) dochází k deformaci na konci hřídele a k malé deformaci v oblasti ventilátoru

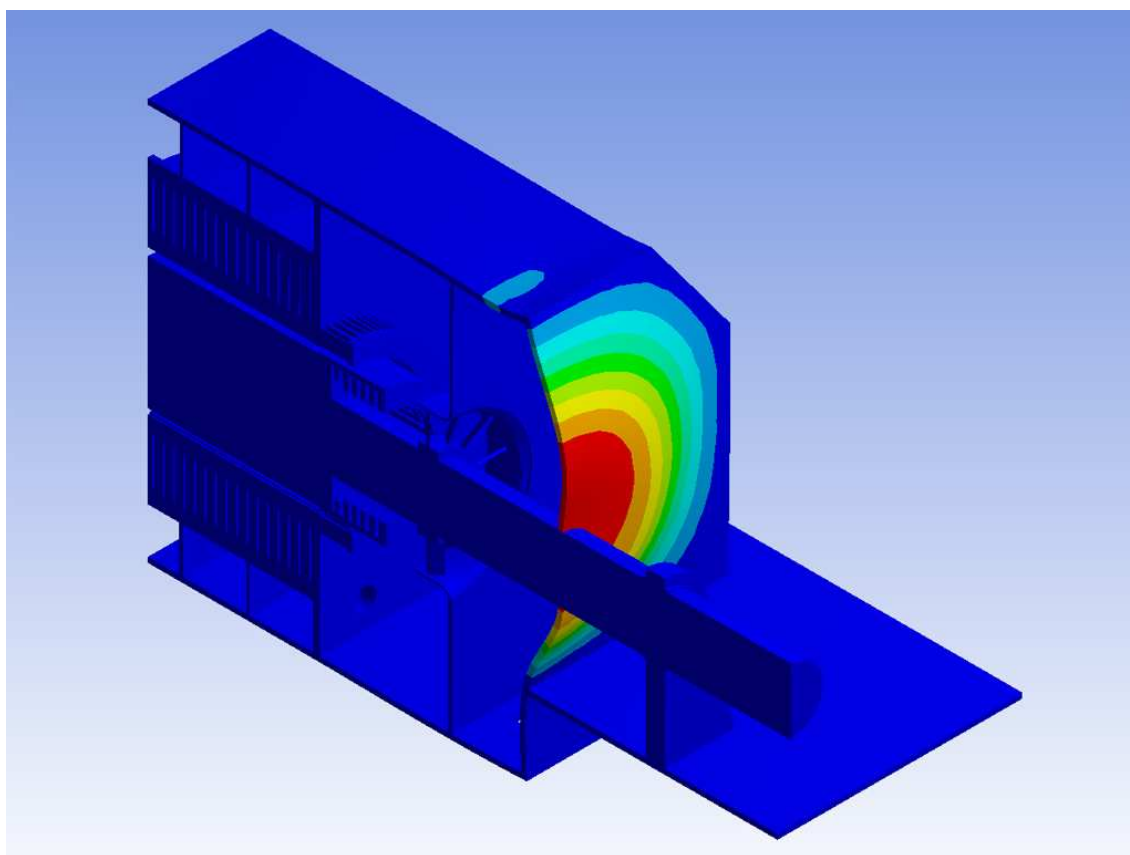
Při frekvenci 498,2Hz (obr. 13) dochází k deformaci v celé kostře, která je přenášena do statorového svazku.



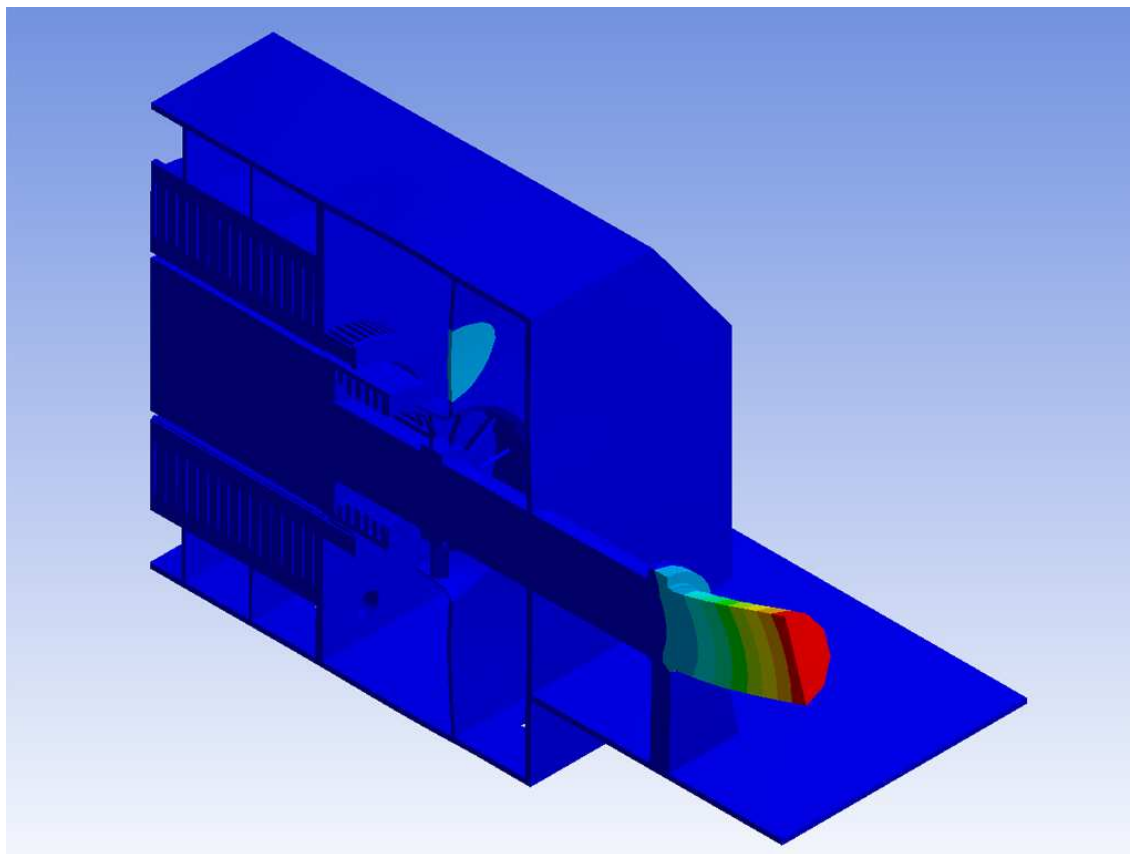
Obr. 9 frekvence 100,38Hz



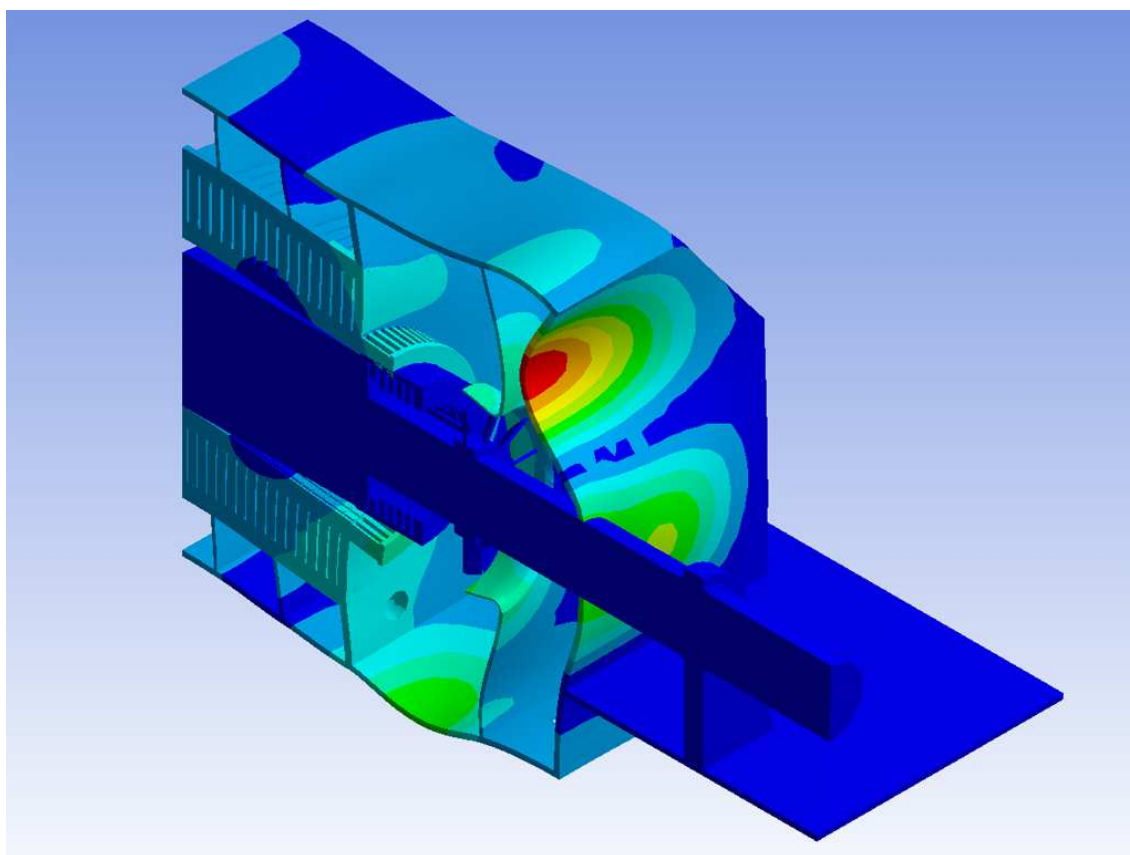
Obr. 10 frekvence 100,38Hz



Obr. 11 Frekvence 274,38Hz



Obr. 12 frekvence 408,29Hz



Obr. 13 frekvence 498,2Hz



## 5 Porovnání výpočtu

Porovnání výpočtu s dokumentací ČKD. V následující tabulce jsou zobrazeny hodnoty vypočtené v této DP a hodnoty z ČKD.

Porovnávaná veličina	Vypočtené hodnoty	
zdánlivý výkon [MVA]	30	30
U [kV]	6,3	6,3
n [ot/min]	3000	3000
cosφi	0,8	0,8
proudové využití:[kA/m]	77,8	73,27
indukce:[T]	0,89	0,905
vnitřní průměr statoru:[m]	0,81	0,86
délka statoru:[m]	1,98	1,85
délka rotoru:[m]	2,1	1,98
vnější průměr statoru:[m]	1,63	1,75
šířka paketu:[mm]	50	43,1
počet paketů:	33	34
šířka kanálu:[mm]	10	10
rozměr statorové drážky:[mm]	18,5x108	16x100
počet drážek:	72	72
počet paralelních větví:	2	2
počet zavítů v sérii:	12	12
rozměr vodiče - holá měď	6,5x2	2x5
proudová hustota ve vodiči statoru	3,96	3,986
Počet vodičů v tyči - Roebel	28	36
indukce v zubu:[T]	1,93	2,022
délka statorového vinutí (1/2):[m]	3,96	4,5
vzduchová mezera:[mm]	27	30
magnetický tok: [Wb]	1,48	1,479
průměr rotoru: [m]	0,756	0,8
dělení drážek rotoru:	36	38
počet využitých drážek:	24	28
šířka rotorové drážky: [mm]	28	27,3
hloubka rotorové drážky:[mm]	78+105	82 a 117
délka vinutí rotoru:[m]	5,8	6
napětí budící soupravy pro jmenovitou zátěž: [V]	256	205
proudová hustota pro rotorové vinutí: [A/mm <sup>2</sup> ]	5,5	4,726

proud budícím vinutím: [A/m]	476	470
počet závitů (polovina rotoru):	136	152
počet vodičů v drážce:	24+16	24 a 16
$\Delta P_m$ [kW]	134,3	128
$\Delta p_{Fez}$ [kW]	26,3	94
$\Delta p_{Fej}$ [kW]	89,3	
$\Delta P_{Cu1}$ [kW]	70,3	236
$\Delta P_{Cu2}$ [kW]	50,7	
$\Delta P_{prid}$ [kW]	90	
$\Delta P$ [kW]	461	458

Tabulka 2 porovnání hodnot s dokumentací ČKD

Při porovnání hodnot vypočítaného elektromagnetického návrhu v této práci a údajů od firmy ČKD lze upozorovat větší rozdíly a i shodující se hodnoty jednotlivých veličin:

V hlavních rozměrových veličinách je této práci navržen stroj s menším průměrem a větší délkou. Ve statorovém svazku je použit o jeden paket méně.

Proudové využití je použito větší (77,8kA/m), zvolená hodnota indukce byla podobná, magnetický tok vyšel také podobně.

Statorová drážka je v této práci navržena širší (18,5mm), v permutované tyči je použit vodič s větším průřezem, ale s menším počtem vodičů (28). Proudová hustota ve statorovém vinutí vyšla podobná.

Počet drážek statorového vinutí (72) vyšel stejný počet jako u stroje z ČKD, u rotorového vinutí je použito méně drážek (24), hloubka rotorové drážky je menší (105mm), je použit stejný počet vodičů v drážkách (16 a 24), proudová hustota je větší (5,53). Délka vzduchové mezery vyšla menší (27mm) než u ČKD, což mělo za následek snížení budícího proudu počtu závitů rotorového vinutí (136z).

Ztráty u vypočteného stroje vyšly podobně jako u stroje v ČKD, mimo ztrát v železe a jhu, které vyšly větší (115,6kW).

## 6 Závěr

Hlavním úkolem této diplomové práce je elektromagnetický návrh synchronního generátoru podle zadaných parametrů. Obsahem elektromagnetického návrhu generátoru je určení základních rozměrů částí stroje, určení rotorového a statorového vinutí, dimenzování magnetického obvodu, ztráty, účinnost, která vyšla 98,1% a v závěru výpočtu namáhání zubu rotoru.

V této diplomové práci není navržený stroj ideální, jelikož elektromagnetický návrh je zjednodušen. V dnešní době je pro kvalitní elektromagnetický výpočet použit příslušný software, který je založen na metodě konečných prvků. Elektromagnetický návrh synchronního stroje, by se dal dále optimalizovat a to především použitím tohoto software. Při porovnání vypočtených hodnot s hodnotami stroje vypočtených v ČKD je u některých veličin zjištěna dobrá shoda.

Druhým bodem zadání byl 3D konstrukční návrh synchronního generátoru. Stroj byl nakreslen podle vypočtených rozměrů při elektromagnetickém návrhu a podle zadání chlazení stroje IC91W a konstrukčního uspořádání IM7311. Další konstrukční uspořádání stroje bylo nakresleno podle strojů podobného výkonu.

V dalším bodu zadání byla provedena modální analýza ve které byl zjednodušený 3D model nasimulován.

Použitá literatura

- [1] Bartoš, V.: Teorie elektrických strojů, Plzeň 2006
- [2] Bartoš, V.: Elektrické stroje I,II, Plzeň 1986
- [3] Červený, J.: Studijní texty k předmětu SES1,2
- [4] Kolář, J.: Diplomová práce, Plzeň 2009
- [5] Badura, V.: Diplomová práce, Plzeň 2005
- [6] Holoubek, M.: Diplomová práce, Plzeň 2005
- [7] Jaroš, M.: Diplomová práce, Plzeň
- [8] List, V., Hak, J.: Elektrotechnika II, elektrické stroje, část 1, Praha 1969

## Příloha

### Zadání výpočtu:

Zdánlivý výkon:  $S_n = 30000 \text{ kVA}$

Sdružené napětí:  $S = 6300 \text{ V}$

jmenovité otáčky:  $n = 3000 \text{ ot/min}$

počet fází:  $m = 3$

účinník:  $\cos\varphi = 0,8$

### Výpočet základních parametrů

$$\text{zdánlivý jmenovitý výkon: } S_i = 30000 \text{ kVA} \quad (1.1)$$

$$\text{činný výkon stroje: } P_i = S_i \cdot \cos\varphi = 30000 \cdot 0,8 = 24000 \text{ kW} \quad (1.2)$$

$$\text{napětí v jedné fázi: } U_f = \frac{U_s}{\sqrt{3}} = \frac{6300}{\sqrt{3}} = 3637 \text{ V} \quad (1.3)$$

$$\text{proud v jedné fázi: } I_1 = \frac{S}{\sqrt{3}U_s} = \frac{30000}{\sqrt{3} \cdot 6300} = 2749 \text{ A} \quad (1.4)$$

$$\text{mezipólová rozteč: } t_p = \frac{\pi D_i}{2p} = \frac{\pi \cdot 0,81}{2} = 1,272 \text{ m} \quad (1.5)$$

Drážková rozteč zvolena:  $t_{dl} = 35,5 \text{ mm}$

$$\text{počet drážek: } Q = \frac{\pi D_i}{t_{dl}} = \frac{\pi \cdot 0,81}{0,0355} = 72 \quad (1.6)$$

$$\text{počet drážek na fázi: } Q_f = \frac{Q}{m} = \frac{72}{3} = 24 \quad (1.7)$$

$$\text{počet drážek na pól: } Q_p = \frac{Q}{2} = \frac{72}{2} = 36 \quad (1.8)$$

$$\text{počet drážek na pól a fázi: } q = \frac{Q}{2 \cdot 3} = \frac{72}{2 \cdot 3} = 12 \quad (1.8)$$

překladové číslo:  $k = 3$

počet segmentů:  $n_s = 4$

počet srážek na překlad:  $Q_{pr} = 6$

$$\text{počet závitů jedné fáze v sérii: } N_s = \frac{\pi D_i A}{2mI_1} = \frac{\pi \cdot 0,81 \cdot 81500}{2 \cdot 3 \cdot 2749} = 12,6z \quad (1.9)$$

Lineární proudová hustota byla určena pomocí monogramu:  $A = 81500 \frac{A}{m}$

$$\text{počet vodičů v drážce: } n_d = \frac{a_s N_s}{pq} = \frac{2 \cdot 12,6}{12} = 2,1 \doteq 2 \quad (1.10)$$

$$\text{přepočtené závity: } N_s = \frac{n_d pq}{a_s} = \frac{2 \cdot 1 \cdot 12}{2} = 12z \quad (1.11)$$

skutečná hodnota proudové hustoty:

$$A = \frac{2mI_1 N_s}{\pi D_i} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 2749 \cdot 12}{\pi \cdot 0,81} = 77781 \frac{A}{m} \quad (1.12)$$

Essonův činitel využití:

$$C = \frac{\pi^2}{60 \cdot \sqrt{2}} AB_\delta k_{v1} = \frac{\pi^2}{60 \cdot \sqrt{2}} \cdot 77,781 \cdot 0,89 \cdot 0,923 = 7,43 \frac{kVA}{m^3 \frac{ot}{min}} \quad (1.13)$$

$$\text{Délka stroje: } l_e = \frac{S[kVA]}{C \cdot D_1^2 \cdot n} = \frac{30000}{7,87 \cdot 0,86^2 \cdot 3000} = 2,05 \text{ m} \quad (1.14)$$

upraveno podle doporučení ČKD jsem snížil délku induktu na hodnotu 1,65m.

## Parametry vinutí

$$\text{cívkový krok: } y_{1d} = \beta \cdot Q_p = 0,8\bar{3} \cdot 36 = 30 \quad (2.1)$$

Pro vinutí induktu stroje volím křížové vlnové vinutí:

$$\text{krok na komutátoru: } y_k = \frac{\varepsilon K \pm a_{ss}}{p} = \frac{72 + 1}{1} = 73 \quad (2.2)$$

$$\text{přední cívkový krok: } y_1 = 2uy_{1d} + 1 = 2 \cdot 1 \cdot 30 + 1 = 61 \quad (2.3)$$

$$\text{zadní cívkový krok: } y_1 = 2y_k - y_{1d} = 144 - 59 = 85 \quad (2.4)$$

$$\text{počet skupin vinutí: } a_{ss} \cdot m' = 1 \cdot 6 = 6 \quad (2.5)$$

$$\text{počet skupin v jedné fázi: } \frac{a_{ss} \cdot m'}{m} = \frac{1 \cdot 6}{3} = 2 \quad (2.6)$$

$$\text{počet cívek ve skupině: } \frac{Q}{a_{ss} \cdot m'} = \frac{72}{1 \cdot 6} = 12 \quad (2.7)$$

činitel v-té harmonické:

$$k_{v1} = \sin\left(v \cdot \beta \cdot \frac{\pi}{2}\right) \cdot \frac{\sin v \cdot \frac{\pi}{m'}}{n \cdot \sin v \cdot \frac{\pi}{m' \cdot n}} = \sin\left(1 \cdot 0,83 \cdot \frac{\pi}{2}\right) \frac{\sin \frac{\pi}{6}}{12 \cdot \sin \frac{\pi}{6 \cdot 12}} = 0,923 \quad (2.8)$$

$$k_{v5} = 0,05$$

$$k_{v7} = -0,036$$

$$\text{počet paketů statorového svazku: } i = \frac{l_e}{\check{s}_p} = \frac{1650}{50} = 33 \quad (2.9)$$

$$\text{celková délka stroje: } L = l_e + (i - 1) \cdot \check{s}_K = 1,65 + (33 - 1) \cdot 0,01 = 1,97 \text{ m} \quad (2.10)$$

indukce v zubu (volím do) –  $B'_z = 1,93 \text{ T}$

$$\text{šířka zubu: } z_1 = \frac{B_\delta \cdot t_{d1}}{B'_{z1} \cdot k_{Fe}} = \frac{0,89 \cdot 0,0353}{1,93 \cdot 0,97} = 0,0168 \text{ m} \quad (2.11)$$

$$\text{šířka drážky: } b_d = t_{d1} - z_1 = 0,0353 - 0,0168 = 0,0185 \text{ m} \quad (2.12)$$

Šířku vodiče volíme odečtením uvažované izolace z šířky drážky v tomto případě  $b'_v = 13 \text{ mm}$

$$\sigma_{Cu} = \sqrt{\frac{K}{b'_v}} = \sqrt{\frac{190}{13}} = 3,82 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2} \quad (2.13)$$

Hodnota konstanty K nabývá podle tabulky pro napětí 6,3kV hodnoty 190.

$$\text{Průřez vodiče: } S_{Cu} = \frac{I_1}{a \cdot \sigma_{Cu}} = \frac{2749}{2 \cdot 3,82} = 359,8 \text{ mm}^2 \quad (2.14)$$

Výška vodiče  $h_v$  při jeho šířce  $b'_v$ , jak vychází z bilance drážky na šířku:

$$\text{Výška vodiče } h_v \text{ je určena při jeho šířce: } h_v = \frac{S_{Cul}}{b'_v} = \frac{359,8}{13} = 27,7 \text{ mm} \quad (2.15)$$

$$\text{Počet vodičů: } i = \frac{S'_{Cul}}{j \cdot S_1} = \frac{359,8}{2 \cdot 12,4} = 14,5 \doteq 14 \quad (2.16)$$

$$\text{Výsledný průřez vinutí je: } S_{Cu} = i \cdot j \cdot S_1 = 14 \cdot 2 \cdot 12,4 = 347,2 \text{ mm}^2 \quad (2.17)$$

$$\text{Skutečná proudová hustota: } \sigma_{Cul} = \frac{I_1}{a_{st} S_{Cul}} = \frac{2749}{2 \cdot 347,2} = 3,96 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2} \quad (2.18)$$





## Konstrukční parametry vinutí

$$\text{celková délka cívky: } c = 4 + \frac{U[\text{kV}]}{2} = 4 + \frac{6,3}{2} = 7,15\text{mm} \quad (2.19)$$

$$b_{\xi} = b_d = 18,5\text{mm}$$

$$\sin\alpha_{\xi} = \frac{b_{\xi} + c}{t_{dl}} = \frac{18,5 + 7,15}{35,5} = 0,73 \quad (2.20)$$

$$\text{úhel sklonu čela (40 - 45°): } \alpha_{\xi} = \arcsin 0,73 = 46,89^{\circ}$$

$$y = \frac{\beta t_p}{2} \cdot \text{tg}\alpha_{\xi} = \frac{0,833 \cdot 1,272}{2} \cdot \text{tg}46,89^{\circ} = 0,57\text{m} \quad (2.21)$$

$$R = \frac{h_2}{2} + r = \frac{0,087}{2} + 0,01 = 0,054\text{m} \quad (2.22)$$

$$h_2 = 0,087\text{m}$$

Rozměry čela cívky volím: poloměr , výběh z drážky  $v = 130\text{mm}$

Vyložení čel:

$$E = v + y + R = 0,06 + 0,566 + 0,054 = 0,68\text{m} \quad (2.23)$$

$$\cos\alpha_{\xi} = \frac{\beta \cdot t_p}{2x} \Rightarrow x = \frac{\beta \cdot t_p}{2 \cdot \cos\alpha_{\xi}} = \frac{0,833 \cdot 1,272}{2 \cdot \cos 46,89^{\circ}} = 0,775\text{m} \quad (2.24)$$

$$o = \frac{\pi \cdot R}{2} = \frac{\pi \cdot 0,054}{2} = 0,085\text{m} \quad (2.25)$$

$$\text{Délka čela: } l_{\xi} = 2(x + o + v) = 2(0,799 + 0,085 + 0,06) = 1,84\text{m} \quad (2.26)$$

$$\text{Celková délka cívky: } l_v = (L + l_{\xi}) = (1,97 + 1,84) = 3,81\text{m} \quad (2.27)$$

$$R'_{1/20} = \rho_{\text{Cu}} \frac{2 \cdot l_v \cdot N_s}{a_{\text{st}} \cdot S_{\text{Cu1}}} = \frac{1}{56} \frac{2 \cdot 3,81 \cdot 12}{2 \cdot 347,2} = 0,00235 \Omega \quad (2.28)$$

kde  $\rho_{\text{Cu}}$  je měrný odpor měděného vodiče při teplotě 20 °C  $\left[ \Omega \frac{\text{m}}{\text{mm}^2} \right]$

### Odpor při střídavém proudu při 20 °C:

Vliv skin efektu

Náhradní výška vodiče:

$$\xi = 2h_v \pi \sqrt{\frac{j b_v f}{b_d \rho}} \cdot 10^{-7} = 2 \cdot \pi \cdot 2 \sqrt{\frac{2 \cdot 6,5 \cdot 50}{18,5 \cdot \frac{1}{56}} \cdot 10^{-7}} = 0,176 \quad (2.29)$$

Činitel zvýšení elektrického odporu:

$$k_{\text{Cu}} = \frac{g^2 - 0,2}{9} \xi^4 = \frac{28^2 - 0,2}{9} 0,176^4 = 0,084 \quad (2.30)$$

$$g = i \cdot n_d = 18 \cdot 2 = 28 \quad (2.31)$$

$$R_{1/20} = (1 + k_{\text{Cu}}) \cdot R'_{1/20} = (1 + 0,084) \cdot 0,00235 = 0,00255 \Omega \quad (2.32)$$

$$\text{Odpor při } 75 \text{ }^\circ\text{C: } R_{1/75} = 1,22 \cdot R_{1/20} = 1,22 \cdot 0,00255 = 0,0031 \Omega \quad (2.33)$$

procentní hodnota úbytku napětí na ohmickém odporu:

$$u_R = \frac{R_{1/75} \cdot I_1}{U_f} \cdot 100\% = \frac{0,0031 \cdot 2749}{3637} \cdot 100\% = 0,23\% \quad (2.34)$$

Rozptylová reaktance:

$$\begin{aligned} X_\sigma &= \frac{(4\pi)^2 f N_s^2 l_e}{pq} \left[ \left( \frac{h'_2}{3b_d} + \frac{h'_1}{b_d} \right) + \frac{1}{l_e} q \left( 0,187 + 0,166 \frac{t_p}{l_e} \beta \right) + \ln \left( 1 + \frac{\pi \cdot z_1}{2b_d} \right) \right] \cdot 10^{-7} = \\ &= \frac{(4\pi)^2 50 \cdot 12^2 1,65}{pq} \left[ \left( \frac{80,6}{3 \cdot 18,5} + \frac{19,6}{18,5} \right) + \frac{1,84}{1,65} \cdot 12 \cdot \left( 0,187 + 0,166 \frac{1,272}{1,84} 0,833 \right) + \right. \\ &\left. + \ln \left( 1 + \frac{\pi \cdot 16,2}{2 \cdot 18,5} \right) \right] \cdot 10^{-7} = 0,112 \Omega \end{aligned} \quad (2.35)$$

Procentní hodnota úbytku napětí na rozptylové reaktanci:

$$u_{\sigma} = \frac{X_{\sigma} \cdot I_1}{U_f} \cdot 100\% = \frac{0,112 \cdot 3208}{3637} \cdot 100\% = 8,47\% \quad (2.36)$$

Procentní hodnota rozptylové reaktance

$$x_{\sigma} = u_{\sigma} = 8,47\% \quad (2.37)$$

## Návrh magnetického obvodu

Magnetický tok statorového vinutí:

$$\Phi = \frac{U_f}{4,44fN_s \cdot k_{vl}} = \frac{3637}{4,44 \cdot 50 \cdot 12 \cdot 0,923} = 1,479\text{Wb} \quad (3.1)$$

kontrola

$$\Phi = \frac{2}{\pi} \cdot t_p \cdot l_e \cdot B_{\delta} = \frac{2}{\pi} \cdot 1,272 \cdot 1,65 \cdot 0,89 = 1,42\text{Wb} \quad (3.2)$$

Hodnoty souhlasí

$$\text{Vzduchová mezera: } \delta = 0,3 \cdot \frac{t_p A}{B_{\delta}} \cdot 10^{-6} = 0,3 \cdot \frac{1,272 \cdot 77781}{0,89} \cdot 10^{-6} = 0,0333\text{m} \quad (3.3)$$

Hodnota vzduchové mezery je snížena na 27mm

$$\text{Průměr rotoru: } D_r = D_1 - 2\delta = 0,81 - 0,54 = 0,756\text{m} \quad (3.4)$$

dělení rotoru bylo zvoleno 1/36

počet využitých drážek:  $Q_r = 24$

$$\text{šířka drážky } b_{dr} = \frac{1}{Q_r} = \frac{1}{36} = 0,028\text{m} \quad (3.5)$$

$$\text{Drážková rozteč: } t_{dr} = \frac{D_r}{Q_r} = \frac{\pi \cdot 0,756}{36} = 0,066\text{m} \quad (3.6)$$

$$\text{Šířka zubu rotoru: } z_r = t_{dr} - b_{dr} = 0,066 - 0,028 = 0,038 \text{ m} \quad (3.7)$$

$$\text{Carterův čísel příčné osy rotoru: } \gamma_2 = \frac{\left(\frac{b_{dr}}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{b_{dr}}{\delta}} = \frac{\left(\frac{0,028}{0,027}\right)^2}{5 + \frac{0,028}{0,027}} = 0,178 \quad (3.8)$$

$$k_{crq} = \frac{t_{dr}}{t_{dr} - \gamma_2 \delta} = \frac{0,066}{0,066 - 0,178 \cdot 0,027} = 1,079 \quad (3.9)$$

$$\text{Carterův čísel příčné osy: } k_{cq} = k_{cs} k_{crq} = 1,067 \cdot 1,079 = 1,151 \quad (3.10)$$

$$\text{Carterův čísel statoru: } \gamma_1 = \frac{\left(\frac{b_d}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{b_d}{\delta}} = \frac{\left(\frac{0,0185}{0,027}\right)^2}{5 + \frac{0,0185}{0,027}} = 0,082 \quad (3.11)$$

$$k_{cs} = \frac{t_{d1}}{t_{d1} - \gamma_1 \delta} = \frac{0,0353}{0,0353 - 0,082 \cdot 0,027} = 1,067 \quad (3.12)$$

Čísel respektující rozšíření toku vlivem chladících kanálů:

$$k_1 = \frac{1}{1 + \frac{\xi_k (i+1) \delta}{l_e (2 + \delta)}} = \frac{1}{1 + \frac{0,01 \cdot 32 \cdot 0,027}{1,65 \cdot (2 + 0,027)}} = 0,997 \quad (3.13)$$

Čísel zúžení magnetického toku ve větší vzduchové mezeře mezi povrchem rotoru

$$\text{a statoru: } k_d = \frac{D_1}{D_1 - \delta} = \frac{0,81}{0,81 - 0,027} = 1,0341 \quad (3.14)$$

$$\text{Celkový carterův čísel: } k_c = k_{cq} k_d k_1 = 1,187 \quad (3.15)$$

Čísel tvaru magnetického toku:

$$C_t = \frac{\frac{\gamma_r \pi}{4k_{cq}} + \frac{\pi}{2} (1 - \gamma_r)}{C_1} = \frac{\frac{\pi \cdot 0,667}{4 \cdot 1,187} + \frac{\pi}{2} (1 - 0,667)}{0,99} = 0,988 \quad (3.16)$$

$$\text{Skutečná indukce: } B_v = \frac{B_\delta}{C_1} = \frac{0,89}{0,99} = 0,899 \text{ T} \quad (3.17)$$

$$\text{Skutečný magnetický tok: } \Phi_v = C_t \Phi = 0,988 \cdot 1,479 = 1,461 \text{ Wb} \quad (3.18)$$

$$h_{ji} = \frac{\Phi}{2B_{ji}l_e k_{Fe}} = \frac{1,479}{2 \cdot 1,5 \cdot 1,65 \cdot 0,97} = 0,304 \text{ m} \quad (3.20)$$

Vnější průměr statoru:

$$D_2 = D_1 + 2(h_d + h_{ji}) = 0,81 + 2(0,103 + 0,304) = 1,62 \text{ m} \quad (3.21)$$

$$\text{Délka siločáry statoru: } l_{ji} = \frac{\pi D_2}{2p} = \frac{\pi \cdot 1,624}{2} = 2,54 \text{ m} \quad (3.22)$$

### Výpočet rotorových parametrů

Magnetická indukce ve vzduchu přepočtená na rotor

$$B_{vr} = \frac{B_v L}{l_r} = \frac{0,899 \cdot 2,03}{2,1} = 0,869 \text{ T} \quad (3.23)$$

Magnetická vodivost napříč drážkou.

$$\Lambda_D = \frac{h_m}{2b_{dr}} + \frac{h_k}{b_{dr}} = \frac{81,6}{56} + \frac{20}{28} = 2,171 \text{ H} \quad (3.24)$$

kde  $h_m$  je výška mědi v drážce+izolace,  $h_k$  je vložka pod klín+klín

Magnetická vodivost přes hlavy zubů:

$$\Lambda_H = \frac{5 \frac{\delta}{b_{dr}}}{5 + 4 \frac{\delta}{b_{dr}}} = \frac{5 \frac{0,027}{0,28}}{5 + 4 \frac{0,027}{0,28}} = 0,544 \text{ H} \quad (3.25)$$

Rozptylový tok rotoru

$$\Phi_{r\sigma} = \frac{2 \cdot 1,25 \cdot F_{zj} L_r (\Lambda_D + \Lambda_H) \cdot 10^{-6}}{Q_p} = \quad (3.26)$$

$$= \frac{2 \cdot 1,25 \cdot 26846 \cdot 2,1 \cdot (2,171 + 0,544)}{24} = 0,016 \text{ Wb}$$

Poměr rozptylových toků:  $\tau = \frac{\Phi_{r\sigma}}{\Phi_v} = \frac{0,016}{1,479} = 0,011$  (3.27)

Střední rozteč cívky rotorového vinutí:  $l_{cr2} = \frac{\pi}{3} D_r = \frac{\pi}{3} 0,756 = 0,792 \text{ m}$  (3.28)

Délka jednoho závitů cívky rotorového vinutí:

$$l_s = 2(L + 0,15 + l_{cr2}) = 2(2,1 + 0,15 + 0,792) = 6,084 \text{ m} \quad (3.29)$$

### Magnetické napětí jha rotoru:

Uvažovaná plocha:

$$S = (d_r - 2h_{dr} - \text{chl.kanály})l_r = (756 - 210 - 80) \cdot 2,1 = 0,979 \text{ m}^2 \quad (3.30)$$

$$B_{jr} = \frac{\Phi_v (1 + \tau)}{S} = \frac{1,479(1 + 0,011)}{0,979} = 1,509 \text{ T} \quad (3.31)$$

Délka střední siločáry

$$l_{jr} = \frac{\pi(D_{rk} - h_{dr} - \text{chl.kanály})}{2} = \frac{\pi(756 - 210 - 80)}{2} = 0,273 \text{ m} \quad (3.32)$$

Určení reakčního magnetického napětí:

$$F_r = \frac{2,7}{2p} N_s I_1 k_{v1} = \frac{2,7}{2p} 12 \cdot 2749 \cdot 0,923 = 41091 \text{ A} \quad (3.33)$$

Průměr hřídele rotoru:  $D_h = k_h \cdot \sqrt[3]{\frac{P[\text{kW}]}{n}} = 0,193 \sqrt[3]{\frac{24000}{3000}} = 380 \text{ mm}$  (3.34)

### Charakteristika naprázdno:

K sestavení charakteristiky naprázdno je nejprve potřeba vyplnit tabulku magnetizační charakteristiky zubové vrstvy, zubové vrstvy rotoru a určit magnetické napětí na hlavě, středu a patě zubu a vyplní se celá tabulka magnetizačního obvodu

stroje. Pro vyplnění tabulky jsou použity grafy, které jsou přiloženy v příloze (magnetizační charakteristiky použitých materiálů). Pomocí těchto tabulek je nakreslena charakteristika naprázdno, ze které je odečteno budící magnetické napětí, které je potřeba pro návrh budícího vinutí stroje. Vypočtené tabulky jsou umístěné v příloze.

Magnetické napětí ve vzduchové mezeře:

$$F_{\delta} = 0,8k_c B_v \delta \cdot 10^{-6} = 0,8 \cdot 1,187 \cdot 0,899 \cdot 0,027 \cdot 10^6 = 23050 \text{ A} \quad (3.23)$$

$$\text{Drážková rozteč statoru: } t_{di} = \frac{\pi D_1}{Q_s} = \frac{\pi \cdot 0,81}{72} = 0,0353 \text{ m} \quad (3.24)$$

$$\text{Šířka zubu statoru: } z_i = t_{di} - b_d = 0,0353 - 0,0185 = 0,0168 \text{ m} \quad (3.35)$$

## Rotorové vinutí

Hodnota  $F_b$  je určena z charakteristiky naprázdno, kde byla odměřena velikost budícího napětí  $U_b = 65100 \text{ A}$

Pro výpočet průřezu vodiče je použito normované napětí  $U_b = 220 \text{ V}$

$$S_{Cu2} = \frac{2F_b I_s}{\gamma_{120} U_b} = \frac{2 \cdot 65100 \cdot 6,084}{0,0256 \cdot 220} = 85,69 \text{ mm}^2 \quad (3.37)$$

Podle minimální požadovaného průřezu vodiče je zvolen vodič o rozměrech 25x3mm a průřezu:  $S_{Cu2} = 86,6 \text{ mm}^2$  (3.38)

Pro uložení budícího vinutí je použito 24 drážek, kde krajní drážky (umístěné v blízkosti širokého zubu) jsou méně hluboké.

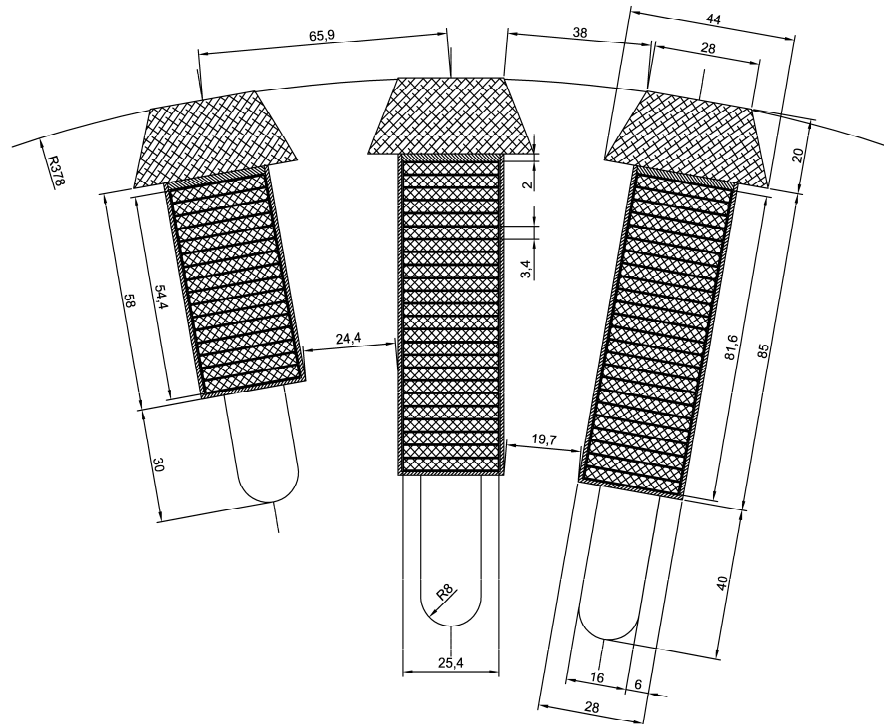
$$\text{Počet vodičů na pól je zvolen: } z_p = 136 \text{ z} \quad (3.39)$$

Závity jsou rozděleny do 6 drážek tak, že do krajní drážky blízko zubu je vloženo 16 závitů a do zbývajících 5-ti drážek zbývajících 120 závitů.

Proud procházejícím vodičem budícího vinutí:  $I_2 = \frac{F_b}{z_p} = \frac{65100}{136} = 478,68 \text{ A}$  (3.40)

Proudová hustota vodiče budícího napětí:

$$\sigma_{Cu} = \frac{I_2}{S_{Cu2}} = \frac{478,68}{86,6} = 5,53 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2} \quad (3.41)$$



Obr. 15 rozměry rotorové drážky:

Tabulka 4. bilance rotorových drážek

	Název	šířka		hloubka drážky 1		hloubka drážky 2
1	Korýtko	2→2*1	2		1	1
2	Izolace vodičů	0,4→	0,4		6,4	9,6
3	Σizolace	-	2,4	-	9,4	12,6
4	Vůle na šířku/výšku		0,6	-	0,6	0,4
5	Holý vodič		25		48	72
6	Rozměr drážky bez klínu		28	h2	58	85
7	klín+můstek	-	-	h0+h1→	20	20
8	Konečný rozměr drážky	bd	28	hd	78	105



## Ztráty

Mechanické ztráty

$$\Delta P_m = 0,9 v^{2,5} d_r \sqrt{l_r} = 0,9 \cdot 118,75^{2,5} \cdot 0,756 \cdot \sqrt{2,18} = 130,304 \text{ kW} \quad (4.1)$$

$$v = \pi d_r \frac{n}{60} = \frac{\pi \cdot 0,756 \cdot 3000}{60} = 118,75 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (4.2)$$

Ztráty v zubech statoru:

Plech tloušťky 0,5mm

Měrná hmotnost plechů:  $\rho = 7600 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

Měrné ztráty plechu:  $p_{1,0} = 1,8 \text{ W} / \text{m}^3$

$$\text{Plocha jedné drážky: } S_{ds} = h_{dr} \cdot b_{dr} = 103 \cdot 18,5 = 1905,5 \text{ mm}^2 \quad (4.3)$$

Plocha zubů a drážek

$$S_{zds} = \frac{\pi(D_1 + 2h_d)^2}{4} - \frac{\pi D_1^2}{4} = \frac{\pi(0,756 + 0,206)^2}{4} - \frac{\pi 0,756^2}{4} = 0,295 \text{ m}^2 \quad (4.4)$$

$$\text{Plocha zubů: } S_{zs} = S_{zds} - S_{ds} Q_s = 0,295 - 0,137 = 0,158 \text{ m}^2 \quad (4.5)$$

$$\text{Objem zubů: } V_{zs} = S_{zs} l_e = 0,157 \cdot 1,65 = 0,261 \text{ m}^3 \quad (4.6)$$

$$\text{Hmotnost zubů: } G_{zs} = V_{zs} \rho = 0,261 \cdot 7600 = 1983,6 \text{ kg} \quad (4.7)$$

$$\text{Ztráty v železe statoru: } \Delta P_{Fes} = 2p_{1,0} G_{zs} B_z^2 = 2 \cdot 1,8 \cdot 1983,6 \cdot 1,86^2 = 24705 \text{ W} \quad (4.8)$$

Plocha jha:

$$S_{js} = \frac{\pi D_2^2}{4} - \frac{\pi(D_1 + 2h_d)^2}{4} = \frac{\pi 1,62^2}{4} - \frac{\pi(0,81 + 0,206)^2}{4} = 1,25 \text{ m}^2 \quad (4.9)$$

$$\text{Objem jha: } V_{jzs} = S_{js} \cdot l_e = 1,25 \cdot 1,65 = 2,063 \text{ m}^3 \quad (4.10)$$

$$\text{Hmotnost jha: } G_{js} = V_{js} \rho = 2,063 \cdot 7600 = 15678,6 \text{ kg} \quad (4.11)$$

$$\text{Ztráty ve jhu statoru: } \Delta P_{Fej} = 1,4 p_{1,0} G_{js} B_j^2 = 1,4 \cdot 15678 \cdot 1,5^2 = 88899 \text{ W} \quad (4.12)$$

Joelovy ztráty

$$\text{Ve statoru: } \Delta P_{Cu1} = 3R'_{1/75} I_1^2 = 3 \cdot 0,0031 \cdot 2749^2 = 70280 \text{ W} \quad (4.13)$$

V rotoru:

$$\text{Drážková část: } R_{20} = \rho_{20} \frac{2z_p (l_r + l_{cr})}{S_{Cur}} = \frac{1}{56} \frac{2 \cdot 136 \cdot (2,1 + 0,792)}{86,6} = 0,1621 \Omega \quad (4.14)$$

$$R_{75} = 1,22 R_{20} = 1,22 \cdot 0,1621 = 0,1971 \Omega \quad (4.15)$$

Ztráty v rotoru

$$\Delta P_{Cu} = R_{75} I_{rl}^2 = 0,1971 \cdot 478,9^2 = 45364 \text{ W} \quad (4.16)$$

Přídavné ztráty

$$\Delta P_{př} = 0,003 \cdot S [\text{kVA}] = 0,003 \cdot 30000 = 90 \text{ kW} \quad (4.17)$$

Celkové ztráty

$$\sum \Delta P = \Delta P_m + \Delta P_{Fes} + \Delta P_{Fej} + \Delta P_{Cu1} + \Delta P_{Cu2} + \Delta P_{př} = 453,55 \text{ kW} \quad (4.18)$$

Účinnost stroje

$$\eta = \frac{P}{P + \sum \Delta P} 100\% = \frac{24000}{24000 + 453,55} 100\% = 98,1\% \quad (4.19)$$

## Mechanické namáhání zubu rotoru

$$\text{Plocha klínu: } S_1 = \frac{b_{dr} + b_k}{2} h_k = \frac{28 + 44}{2} 20 = 720 \text{ mm}^2 \quad (5.1)$$

$$\text{Plocha drážkové části: } S_2 = h_{dr} b_{dr} = 85 \cdot 28 = 2380 \text{ mm}^2 \quad (5.2)$$

Plocha hlavy zubu:

$$S_3 = \frac{(t_{dr} - b_d) + \left( \frac{\pi(D_r - 40)}{Q_r} - 44 \right)}{2} h_k = \frac{38 + 18,48}{2} 20 = 564,8 \text{ mm}^2 \quad (5.3)$$

Plocha těla zubu:

$$S_4 = \frac{\left( \frac{\pi D_r - 2h_k}{Q_r} - 28 \right) + \left( \frac{\pi D_r - 210}{Q_r} - 28 \right)}{2} h_d = \frac{36,86 + 32,14}{2} 85 = 2932,5 \text{ mm}^2 \quad (5.4)$$

Hustoty jednotlivých materiálů

$$\text{Meď: } \rho_{Cu} = 8930 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Bronz: } \rho_{Br} = 8800 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Ocel: } \rho_{ocel} = 7800 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Pro další výpočet je nutné vypočítat objem klínu, drážkové části, hlavy zubu a těla zubu na délku 1 m, a dále pak jejich hmotnost:

$$r_1 = \frac{d_r}{2} - \frac{h_k}{3} \cdot \frac{b_d + 2b_k}{b_d + b_k} = \frac{756}{2} - \frac{20}{3} \cdot \frac{28 + 88}{28 + 44} = 367,6 \text{ mm} \quad (5.5)$$

$$r_2 = \frac{d_r}{2} - h_k - \frac{h_{dr}}{2} = \frac{756}{2} - 20 - \frac{87}{2} = 314,5 \text{ mm} \quad (5.6)$$

$$r_3 = \frac{d_r}{2} - \frac{h_k}{3} \cdot \frac{(t_{dr} - b_d) + 2 \left( \frac{\pi(d_r - 2h_k)}{36} - b_k \right)}{(t_{dr} - b_d) + \left( \frac{\pi(d_r - 2h_k)}{36} - b_k \right)} = \frac{756}{2} - \frac{20}{3} \cdot \frac{38 + 2 \cdot 18,5}{38 + 18,5} = 369,2 \text{ mm} \quad (5.7)$$

$$r_4 = \frac{d_r}{2} - h_k - \frac{h_{dr}}{3} \cdot \frac{\left(\frac{\pi(d_r - 2h_k)}{36} - b_d\right) + 2\left(\frac{\pi(d_r - 2h_d)}{36} - b_d\right)}{\left(\frac{\pi(d_r - 2h_k)}{36} - b_d\right) - \left(\frac{\pi(d_r - 2h_d)}{36} - b_d\right)} =$$

$$= \frac{756}{2} - 20 - \frac{85}{3} \cdot \frac{34,5 + 2 \cdot 19,6}{34,5 + 19,6} = 319,4 \text{ mm} \quad (5.8)$$

Hmotnost jednotlivých částí na 1m délky:

$$G_1 = \rho_{Br} \cdot S_1 = 8800 \cdot 564,8 \cdot 10^{-6} = 6,34 \text{ kg} \quad (5.9)$$

$$G_2 = \rho_{Cu} \cdot S_2 = 8930 \cdot 2380 \cdot 10^{-6} = 21,25 \text{ kg} \quad (5.10)$$

$$G_3 = \rho_{Ocel} \cdot S_3 = 7800 \cdot 564,8 \cdot 10^{-6} = 4,41 \text{ kg} \quad (5.11)$$

$$G_4 = \rho_{Ocel} \cdot S_4 = 7800 \cdot 2932,5 \cdot 10^{-6} = 22,87 \text{ kg} \quad (5.12)$$

Odstředivé síly jsou vypočítány pro maximální otáčky 3600 ot/min.

$$F_1 = G_1 r_1 \left( \frac{\pi \cdot n_{max}}{30} \right)^2 = 6,34 \cdot 0,3676 \cdot 142122 = 331,23 \text{ kN} \quad (5.13)$$

$$F_2 = G_2 r_2 \left( \frac{\pi \cdot n_{max}}{30} \right)^2 = 21,25 \cdot 0,3145 \cdot 142122 = 949,82 \text{ kN} \quad (5.14)$$

$$F_3 = G_3 r_3 \left( \frac{\pi \cdot n_{max}}{30} \right)^2 = 4,41 \cdot 0,3692 \cdot 142122 = 231,4 \text{ kN} \quad (5.15)$$

$$F_4 = G_4 r_4 \left( \frac{\pi \cdot n_{max}}{30} \right)^2 = 22,87 \cdot 0,3194 \cdot 142122 = 1038,16 \text{ kN} \quad (5.16)$$

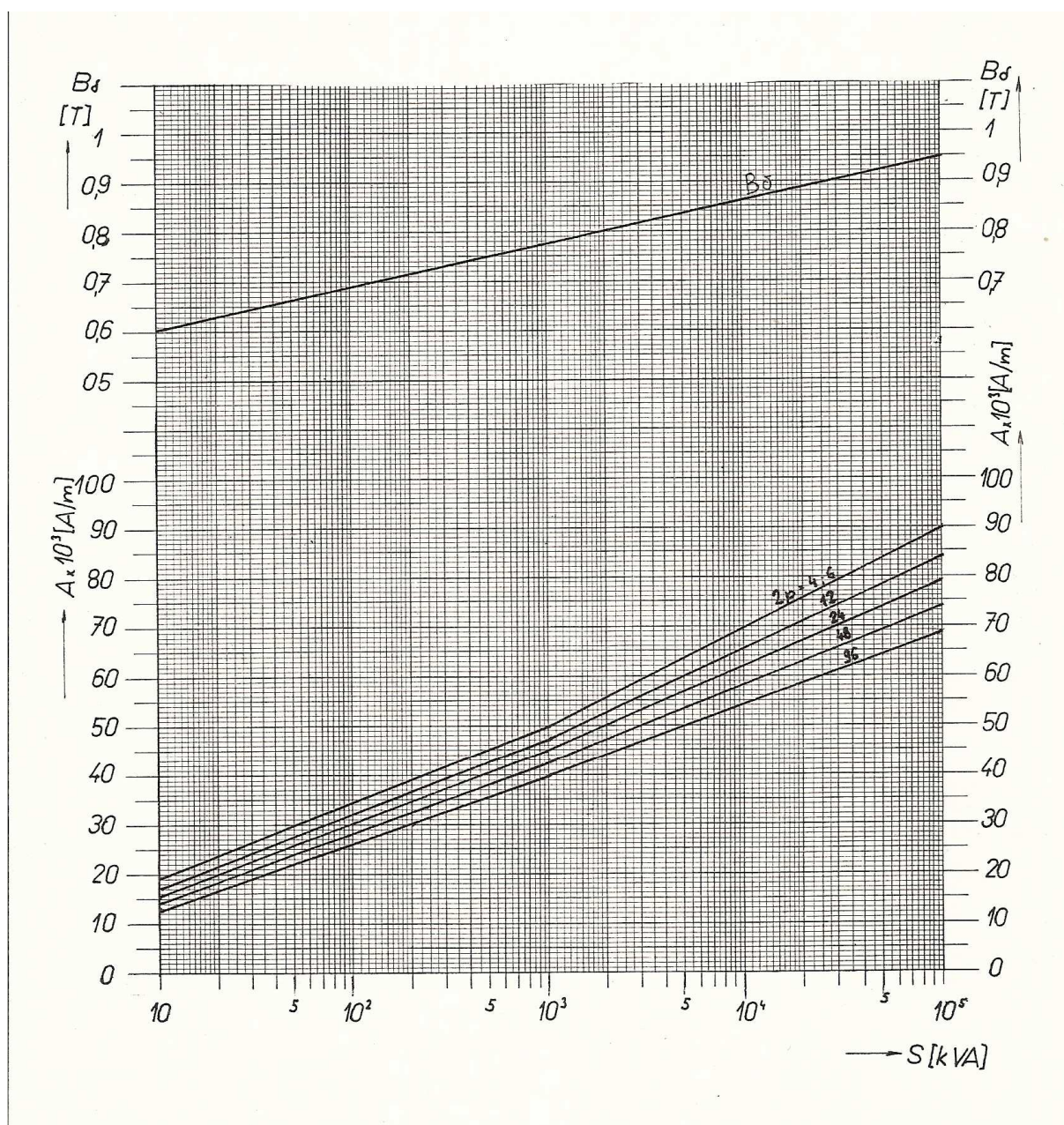
$$\text{Celková odstředivá síla: } F_c = \sum_{i=1}^4 F_i = 2550,61 \text{ kN} \quad (5.17)$$

$$\text{Tahové napětí: } \sigma_{iz} = \frac{2550,61}{\frac{\pi(d_r - 2h_d)}{36} - b_d} = \frac{2550,61}{0,0196} = 130133,16 \text{ kPa} = 130,13 \text{ MPa} \quad (5.18)$$

Maximální hodnota chromoniklové oceli dosahuje 300MPa, vypočtené namáhání musí být menší než je mezní hodnota. Tahové namáhání vyšlo 130,13MPa a je menší než 300MPa.

## Obrazové přílohy

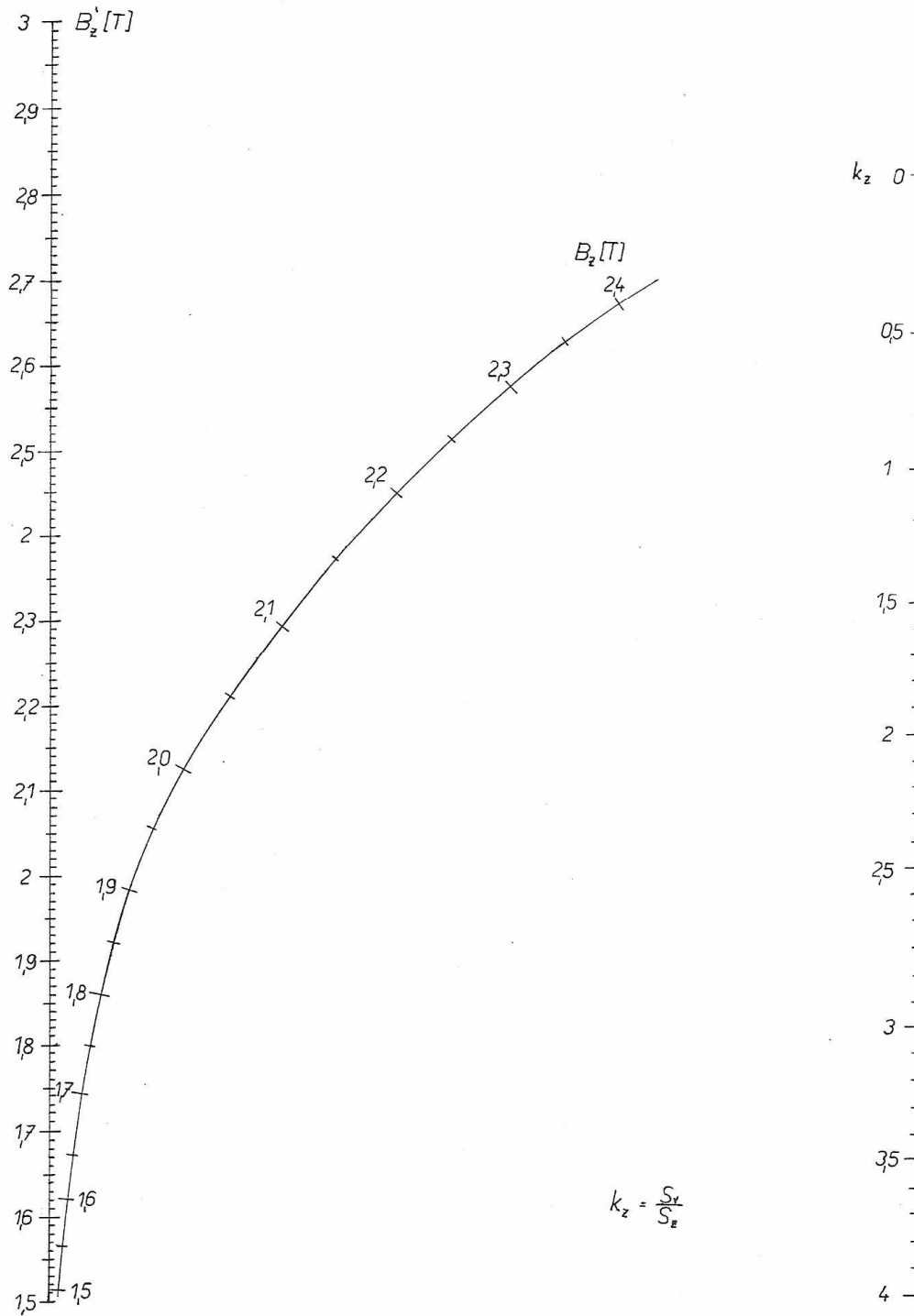
Graf  $B_\delta$  a  $A$  v závislosti na výkonu a počtu pólů stroje





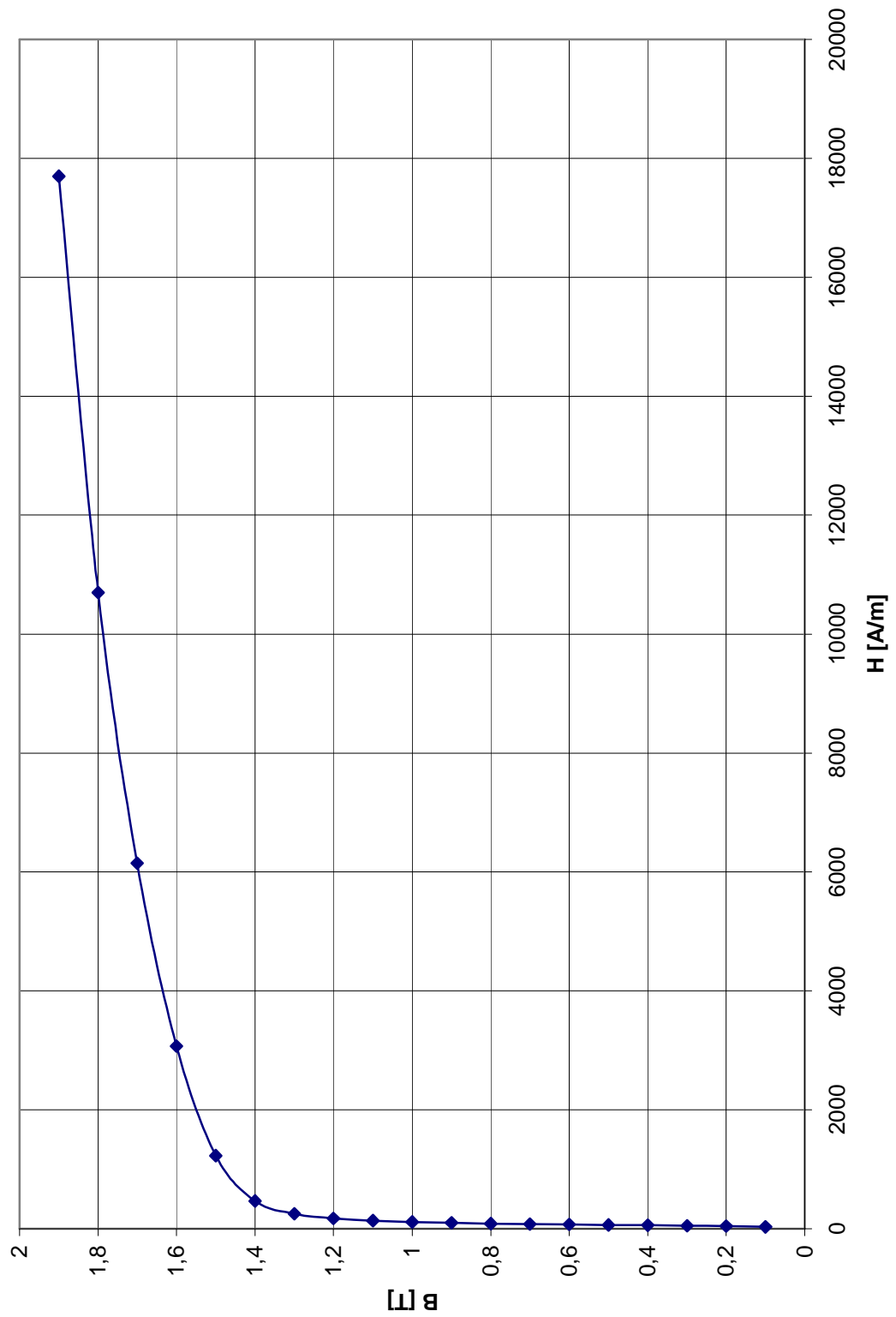


### Monogram k určení skutečné indukce v zubu

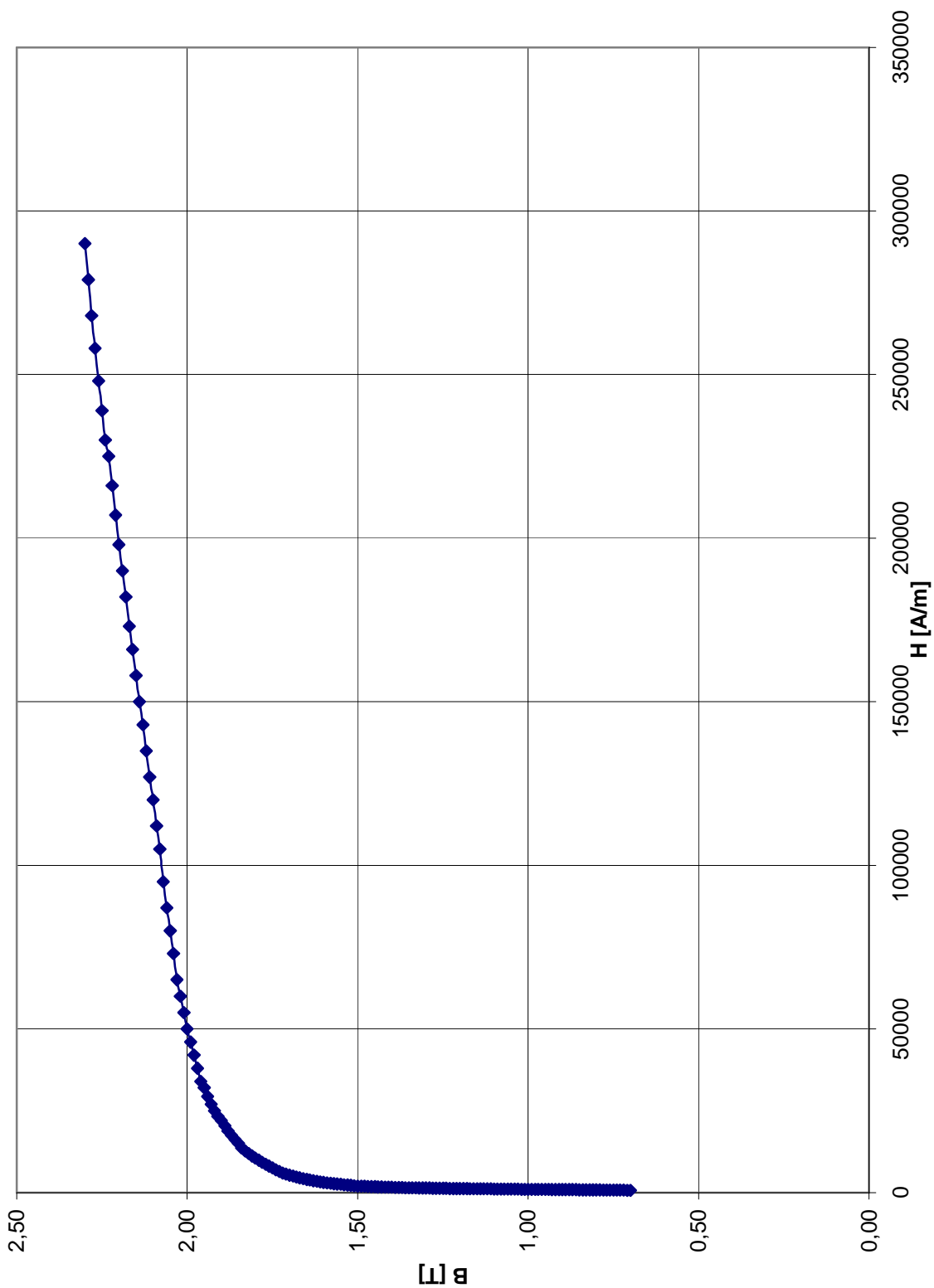




## Magnetizační charakteristika M310-50A



## Magnetizační křivka turbooceli CrNiMoV



## Magnetizační tabulka statoru, magnetizační tabulka rotoru

Φ [Wb]	D1 [m]	0,81	td1 [mm]	35,3	z1 [mm]	13,8	kz1 [-]	1,59	Bz1 [T]	1,93	Bz1 [T]	1,86	Hz1 [A/m]	14594	Hzstr [A/m]	6520	Fz [A]	672
	D2=D1+hd [m]	0,913	td2 [mm]	39,8	z2 [mm]	21,3	kz2 [-]	1,3	Bz2 [T]	1,71	Bz2 [T]	1,686	Hz2 [A/m]	5508,8				
	D3=D1+2*hd [m]	1,016	td3 [mm]	44,3	z3 [mm]	25,8	kz3 [-]	1,11	Bz3 [T]	1,58	Bz3 [T]	1,571	Hz3 [A/m]	2489,4				
K1*Φ [Wb]		1,15							Bz1 [T]	2,22	Bz1 [T]	2,029	Hz1 [A/m]	31667	Hzstr [A/m]	18395	Fz [A]	1895
									Bz2 [T]	1,97	Bz2 [T]	1,895	Hz2 [A/m]	17333				
									Bz3 [T]	1,81	Bz3 [T]	1,776	Hz3 [A/m]	9372,6				
k2*Φ [Wb]		1,3							Bz1 [T]	2,51	Bz1 [T]	2,132	Hz1 [A/m]	47890	Hzstr [A/m]	34043	Fz [A]	3506
									Bz2 [T]	2,23	Bz2 [T]	2,042	Hz2 [A/m]	33435				
									Bz3 [T]	2,05	Bz3 [T]	1,952	Hz3 [A/m]	22624				

Φ [Wb]	Dr1 [m]	0,756	zr1 [m]	0,396	Bzr1 [T]	1,776	Hz1 [A/m]	9260	zstr [A/m]	42543	Fz [A]	3318
	Dr2=Dr1-hd [m]	0,678	zr2 [m]	0,355	Bzr2 [T]	1,981	Hz2 [A/m]	22003				
	Dr3=Dr1-2*hd [m]	0,6	zr3 [m]	0,314	Bzr3 [T]	2,24	Hz3 [A/m]	15800				



### Charakteristika naprázdno

