

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Návrh synchronního stroje**

**vedoucí práce: Ing. Lukáš Bouzek  
autor: Bc. Jan Šobra**

**2012**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2011/2012

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jan ŠOBRA**  
Osobní číslo: **E10N0079P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Průmyslová elektronika a elektromechanika**  
Název tématu: **Návrh synchronního stroje**  
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Provedte elektromagnetický návrh zadaného synchronního stroje.
  2. Nakreslete stroj ve 3D CAD softwaru.
-

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran


Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

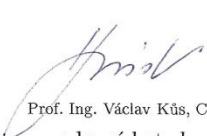
**Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.**

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Lukáš Bouzek**  
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání diplomové práce: **17. října 2011**  
Termín odevzdání diplomové práce: **11. května 2012**

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



  
Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

## **Anotace**

Tato diplomová práce je zaměřena na návrh turboalternátoru, tedy synchronního generátoru s hladkým rotorem. Hlavní část práce tvoří elektromagnetický návrh stroje. Na základě tohoto návrhu je pomocí 3D CAD softwaru vytvořen model stroje.

## **Klíčová slova**

Turboalternátor, synchronní stroj, elektromagnetický návrh, 3D model turboalternátoru

## **Abstract**

Design of synchronous machine

This master thesis is focused on design of turbine generator, which is synchronous machine with cylindrical rotor. Main part of thesis is concerned with electromagnetic design of the machine. On this base is created model of the machine by using 3D CAD software.

## **Key words**

Turbine generator, synchronous machine, electromagnetic design, 3D model of turbine generator

## 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 10.5.2012

Jan Šobra

.....

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Lukáši Bouzkovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>10</b>
<b>1 ELEKTROMAGNETICKÝ NÁVRH</b> .....	<b>13</b>
1.1 ZADANÉ PARAMETRY .....	13
1.2 URČENÍ HLAVNÍCH PARAMETRŮ STROJE.....	13
1.3 NÁVRH VINUTÍ INDUKTU (STATORU).....	15
1.3.1 Parametry vinutí.....	16
1.3.2 Návrh drážky .....	18
1.3.3 Odpor a rozptylová reaktance statorového vinutí .....	21
1.4 NÁVRH MAGNETICKÉHO OBVODU .....	24
1.4.1 Dimenzování magnetického obvodu .....	25
1.4.2 Charakteristika naprázdno.....	27
1.5 NÁVRH BUDÍCÍHO VINUTÍ .....	31
1.6 ZTRÁTY A ÚČINNOST .....	34
<b>2 3D MODEL A KONSTRUKČNÍ USPOŘÁDÁNÍ STROJE</b> .....	<b>36</b>
2.1 KOSTRA .....	36
2.2 STATOR.....	37
2.3 ROTOR .....	40
2.4 SESTAVY.....	44
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>46</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b> .....	<b>47</b>
<b>PŘÍLOHY</b> .....	<b>48</b>



## Úvod

Synchronní stroje patří mezi elektrické stroje točivé a vyznačují se tím, že rotor se otáčí stejnou rychlostí jako magnetické pole statoru. Jestliže magnetické pole rotoru předbíhá pole statoru, pracuje stroj v generátorickém režimu. Pokud je naopak pole rotoru za polem statoru zpožděno, jedná se o motorický režim. Otáčivá rychlost stroje závisí na frekvenci proudu a počtu pólových dvojic stroje a lze ji vyjádřit vztahem:

$$n = \frac{60 \cdot f}{p} [\text{min}^{-1}; \text{Hz}; -]$$

Z konstrukčního hlediska dělíme synchronní stroje na stroje s vyniklými póly a stroje s hladkým rotorem. Stroje s hladkým rotorem se též nazývají turboalternátory. Jelikož je práce zaměřena právě na návrh turboalternátoru, nebude dále strojům s vyniklými póly věnována pozornost.

Turboalternátory jsou zpravidla provedeny jako dvoupólové (při frekvenci 60 Hz mohou být i čtyřpólové). Díky vysokým otáčkám jsou schopny dosahovat velmi vysokých výkonů (více než 1000 MVA). Podle výše uvedeného vztahu je při frekvenci  $f = 50 \text{ Hz}$  a počtu pólů  $2p = 2$  otáčivá rychlost  $n = 3000 \text{ min}^{-1}$ . Z tohoto důvodu se jako pohon turboalternátorů používají parní turbíny, které mají největší účinnost právě při vysokých otáčkách.

Co se týká rozměrů stroje, průměr rotoru je z důvodu velkých odstředivých sil omezen na 1,1 až 1,2 m. Proto je třeba malý průměr stroje kompenzovat jeho větší délkou, která může být i několik metrů. To však znamená zvýšené nároky na odvod tepla ze střední části stroje a nutnost kontroly hřídele na průhyb. Závislost výkonu stroje na jeho rozměrech a otáčkách je patrná z výkonové rovnice:

$$S = C \cdot D_1^2 \cdot l_e \cdot n$$

kde  $S$  je zdánlivý výkon stroje

$C$  je Essonův činitel elektromagnetického využití stroje

$D_1$  je průměr induktu ve vzduchové mezeře

$l_e$  je efektivní délka induktu

$n$  jsou jmenovité otáčky stroje

## Seznam symbolů a zkratk

Značka	Jednotka	Význam
a	-	počet paralelních větví
A	$A.m^{-1}$	obvodová proudová hustota
B	T	magnetická indukce
b, š	m	šířka
C	$kVA.min.m^{-3}$	Essonův činitel elektromagnetického využití
c	m	vzdálenost mezi čely vinutí
$C_1$	-	činitel základní harmonické magnetické indukce ve vzduchové mezeře
$\cos \varphi$	-	účinník
D	m	průměr
E	m	vyložení čel vinutí
F	A	magnetické napětí
f	Hz	frekvence
h	m	výška
i	-	počet
I	A	elektrický proud
$k_c$	-	Carterův činitel
$k_{Cu}$	-	činitel zvýšení elektrického odporu
$k_{Fe}$	-	činitel plnění železa
$k_v$	-	činitel vinutí
L, l	m	délka
$m'$	-	matematický počet fází
m	-	počet fází
$m_{Fe}$	kg	hmotnost
N	-	počet vodičů
n	$min^{-1}$	otáčky
$n_d$	-	počet vodičů v drážce
o	m	délka oka čela vinutí
p	-	počet pólových dvojic
P	W	činný výkon

Q	-	počet drážek
q	-	počet drážek na pól a fázi
R	$\Omega$	elektrický odpor
S	VA	zdánlivý výkon
$S_{Cu}$	$m^2$	průřez vodiče
t	m	rozteč
u	-	počet cívkových stran v drážce vedle sebe
u	%	procentní hodnota úbytku napětí
U	V	elektrické napětí
v	$m.s^{-1}$	obvodová rychlost rotoru
x	%	procentní hodnota reaktance
$X_{\sigma}$	$\Omega$	rozptylová reaktance
y	-	cívkový krok
$y_k$	-	krok na komutátoru
$z_i$	m	šířka zubu
$\alpha_{\xi}$	$^{\circ}$	úhel sklonu čel
$\beta$	-	činitel zkrácení kroku
$\delta$	m	velikost vzduchové mezery
$\Delta P$	W	ztrátový výkon
$\Delta p_{Fe}$	$W.kg^{-1}$	ztrátové číslo elektrotechnických plechů
$\xi$	-	náhradní výška vodiče
$\rho_{Cu}$	$\Omega.m^{-1}$	měrný elektrický odpor vodiče při 20°C
$\rho_{Fe}$	$kg.m^{-3}$	měrná hmotnost elektrotechnických plechů
$\sigma$	$A.mm^{-2}$	proudová hustota
$\Phi$	Wb	magnetický tok
$\eta$	-	účinnost

**Index****Význam**

'	zdánlivý, předběžný
1	stator (indukt), přední
2	zadní
20	při teplotě 20°C
75	při teplotě 75°C
a	kotva (rotor)

b	budící vinutí
Cu	Jouleovy, vodič
č	čelo vinutí
d	drážka
e	efektivní, vnější
f	fázový
Fe	elektrotechnické plechy, železo
j	jho (jádro)
k	ventilační kanál
m	mechanický
p	pól, paket, povrchový
příd	přídavný
R	činný odpor
r	rotor
s	stator, sériový
ss	stejnoseměrný
st	střídavý
stř	střední
v	vodič
z	zub, zubová vrstva
$\delta$	vzduchová mezera
v	řád harmonické
$\sigma$	rozptyl, rozptylová reaktance

# 1 Elektromagnetický návrh

Tato část je věnována elektromagnetickému návrhu stroje. Elektromagnetickým návrhem se rozumí určení hlavních rozměrů a parametrů stroje, návrh vinutí induktu včetně izolačního systému a uspořádání vinutí v drážce, dimenzování magnetického obvodu a sestavení charakteristiky naprázdno, návrh budícího vinutí, určení odporů a reaktancí a výpočet ztrát a účinnosti [1].

Postup při elektromagnetickém návrhu stroje je sestaven zejména podle [1] a [2]. Uspořádání drážek budícího vinutí a výpočet magnetizační charakteristiky širokého zubu rotoru také podle [6].

## 1.1 Zadané parametry

Zdánlivý výkon	$S = 30 \text{ MVA}$
Sdružené napětí	$U = 6,3 \text{ kV}$
Jmenovité otáčky	$n = 3000 \text{ min}^{-1}$
Frekvence	$f = 50 \text{ Hz}$
Počet fází	$m = 3$
Účinník	$\cos \varphi = 0,8$

## 1.2 Určení hlavních parametrů stroje

Činný výkon

$$P = S \cdot \cos \varphi = 30 \cdot 0,8 = 24 \text{ MW} \quad (1.1)$$

Fázové napětí

$$U_f = \frac{U}{\sqrt{3}} = \frac{6300}{\sqrt{3}} = 3637,3 \text{ V} \quad (1.2)$$

Počet pólparů

$$p = \frac{60 \cdot f}{n} = \frac{60 \cdot 50}{3000} = 1 \quad (1.3)$$

Počet pólů

$$2p = 2 \quad (1.4)$$

Fázový proud

$$I_1 = \frac{S}{U_s \cdot \sqrt{3}} = \frac{30 \cdot 10^6}{6300 \cdot \sqrt{3}} = 2749,3 \text{ A} \quad (1.5)$$

Průměr induktu ve vzduchové mezeře (vrtání statoru)

a) dle empirického vztahu

$$D_1 = 0,08 \cdot (2p)^{0,625} \cdot S^{0,185} = 0,08 \cdot 2^{0,625} \cdot 30000^{0,185} = 0,83 \text{ m} \quad (1.6)$$

b) odečteno z grafu podle [2] Obr. 644

$$D_1 = 0,855 \text{ m}$$

- zvoleno  $D_1 = 0,85 \text{ m}$

Obvodová proudová hustota

- odečteno z grafu podle [2] Obr. 644

$$A = 70000 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$$

Indukce ve vzduchové mezeře

- odečteno z grafu podle [2] Obr. 644

$$B_\delta = 0,93 \text{ T}$$

Pólová rozteč

$$t_p = \frac{\pi \cdot D_1}{2p} = \frac{\pi \cdot 0,85}{2} = 1,335 \text{ m} \quad (1.7)$$

### 1.3 Návrh vinutí induktu (statoru)

Volíme drážkovou rozteč

$$t_{d1} = 37 \text{ mm}$$

Tomu odpovídá

- počet drážek induktu

$$Q = \frac{\pi \cdot D_1}{t_{d1}} = \frac{\pi \cdot 850}{37} = 72 \quad (1.8)$$

- počet drážek na pól a fázi

$$q = \frac{Q}{2p \cdot m} = \frac{72}{2 \cdot 3} = 12 \quad (1.9)$$

Předběžný počet závitů jedné fáze v sérii

$$N_s = \frac{\pi \cdot D_1 \cdot A}{2 \cdot m \cdot I_1} = \frac{\pi \cdot 0,85 \cdot 70000}{2 \cdot 3 \cdot 2749,3} = 11,33 \quad (1.10)$$

Počet vodičů v drážce

$$n_d = \frac{a_{st} \cdot N_s}{p \cdot q} = \frac{2 \cdot 11,33}{1 \cdot 12} = 1,89 \quad (1.11)$$

kde  $a_{st} = 2$  je počet paralelních větví každé fáze střídavého vinutí

**zaokrouhleno** na  $n_d = 2$

Skutečný počet závitů v sérii jedné fáze

$$N_s = \frac{n_d \cdot p \cdot q}{a_{st}} = \frac{2 \cdot 1 \cdot 12}{2} = 12 \quad (1.12)$$

Skutečná obvodová proudová hustota

$$A = \frac{2 \cdot m \cdot I_1}{\pi \cdot D_1} \cdot N_s = \frac{2 \cdot 3 \cdot 2749,3}{\pi \cdot 0,85} \cdot 12 = 74128,3 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1} \quad (1.13)$$

### 1.3.1 Parametry vinutí

Počet drážek	$Q = 72$
Počet pólů	$2p = 2$
Počet fází	$m = 3$
Matematický počet fází	$m' = 6$
Počet drážek na pól a fázi	$q = 12$
Počet cívkových stran v drážce vedle sebe	$u = 1$
Typ vinutí	vlnové nekřížené

Počet drážek na pól

$$Q_p = \frac{Q}{2p} = \frac{72}{2} = 36 \quad (1.14)$$

Volíme cívkový krok v počtu drážek

$$y_{1d} = 30$$

Činitel zkrácení kroku

$$\beta = \frac{y_{1d}}{Q_p} = \frac{30}{36} = 0,833 \quad (1.15)$$

Krok na komutátoru

$$y_k = \frac{\varepsilon \cdot K \pm a_{ss}}{p} = \frac{1 \cdot 72 - 2}{1} = 70 \quad (1.16)$$

základní stejnosměrné vinutí je vlnové ( $\varepsilon = 1$ ), paralelní ( $a_{ss} = 2$ ), nekřížené (v čitateli znaménko -)

Kroky v počtu cívkových stran

- přední cívkový krok

$$y_1 = 2 \cdot u \cdot y_{1d} + 1 = 2 \cdot 30 + 1 = 61 \quad (1.17)$$

- zadní cívkový krok

$$y_2 = 2 \cdot y_k - y_1 = 2 \cdot 70 - 61 = 79 \quad (1.18)$$



## Vinutí střídavé

- počet skupin vinutí

$$a_{ss} \cdot m' = 2 \cdot 6 = 12 \quad (1.19)$$

- počet skupin v jedné fázi

$$\frac{a_{ss} \cdot m'}{m} = \frac{2 \cdot 6}{3} = 4 \quad (1.20)$$

- počet cívek ve skupině

$$\frac{Q}{a_{ss} \cdot m'} = \frac{72}{2 \cdot 6} = 6 \quad (1.21)$$

## Výpočet činitelů vinutí

$$k_{vv} = \sin\left(v\beta \frac{\pi}{2}\right) \frac{\sin v \frac{\pi}{m'}}{n \cdot \sin v \frac{\pi}{m' \cdot n}} \quad (1.22)$$

kde  $v$  řád harmonické $\beta$  poměrné zkrácení kroku $m'$  matematický počet fází $n$  čísel počet drážek na pól a fázi ( $q = \frac{n}{c}$ )

## Činitel základní harmonické

$$k_{v1} = \sin\left(1 \cdot 0,833 \cdot \frac{\pi}{2}\right) \frac{\sin 1 \cdot \frac{\pi}{6}}{12 \cdot \sin 1 \cdot \frac{\pi}{6 \cdot 12}} = 0,922 \quad (1.23)$$

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

$v$	1	5	7	11	13
$k_{vv}$	0,922	0,0498	-0,0358	-0,0871	-0,0749

Tab. 1.1: Činitele vinutí příslušných harmonických

Skutečná hodnota Essonova činitele elektromagnetického využití stroje

$$C = \frac{\pi^2}{60\sqrt{2}} \cdot A \cdot B_{\delta} \cdot k_{v1} = \frac{\pi^2}{60\sqrt{2}} \cdot 74,1283 \cdot 0,93 \cdot 0,922 = 7,398 \frac{kVA}{m^3 \cdot \frac{ot}{min}} \quad (1.24)$$

když obvodová proudová hustota je dosazena v  $kA \cdot m^{-1}$

Z toho vychází efektivní délka stroje

$$l_e = \frac{S}{C \cdot D_1^2 \cdot n} = \frac{30000}{7,398 \cdot 0,85^2 \cdot 3000} = 1,87 \text{ m} \quad (1.25)$$

Počet paketů

$$i = \frac{l_e}{\check{s}_p} = \frac{1,87}{0,05} = 38 \quad (1.26)$$

Počet kanálů

$$i_k = i - 1 = 38 - 1 = 37 \quad (1.27)$$

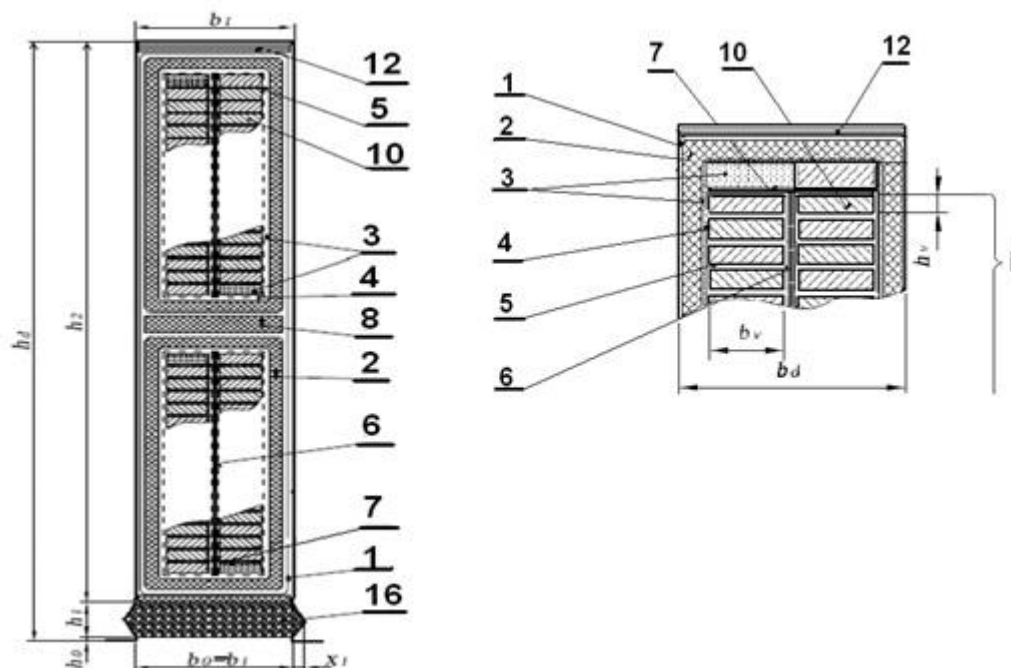
Celková délka induktu

$$L = l_e + \check{s}_k \cdot i_k = 1,87 + 0,01 \cdot 37 = 2,24 \text{ m} \quad (1.28)$$

### 1.3.2 Návrh drážky

Zvolena otevřená drážka tvaru M pro  $n_d = 2$  s Roeblovou tyčí v drážkové části.

Dále zvolena proudová hustota ve vodiči  $\sigma_{Cu1} = 3,5 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$ .



Obr. 1.1: Tvar a rozměry drážky typu M [1]

Šířka zubu

$$z_1 = \frac{B_\delta \cdot t_{d1}}{B'_{z1} \cdot k_{Fe}} = \frac{0,93 \cdot 37}{1,7 \cdot 0,94} = 21,53 \text{ mm} \quad (1.29)$$

kde  $B'_{z1}$  je zvolená hodnota magnetické indukce v hlavě zubu (na průměru  $D_1$ )  
 $k_{Fe}$  je činitel plnění železa

Tomu odpovídá šířka drážky

$$b_d = t_{d1} - z_1 = 37 - 21,53 = 15,47 \text{ mm} \quad (1.30)$$

- nejbližší **normalizovaná** drážka

$$b_d = 16 \text{ mm}$$

Skutečná šířka zubu

$$z_1 = t_{d1} - b_d = 37 - 16 = 21 \text{ mm} \quad (1.31)$$

Průřez Roeblový tyče

$$S'_{Cu1} = \frac{I_1}{a_{st} \cdot \sigma_{Cu1}} = \frac{2749,3}{2 \cdot 3,5} = 393 \text{ mm}^2 \quad (1.32)$$

Výšku a šířku holého vodiče **volíme**  $h_v = 1,8 \text{ mm}$ ,  $b_v = 5 \text{ mm}$

Průřez holého vodiče

$$S_1 = h_v \cdot b_v = 1,8 \cdot 5 = 9 \text{ mm}^2 \quad (1.33)$$

Počet vodičů v jednom sloupci tyče

$$i = \frac{S'_{Cu1}}{2S_1} = \frac{393}{2 \cdot 9} = 22 \quad (1.34)$$

Skutečný průřez tyče

$$S_{Cu1} = 2i \cdot S_1 = 2 \cdot 22 \cdot 9 = 396 \text{ mm}^2 \quad (1.35)$$

Skutečná proudová hustota

$$\sigma_{Cu1} = \frac{I_1}{a_{st} \cdot S_{Cu1}} = \frac{2749,3}{2 \cdot 396} = 3,47 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2} \quad (1.36)$$

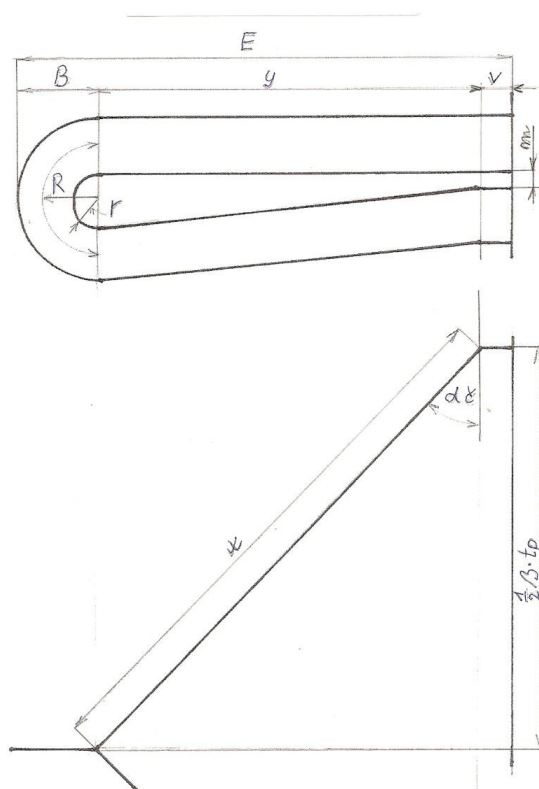
Prostor pro šířku holého vodiče a hloubka drážky se určí podle následující tabulky s odkazem na Obr. 1.1. V návrhu je počítáno s izolací typu Relanex. Rozměry klínu a můstku pro danou šířku drážky se určí podle normy (viz. Příloha 1).

Poz	Položka	Šířka		Hloubka	
1	Vyložení drážky	$2 \cdot 0,15$	0,3	$3 \cdot 0,15$	0,45
2	Izolace proti železu (trubka)	$2 \cdot t_i \rightarrow 2 \cdot 1,8$	3,6	$4 \cdot t_i \rightarrow 4 \cdot 1,8$	7,2
3	Tmelení	$2 \cdot 0,1$	0,2	$4 \cdot 0,1$	0,4
4	Stažení vodičů	$2 \cdot 0,15$	0,3	$4 \cdot 0,15$	0,6
5	Izolace vodičů	$2 \cdot 0,37$	0,74	$2(i+1) \cdot 0,37 \rightarrow 2(22+1)0,37$	17,02
6	Mezivložka	$2 \cdot 0,2$	0,4	-	-
7	Podložení přech. vod.	-	-	$4 \cdot 0,2$	0,8
8	Mezivrstva	-	-	$1 \cdot m_v \rightarrow 1 \cdot 4$	4
9	$\Sigma$ izolace		5,54		30,47
10	Holý vodič	$j \cdot b_v \rightarrow 2 \cdot 5$	10	$2 \cdot (i+1) \cdot h_v \rightarrow 2(22+1)1,8$	82,8
11	Vůle na šířku	0,15 až 0,6	0,46		
12	Vložka na dno	-	-	$1 \cdot 0,5$	0,5
13	Vložka pod klín	-	-	$1 \cdot 0,5$	0,5
14	Vůle na hloubku	-	-	0,4 až 2,5	1,73
15	Rozměr drážky bez klínu	$b_d$	16	$h_2$	116
16	Klín + můstek	-	-	$h_0 + h_1 \rightarrow 1 + 5$	6
17	<b>Konečný rozměr drážky</b>	<b><math>b_a</math></b>	<b>16</b>	<b><math>h_a</math></b>	<b>122</b>

Tab. 1.2: Uspořádání vodičů a izolace v drážce induktu

### 1.3.3 Odpor a rozptylová reaktance statorového vinutí

Dvoupólové stroje mají zpravidla evolventní čela vinutí uspořádána na kuželové ploše. Tvar evolventy a délku těchto čel je však velice obtížné spočítat a v praxi se k tomu využívá specializovaný software. Proto jsou níže spočítány rozměry čel válcového vinutí (viz. Obr. 1.2), aby bylo možné určit alespoň přibližně hodnoty odporu a rozptylové reaktance statorového vinutí. Ve 3D modelu jsou však pro názornost nakreslena čela kuželová.



Obr. 1.2: Rozměry čela válcového vinutí [1]

Vzdálenost mezi čely vinutí

$$c = 4 + \frac{U[kV]}{2} = 4 + \frac{6,3}{2} = 7,15 \text{ mm} \quad (1.37)$$

Úhel sklonu čel válcového vinutí

$$\sin \alpha_c = \frac{b_c + c}{t_{d1}} = \frac{16 + 7,15}{37} = 0,611 \quad (1.38)$$

$$\alpha_c = \arcsin 0,611 = 38^\circ \quad (1.39)$$

když šířku čela  $b_d$  volíme stejnou jako šířku drážky  $b_d$

Délka čela

$$x = \frac{\beta \cdot t_p}{2 \cos \alpha_\zeta} = \frac{0,833 \cdot 1335}{2 \cdot \cos 38} = 706 \text{ mm} \quad (1.40)$$

$$B = \frac{h_2}{2} + r = \frac{116}{2} + 10 = 68 \text{ mm} \quad (1.41)$$

kde volíme  $r = 10 \text{ mm}$

$$y = \frac{\beta \cdot t_p}{2} \operatorname{tg} \alpha_\zeta = \frac{0,833 \cdot 1335}{2} \cdot \operatorname{tg} 38 = 435 \text{ mm} \quad (1.42)$$

Délka oka

$$o = \frac{\pi \cdot R}{2} = \frac{\pi \cdot 68}{2} = 61 \text{ mm} \quad (1.43)$$

kde

$$R = \frac{B + r}{2} = \frac{68 + 10}{2} = 39 \text{ mm} \quad (1.44)$$

Vyložení čel

$$E = v + y + B = 45 + 435 + 68 = 548 \text{ mm} \quad (1.45)$$

Délka čela

$$l_\zeta = 2(v + x + o) = 2(0,045 + 0,706 + 0,061) = 1,624 \text{ m} \quad (1.46)$$

kde  $v = 0,045 \text{ m}$  je výběh cívky z drážky v závislosti na napětí stroje

Délka vodiče

$$l_v = L + l_\zeta = 2,24 + 1,624 = 3,864 \text{ m} \quad (1.47)$$

Odpor jedné fáze

Elektrický odpor pro stejnosměrný proud (tedy bez uvažování skinefektu)

$$R'_{1/20} = \rho_{Cu} \cdot \frac{2l_v \cdot N_s}{a_{st} \cdot S_{Cu1}} = \frac{1}{56} \cdot \frac{2 \cdot 3,864 \cdot 12}{2 \cdot 396} = 2,091 \cdot 10^{-3} \Omega \quad (1.48)$$

kde  $\rho_{Cu}$  je měrný odpor měděného vodiče při teplotě  $20^\circ\text{C}$

Vliv skinefektu

- náhradní výška vodiče

$$\xi = 2\pi \cdot h_v \cdot \sqrt{\frac{j \cdot b_v \cdot f}{b_d \cdot \rho_{Cu}} \cdot 10^{-7}} = 2\pi \cdot 1,8 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 5 \cdot 50}{16 \cdot \frac{1}{56}} \cdot 10^{-7}} = 0,15 \quad (1.49)$$

- činitel zvýšení elektrického odporu

$$k_{Cu} = \frac{g^2 - 0,2}{9} \cdot \xi^4 = \frac{44^2 - 0,2}{9} \cdot 0,15^4 = 0,1077 \quad (1.50)$$

kde  $g$  je celkový počet vodičů v drážce nad sebou:  $g = i \cdot n_d = 22 \cdot 2 = 44$  ( $i$  je počet vodičů, na kolik se rozdělil původní vodič na výšku, zatímco  $j$  je počet vodičů v drážce vedle sebe)

Odpor při střídavém proudu při 20°C

$$R_{1/20} = (1 + k_{Cu})R'_{1/20} = (1 + 0,1077) \cdot 2,091 \cdot 10^{-3} = 2,316 \cdot 10^{-3} \Omega \quad (1.51)$$

Odpor při 75°C

$$R_{1/75} = 1,22 \cdot R_{1/20} = 1,22 \cdot 2,316 \cdot 10^{-3} = 2,826 \cdot 10^{-3} \Omega \quad (1.52)$$

Procentní hodnota úbytku napětí na ohmickém odporu

$$u_R = \frac{R_{1/75} \cdot I_1}{U_f} \cdot 100 = \frac{2,826 \cdot 10^{-3} \cdot 2749,3}{3637,3} = 0,213 \% \quad (1.53)$$

Rozptylová reaktance statorového vinutí

$$\begin{aligned} X_\sigma &= \frac{(4\pi)^2 \cdot f \cdot N_s^2}{p \cdot q} l_e \left[ \left( \frac{h'_2}{3b_d} + \frac{h'_1}{b_d} \right) + \frac{l_\xi}{l_e} q \left( 0,187 + 0,166 \frac{t_p}{l_\xi} \beta \right) + \ln \left( 1 + \frac{\pi z}{2b_d} \right) \right] \cdot 10^{-7} = \\ &= \frac{(4\pi)^2 \cdot 50 \cdot 12}{1 \cdot 12} \cdot 1,87 \cdot \\ &\cdot \left[ \left( \frac{109}{3 \cdot 16} + \frac{10}{16} \right) + \frac{1,624}{1,87} \cdot 12 \cdot \left( 0,187 + 0,166 \cdot \frac{1,335}{1,624} \cdot 0,833 \right) + \right. \\ &\left. + \ln \left( 1 + \frac{\pi \cdot 21}{2 \cdot 16} \right) \right] \cdot 10^{-7} = 0,126 \Omega \end{aligned} \quad (1.54)$$

Procentní hodnota úbytku napětí na rozptylové reaktanci

$$u_{\sigma} = \frac{X_{\sigma} \cdot I_1}{U_f} \cdot 100 = \frac{0,126 \cdot 2749,3}{3637,3} \cdot 100 = 9,57 \% \quad (1.55)$$

Procentní hodnota rozptylové reaktance

$$x_{\sigma} = u_{\sigma} = 9,57 \% \quad (1.56)$$

## 1.4 Návrh magnetického obvodu

Určení magnetického toku

a) z rovnice pro indukované napětí

$$\Phi = \frac{U_f}{4,44 \cdot f \cdot N_s \cdot k_{v1}} = \frac{3637,3}{4,44 \cdot 50 \cdot 12 \cdot 0,922} = 1,479 \text{ Wb} \quad (1.57)$$

b) kontrola podle rozměrů stroje a velikosti indukce ve vzduchové mezeře

$$\Phi = \frac{2}{\pi} \cdot t_p \cdot l_e \cdot B_{\delta} = \frac{2}{\pi} \cdot 1,335 \cdot 1,87 \cdot 0,93 = 1,478 \text{ Wb} \quad (1.58)$$

Hodnoty jsou si velmi podobné, **dále počítáme s hodnotou  $\Phi = 1,479 \text{ Wb}$**

Velikost vzduchové mezery

a) při volbě vzduchové mezery vycházíme z požadované procentní hodnoty nesyčené synchronní reaktance a procentní hodnoty rozptylové reaktance

$$\delta = k \cdot \frac{A \cdot t_p}{B_{\delta}} \cdot \frac{10^{-6}}{x_d - x_{\sigma}} = 50 \cdot \frac{74128,3 \cdot 1,335}{0,93} \cdot \frac{10^{-6}}{200 - 9,57} = 0,0279 \text{ m} \quad (1.59)$$

kde  $k = 50$  záleží na velikosti Carterova činitele a dalších parametrech

$x_d = 200$  je procentní hodnota nesyčené synchronní reaktance; protože není zadána, volí se podle počtu pólů (pro  $2p = 2$  je hodnota  $x_d = 200 \div 220 \%$ )

b) dle [2]

$$\delta = 0,3 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{A \cdot t_p}{B_{\delta}} = 0,3 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{74128,3 \cdot 1,335}{0,93} = 0,0319 \text{ m} \quad (1.60)$$

- zvoleno  $\delta = 32 \text{ mm}$



Magnetické napětí reakce kotvy

- amplituda základní harmonické reakce kotvy

$$F'_a = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{1}{C_1} \cdot A \cdot t_p \cdot k_{v1} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{1}{1,02} \cdot 74128,3 \cdot 1,335 \cdot 0,922 = 40303,3 \text{ A} \quad (1.61)$$

kde  $C_1$  je číselný koeficient základní harmonické magnetické indukce ve vzduchové mezeře (zde zvoleno  $C_1 = 1,02$ )

#### 1.4.1 Dimenzování magnetického obvodu

Vnější průměr statorových plechů

$$D_e = 2 \cdot D_1 = 2 \cdot 0,85 = 1,7 \text{ m} \quad (1.62)$$

Výška jha statoru

$$h_{js} = \frac{1}{2} \cdot (D_e - D_1 - 2h_d) = \frac{1}{2} (1,7 - 0,85 - 2 \cdot 0,122) = 0,303 \text{ m} \quad (1.63)$$

Indukce ve jhu statoru

$$B_{js} = \frac{\Phi}{2 \cdot h_{js} \cdot k_{Fe} \cdot l_e} = \frac{1,479}{2 \cdot 0,303 \cdot 0,94 \cdot 1,87} = 1,39 \text{ T} \quad (1.64)$$

Vnější průměr rotoru

$$D_r = D_1 - 2\delta = 0,85 - 2 \cdot 0,032 = 0,786 \text{ m} \quad (1.65)$$

Hloubka první rotorové drážky vedle širokého zubu odhadnuta

$$h_{r1} = 0,12 \text{ m}$$

Hloubka ostatních rotorových drážek odhadnuta

$$h_{r2} = 0,13 \text{ m}$$

Výška pólu

$$h_p = h_{r1} = 0,12 \text{ m} \quad (1.66)$$

Výška jha rotoru

$$h_{jr} = D_r - 2h_{r2} = 0,786 - 2 \cdot 0,13 = 0,263 \text{ m} \quad (1.67)$$

Indukce ve jhu rotoru

$$B_{jr} = \frac{1,1 \cdot \Phi}{2 \cdot L \cdot h_{jr}} = \frac{1,1 \cdot 1,479}{2 \cdot 2,24 \cdot 0,263} = 1,38 \text{ T} \quad (1.68)$$

Délky středních siločar magnetického obvodu

Pól

$$l_p = h_p = 0,12 \text{ m} \quad (1.69)$$

Jho rotoru

$$l_{jr} = \frac{D_r}{2} - h_{jr} = \frac{0,786}{2} - 0,263 = 0,273 \text{ m} \quad (1.70)$$

Jho statoru

$$l_{js} = \frac{\pi \cdot [D_1 - 2 \cdot (h_d + h_{js})]}{4p} = \frac{\pi \cdot [0,85 - 2 \cdot (0,122 + 0,303)]}{4 \cdot 1} = 0,726 \text{ m} \quad (1.71)$$

Zub statoru

$$l_z = h_d = 0,122 \text{ m} \quad (1.72)$$

### 1.4.2 Charakteristika naprázdno

Carterův činitel respektující vliv drážkování induktu

$$\frac{b_0}{z_1} = \frac{16}{21} = 0,76 \quad (1.73)$$

$$\frac{b_0}{\delta} = \frac{16}{32} = 0,5 \quad (1.74)$$

z **nomogramu** (viz. Příloha č. 2)  $k_{cd} = 1,035$

Carterův činitel respektující vliv radiálních ventilačních kanálů

$$k_{ck} = \frac{1}{1 + \frac{\delta}{2 + \delta} \cdot \frac{\check{s}_k \cdot i}{l_e}} = \frac{1}{1 + \frac{32}{2 + 32} \cdot \frac{0,01 \cdot 38}{1,87}} = 0,839 \quad (1.75)$$

Výsledná hodnota Carterova činitele

$$k_c = k_{cd} \cdot k_{ck} = 1,035 \cdot 0,839 = 0,868 \quad (1.76)$$

Magnetické napětí ve vzduchové mezeře

$$F_\delta = 0,8 \cdot k_c \cdot \delta \cdot B_\delta \cdot 10^6 = 0,8 \cdot 0,868 \cdot 0,032 \cdot 0,93 \cdot 10^6 = 20665 \text{ A} \quad (1.77)$$

## Výpočet charakteristiky naprázdno je proveden v následujících tabulkách

Magnetizační charakteristika zubové vrstvy statoru

Φ	D <sub>1</sub> =	850	t <sub>d1</sub> =	37,1	z <sub>1</sub> =	21,09	k <sub>z1</sub> =	0,871	B' <sub>z1</sub> =	1,74	B <sub>z1</sub> =	1,73	H <sub>z1</sub> =	8000	H <sub>zstr</sub> =	3800	F <sub>z</sub> =	464
	D <sub>2</sub> =	972	t <sub>d2</sub> =	42,4	z <sub>2</sub> =	26,41	k <sub>z2</sub> =	0,708	B' <sub>z2</sub> =	1,59	B <sub>z2</sub> =	1,59	H <sub>z2</sub> =	3000				
	D <sub>3</sub> =	1094	t <sub>d3</sub> =	47,7	z <sub>3</sub> =	31,73	k <sub>z3</sub> =	0,6	B' <sub>z3</sub> =	1,49	B <sub>z3</sub> =	1,5	H <sub>z3</sub> =	2800				
	k <sub>1</sub> ·Φ	B' <sub>z1</sub> =	1,39	B <sub>z1</sub> =	1,39	H <sub>z1</sub> =	870	H <sub>zstr</sub> =	588	F <sub>z</sub> =	72							
		B' <sub>z2</sub> =	1,27	B <sub>z2</sub> =	1,27	H <sub>z2</sub> =	550											
		B' <sub>z3</sub> =	1,19	B <sub>z3</sub> =	1,19	H <sub>z3</sub> =	460											
	k <sub>2</sub> ·Φ	B' <sub>z1</sub> =	2	B <sub>z1</sub> =	1,91	H <sub>z1</sub> =	19000	H <sub>zstr</sub> =	11833	F <sub>z</sub> =	1444							
		B' <sub>z2</sub> =	1,83	B <sub>z2</sub> =	1,81	H <sub>z2</sub> =	11500											
		B' <sub>z3</sub> =	1,71	B <sub>z3</sub> =	1,7	H <sub>z3</sub> =	6000											
	k <sub>3</sub> ·Φ	B' <sub>z1</sub> =	2,26	B <sub>z1</sub> =	2,13	H <sub>z1</sub> =	55000	H <sub>zstr</sub> =	32917	F <sub>z</sub> =	4016							
		B' <sub>z2</sub> =	2,07	B <sub>z2</sub> =	2,02	H <sub>z2</sub> =	31000											
		B' <sub>z3</sub> =	1,94	B <sub>z3</sub> =	1,91	H <sub>z3</sub> =	18500											

Tab. 1.3: Magnetizační charakteristika zubové vrstvy statoru

kde  $k_1 = 0,8$ ,  $k_2 = 1,15$ ,  $k_3 = 1,3$  jsou násobky magnetického toku, resp. napětí

$D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$  jsou průměry kružnic procházejících hlavou, středem a patou zubu

$t_{di}$  je drážková rozteč na příslušném průměru

$z_i$  je šířka drážky v příslušném místě

$k_{zi}$  je činitel odlehčení daný poměrem kolmého průřezu zubu a drážky

$B'_{zi}$  je zdánlivá magnetická indukce v zubu na daném průměru

$B_{zi}$  je skutečná hodnota magnetické indukce v příslušném místě zubu

$H_{zi}$  je intenzita magnetického pole odpovídající dané magnetické indukci

$H_{zstr}$  je střední hodnota intenzity v zubu

$F_z$  je velikost magnetického napětí v zubu

- tyto hodnoty jsou vypočteny podle následujících vztahů:

$$t_{di} = \frac{\pi \cdot D_i}{Q} \quad z_i = t_{di} - b_d \quad k_{zi} = \frac{t_{di}}{z_i \cdot k_{Fe}} - 1$$

$$B'_{zi} = \frac{B_\delta \cdot t_{di}}{z_i \cdot k_{Fe}} \quad H_{zstr} = \frac{H_{z1} + 4H_{z2} + H_{z3}}{6} \quad F_z = H_{zstr} \cdot h_d$$

hodnoty  $B_{zi}$  byly odečteny z nomogramu pro určení skutečné indukce v zubech a

hodnoty  $H_{zi}$  z magnetizační charakteristiky dynamových plechů (viz. Příloha č. 3 a 4)

## Magnetizační charakteristika širokého zubu rotoru (pólu)

$\Phi$	$D_{r1} =$	786	$z_{p1} =$	412	$B_{p1} =$	0,88	$H_{p1} =$	400	$H_{pstr} =$	587	$F_p =$	70
	$D_{r2} =$	666	$z_{p2} =$	349	$B_{p2} =$	1,04	$H_{p2} =$	530				
	$D_{r3} =$	546	$z_{p3} =$	286	$B_{p3} =$	1,27	$H_{p3} =$	1000				
	$k_1 \cdot \Phi$	$B_{p1} =$	0,7	$H_{p1} =$	350	$H_{pstr} =$	392	$F_p =$	47			
		$B_{p2} =$	0,83	$H_{p2} =$	375							
		$B_{p3} =$	1,02	$H_{p3} =$	500							
	$k_2 \cdot \Phi$	$B_{p1} =$	1,01	$H_{p1} =$	490	$H_{pstr} =$	950	$F_p =$	114			
		$B_{p2} =$	1,2	$H_{p2} =$	790							
		$B_{p3} =$	1,46	$H_{p3} =$	2050							
	$k_3 \cdot \Phi$	$B_{p1} =$	1,14	$H_{p1} =$	650	$H_{pstr} =$	1892	$F_p =$	227			
		$B_{p2} =$	1,35	$H_{p2} =$	1300							
		$B_{p3} =$	1,65	$H_{p3} =$	5500							

Tab. 1.4: Magnetizační charakteristika širokého zubu rotoru

kde  $D_{r1}$ ,  $D_{r2}$ ,  $D_{r3}$  jsou opět průměry kružnic procházejících hlavou, středem a patou širokého zubu

$z_{pi}$  je šířka širokého zubu (pólu) na daném průměru

$B_{pi}$  je magnetická indukce v daném místě zubu

$H_{zstr}$  je střední hodnota intenzity v širokém zubu

$F_p$  je velikost magnetického napětí v pólu

- tyto hodnoty jsou vypočteny podle následujících vztahů

$$z_{pi} = \frac{\pi \cdot D_{ri}}{6} \quad B_{pi} = \frac{1,1 \cdot \Phi}{z_{pi} \cdot L}$$

$$H_{pstr} = \frac{H_{p1} + 4H_{p2} + H_{p3}}{6} \quad F_p = H_{pstr} \cdot h_p$$

hodnoty  $H_{pi}$  jsou odečteny z magnetizační charakteristiky konstrukční oceli (Příloha č. 5)

## Magnetizační charakteristika celého magnetického obvodu

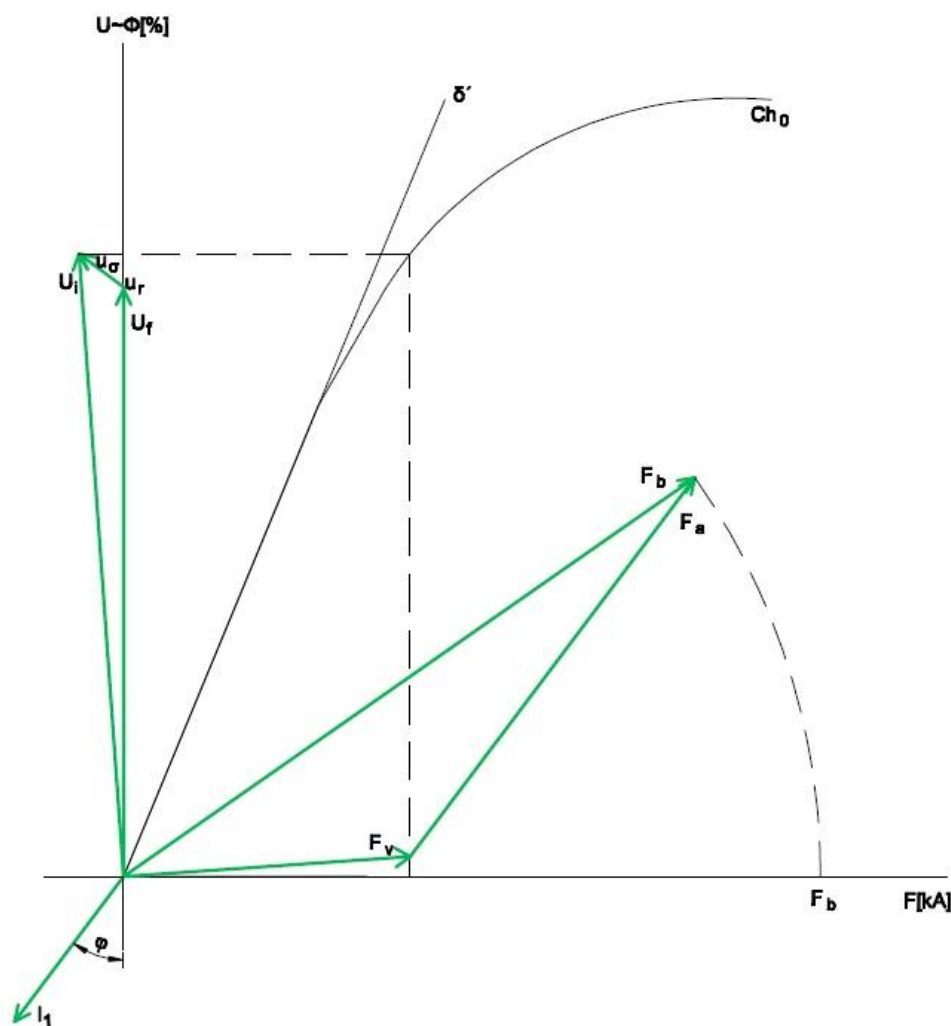
	$\Phi$			$k_1\Phi$			$k_2\Phi$			$k_3\Phi$			
	B [T]	H [A/m]	F [A]	B [T]	H [A/m]	F [A]	B [T]	H [A/m]	F [A]	B [T]	H [A/m]	F [A]	
Vzduchová mezera	0,93		20665			16532			23765			26865	
Zuby	$k_{z1} = 0,871$	$B_{z1}^1$		1,39	870		2			2,26			
		$B_{z1}$	8000	1,39			1,91	19000		2,13	55000		
	$k_{z2} = 0,708$	$B_{z2}^1$			1,27	550		1,83	11500		2,07	31000	
		$B_{z2}$	3000		1,27			1,81		2,02			
Pata	$k_{z3} = 0,6$	$B_{z3}^1$		1,19	460		1,71	6000		1,94	18500		
		$B_{z3}$	2800		1,19		1,7			1,91			
Sř. hodnota	$l_z = 0,122$ m		3800		588	72		11833	1444		32917	4016	
Jho statoru	$l_{js} = 0,726$ m		870	1,11	370	269	1,6	3100	2251	1,81	11500	8349	
	$\Sigma F = F_\delta + F_z + F_{js}$		21761		16873			27460			39230		
Pól	Hlava		400	0,7	350		1,01	490		1,14	650		
	Sřřed		530	0,83	375		1,2	790		1,35	1300		
	Pata		1000	1,02	500		1,46	2050		1,65	5500		
Sřřední hodnota	$l_p = 0,12$ m		587		70	47		950	114		1892	227	
Jho rotoru	$l_{jr} = 0,273$ m		1500	1,38	600	164	1,59	4000	1092	1,79	11600	3167	
	$\Sigma F = F_\delta + F_z + F_{js} + F_p + F_{jr}$		22241		17084			28666			42624		

Tab. 1.5: Magnetizační charakteristika celého magnetického obvodu

Výše vypočtená charakteristika naprázdno je vykreslena na Obr. 1.3.

## 1.5 Návrh budícího vinutí

Na Obr. 1.3 je zobrazen grafický postup pro určení budícího magnetického napětí synchronního stroje s hladkým rotorem. Pro přehlednost je fázorový diagram magnetických napětí otočen o  $90^\circ$  doprava. Z tohoto důvodu jsou také hodnoty na svislé ose vynášeny v procentech. Není tedy nutné kreslit samostatné stupnice pro napětí a magnetický tok. Velikost vnitřního indukovaného napětí  $U_i$  se získá tak, že se k fázovému napětí  $U_f$  přičte ve směru proudu procentní úbytek na činném odporu  $u_r$  a ve směru kolmém procentní úbytek na rozptylové reaktanci  $u_\sigma$ . Promítnutím indukovaného napětí  $U_i$  do charakteristiky naprázdno se získá velikost magnetického napětí  $F_v$  potřebného k jeho vybuzení. Fázor  $F_v$  se vynese jako kolmice k  $U_i$  a ve směru proudu se k němu přičte magnetické napětí reakce kotvy  $F_a$ . Výsledný fázor se promítne na vodorovnou osu a tak se získá potřebná velikost budícího magnetického napětí stroje. Obr. 1.3 je nakreslen v měřítku a velikosti fázorů odpovídají dříve vypočteným hodnotám.



Obr. 1.3: Grafický postup pro určení budícího magnetického napětí

Budící magnetické napětí (zjištěno grafickým postupem)

$$F_b = 59238 \text{ A}$$

Volíme budící napětí

$$U_b = 100 \text{ V}$$

Odhadnutá střední délka čela budící cívky

$$l_{\check{c}r} = 0,7 \cdot t_p = 0,7 \cdot 1,335 = 0,935 \text{ m} \quad (1.78)$$

Odhadnutá střední délka budící cívky

$$l_{bs} = 2(L + l_{\check{c}r}) = 2(2,24 + 0,935) = 6,35 \text{ m} \quad (1.79)$$

Průřez budícího vinutí

$$S'_{cub} = \rho_{Cu} \cdot \frac{2p \cdot l_{bs} \cdot F_b}{U_b} = \frac{1}{56} \cdot \frac{2 \cdot 6,35 \cdot 59238}{100} = 134,34 \text{ mm}^2 \quad (1.80)$$

zvolen nejbližší vyšší **vyráběný** rozměr vodiče 5,5 x 25 mm o **průřezu**  $S_{Cub} = 136,3 \text{ mm}^2$

Zvolena proudová hustota budícího vinutí

$$\sigma_{Cub} = 3,5 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$$

Tomu odpovídá budící proud

$$I_b = \sigma_{Cub} \cdot S_{Cub} = 477,05 \text{ A} \quad (1.81)$$

Počet závitů budící cívky

$$N_b = \frac{F_b}{I_b} = \frac{59238}{477,05} = 124 \quad (1.82)$$

Na každém pólu je navinutých 12 drážek o rozteči  $\frac{1}{36}$  obvodu rotoru, zbylou část obvodu tvoří široký zub (pól) rotoru. Drážková rozteč rotoru je tedy:

$$t_{dr} = \frac{\pi \cdot D_r}{36} = \frac{\pi \cdot 786}{36} = 68,6 \text{ mm} \quad (1.83)$$



Jelikož je první drážka vedle širokého zubu navržena méně hluboká než ostatní drážky, musí tomu odpovídat počet závitů. Proto bude v první drážce navinuto 19 závitů a ve zbývajících pěti 21 závitů. Toto rozložení závitů pak odpovídá celkovému počtu závitů ( $19 + 5 \cdot 21 = 124$ ). V následující tabulce je znázorněno uspořádání vodičů v drážkách včetně izolace a vyložení drážek. Záporná vůle je dána pružnou deformací vložky pod klín a velice těsným uložením vodičů v drážce. Obě drážky nakonec vyšly o něco hlubší oproti předpokladu. Veškeré rozměry jsou uvedeny v milimetrech.

Položka	Šířka	Hloubka	
		První drážka	Ostatní drážky
Izolace proti železu	2 · 0,76 → 1,52	0,76	0,76
Izolace mezi závitů	-	18 · 0,37 → 6,66	20 · 0,37 → 7,4
Σ izolace	1,52	7,42	8,16
Holý vodič	25	5,5 · 19 → 104,5	5,5 · 21 → 115,5
Vložka na dno	-	2	2
Vložka pod klín	-	5	5
Vůle	2 · 0,24 → 0,48	-0,42	-0,66
Hloubka drážky bez klínu	-	118,5	130
Klín + můstek	-	10	10
<b>Celkový rozměr drážky</b>	<b>27</b>	<b>128,5</b>	<b>140</b>

Tab. 1.6: Uspořádání vodičů a izolace v rotorových drážkách

Elektrický odpor vinutí při 20°C:

$$R_{b/20} = \rho_{Cu} \cdot \frac{2p \cdot l_{bs} \cdot N_b}{S_{Cub}} = \frac{1}{56} \cdot \frac{2 \cdot 6,35 \cdot 124}{136,3} = 0,206 \Omega \quad (1.84)$$

Elektrický odpor vinutí při 75°C:

$$R_{b/75} = 1,22 \cdot R_{b/20} = 1,22 \cdot 0,206 = 0,251 \Omega \quad (1.85)$$

## 1.6 Ztráty a účinnost

Jouleovy

Ve vinutí statoru

$$\Delta P_{Cu1} = m \cdot R_{1/75} \cdot I_1^2 = 3 \cdot 2,826 \cdot 10^{-3} \cdot 2749,3^2 = 64,077 \text{ kW} \quad (1.86)$$

V budícím vinutí

$$\Delta P_{Cub} = R_{b/75} \cdot I_b^2 = 0,251 \cdot 477,05^2 = 57,283 \text{ kW} \quad (1.87)$$

V železe

Ztrátové číslo plechů

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

měrná hmotnost plechů

$$\rho_{Fe} = 7800 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

V jádře induktu

- hmotnost jádra induktu

$$\begin{aligned} m_{Fej} &= \frac{\pi}{4} \cdot (D_e^2 - D_3^2) \cdot l_e \cdot k_{Fe} \cdot \rho_{Fe} = \\ &= \frac{\pi}{4} \cdot (1,7^2 - 1,094^2) \cdot 1,87 \cdot 0,94 \cdot 7800 = 18232,8 \text{ kg} \end{aligned} \quad (1.88)$$

- ztráty v jádře induktu

$$\begin{aligned} \Delta P_{Fej} &= 1,8 \cdot \Delta p_{Fe} \cdot B_{js}^2 \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} \cdot m_{Fej} = \\ &= 1,8 \cdot 1,8 \cdot 1,39^2 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1,3} \cdot 18232,8 = 114,137 \text{ kW} \end{aligned} \quad (1.89)$$

V zubech induktu

- hmotnost zubů induktu

$$\begin{aligned} m_{Fez} &= Q \cdot z_2 \cdot h_d \cdot l_e \cdot k_{Fe} \cdot \rho_{Fe} = \\ &= 72 \cdot 0,02641 \cdot 0,122 \cdot 1,87 \cdot 0,94 \cdot 7800 = 3180,7 \text{ kg} \end{aligned} \quad (1.90)$$

- ztráty v zubech induktu

$$\begin{aligned}\Delta P_{Fez} &= 2 \cdot \Delta p_{Fe} \cdot B_{z2}^2 \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} \cdot m_{Fez} = \\ &= 2 \cdot 1,8 \cdot 1,59^2 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1,3} \cdot 3180,7 = 28,948 \text{ kW}\end{aligned}\quad (1.91)$$

### Povrchové

$$\begin{aligned}\Delta P_p &= \frac{2}{3} \cdot \frac{\pi}{2} \cdot D_1 \cdot L \cdot k_0 \cdot \left(\frac{Q \cdot n}{10000}\right)^{1,5} \cdot (t_{d1} \cdot \beta \cdot 1000 \cdot B_\delta \cdot k_c)^2 = \frac{2}{3} \cdot \frac{\pi}{2} \cdot 0,85 \cdot \\ &\cdot 2,24 \cdot 23,3 \cdot \left(\frac{72 \cdot 3000}{10000}\right)^{1,5} \cdot (0,037 \cdot 0,05 \cdot 1000 \cdot 0,93 \cdot 0,868)^2 = 9,617 \text{ kW}\end{aligned}\quad (1.92)$$

kde  $k_0 = 23,3$  a  $\beta = 0,05$  jsou činitele povrchových ztrát pro masivní ocel

### Mechanické

- obvodová rychlost rotoru

$$v = \frac{\pi \cdot D_r \cdot n}{60} = \frac{\pi \cdot 0,786 \cdot 3000}{60} = 123,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}\quad (1.93)$$

- mechanické ztráty

$$\Delta P_m = A_m \cdot v^{2,5} \cdot D_r \cdot \sqrt{L} = 0,7 \cdot 123,5^2 \cdot 0,786 \cdot \sqrt{2,24} = 159,515 \text{ kW}\quad (1.94)$$

kde  $A_m = 0,8$  je koeficient mechanických ztrát

### Přídavné

Přídavné ztráty se odhadují jako 3% zdánlivého výkonu

$$\Delta P_{přid} = 0,003 \cdot S = 0,003 \cdot 30 \cdot 10^6 = 90 \text{ kW}\quad (1.95)$$

### Celkové

$$\begin{aligned}\Delta P &= \Delta P_{Cu1} + \Delta P_{Cub} + \Delta P_{Fej} + \Delta P_{Fez} + \Delta P_p + \Delta P_m + \Delta P_{přid} = 64,077 + \\ &+ 57,283 + 114,137 + 28,948 + 9,617 + 159,515 + 90 = 523,577 \text{ kW}\end{aligned}\quad (1.96)$$

### Účinnost

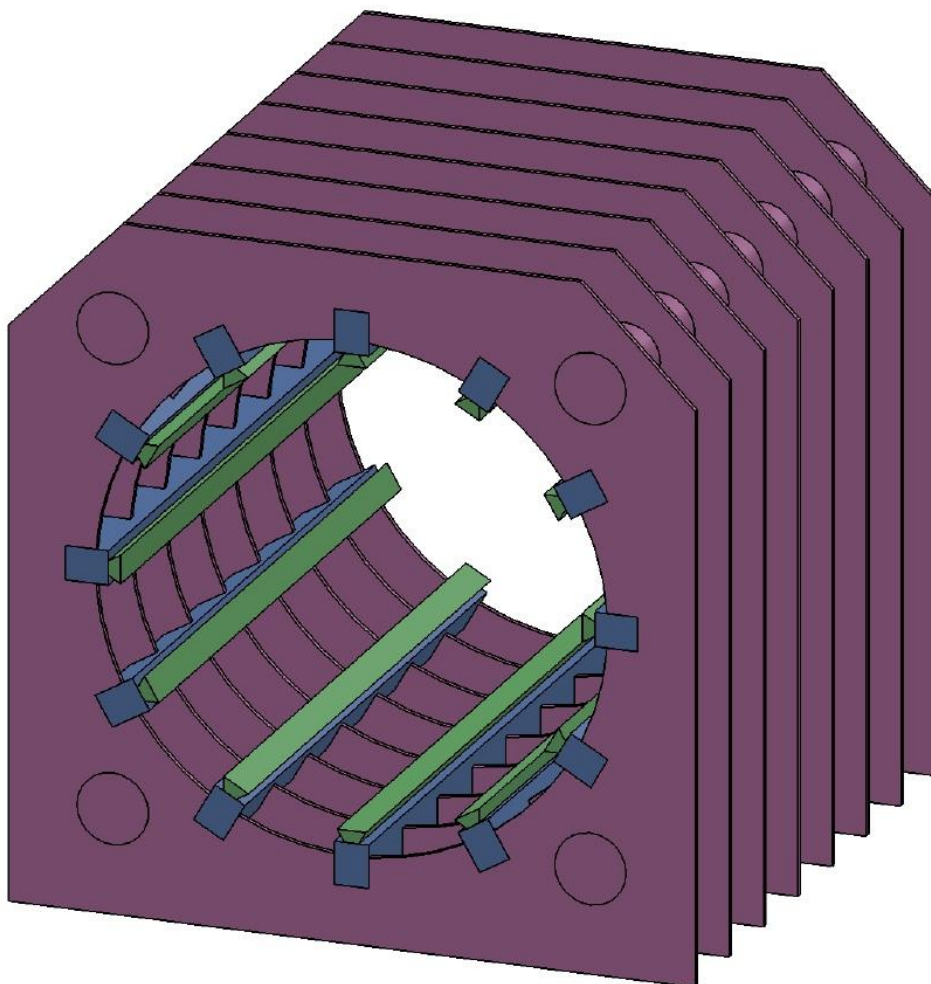
$$\eta = 100 \cdot \left(1 - \frac{\Delta P}{P + \Delta P}\right) = 100 \cdot \left(1 - \frac{523,577}{24000 + 523,577}\right) = 97,865 \%\quad (1.97)$$

## 2 3D model a konstrukční uspořádání stroje

Navrhovaný turboalternátor je koncipován jako uzavřený, vzduchem chlazený stroj s ložiskovými stojany a přírubovým volným koncem hřídele. Tvar kostry a krytu stroje je inspirován sériově vyráběnými generátory od firem SIEMENS [7] a BRUSH TURBOGENERATORS [8]. Níže jsou zobrazeny 3D modely jednotlivých částí stroje vytvořené na základě elektromagnetického návrhu v programu SolidWorks 2010.

### 2.1 Kostra

Kostra je tvořena deskami, které jsou navzájem pospojovány podélnými trámcí. K trámcům jsou pak přivařena pravítka, na která se skládá plechový svazek statoru.



Obr. 2.1: Kostra navrhovaného stroje

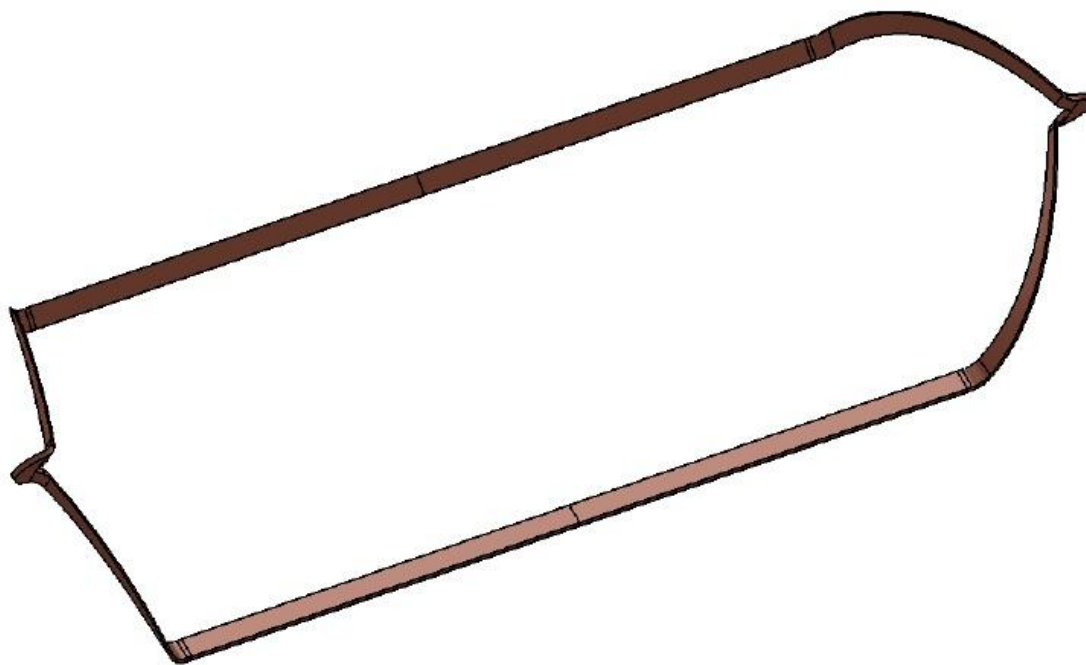
## 2.2 Stator

Plechový svazek induktu je rozdělen na pakety mezi kterými jsou vytvořeny radiální ventilační kanály široké 10 mm. Šířka šesti paketů uprostřed induktu je 45 mm, šířka ostatních paketů je potom 50 mm. Tím je dosaženo požadované efektivní délky železa ( $l_e = 6 \cdot 0,045 + 32 \cdot 0,05 = 1,87 \text{ m}$ ). Menší šířka prostředních paketů je zvolena s ohledem na zvýšenou potřebu odvodu tepla ze střední části stroje.



Obr. 2.2: Plechový svazek induktu rozdělený na pakety

Jak je uvedeno ve výpočtu odporu a rozptylové reaktance statorového vinutí, rozměry čel kuželového vinutí je velice obtížné spočítat. Níže uvedené modely se proto rozměrově nezakládají na reálných výpočtech a slouží spíše pro ilustraci skutečné podoby statorového vinutí dvoupólových strojů. Na Obr. 2.3 je zobrazena samostatná cívka, na Obr. 2.4 pak celé vinutí induktu.

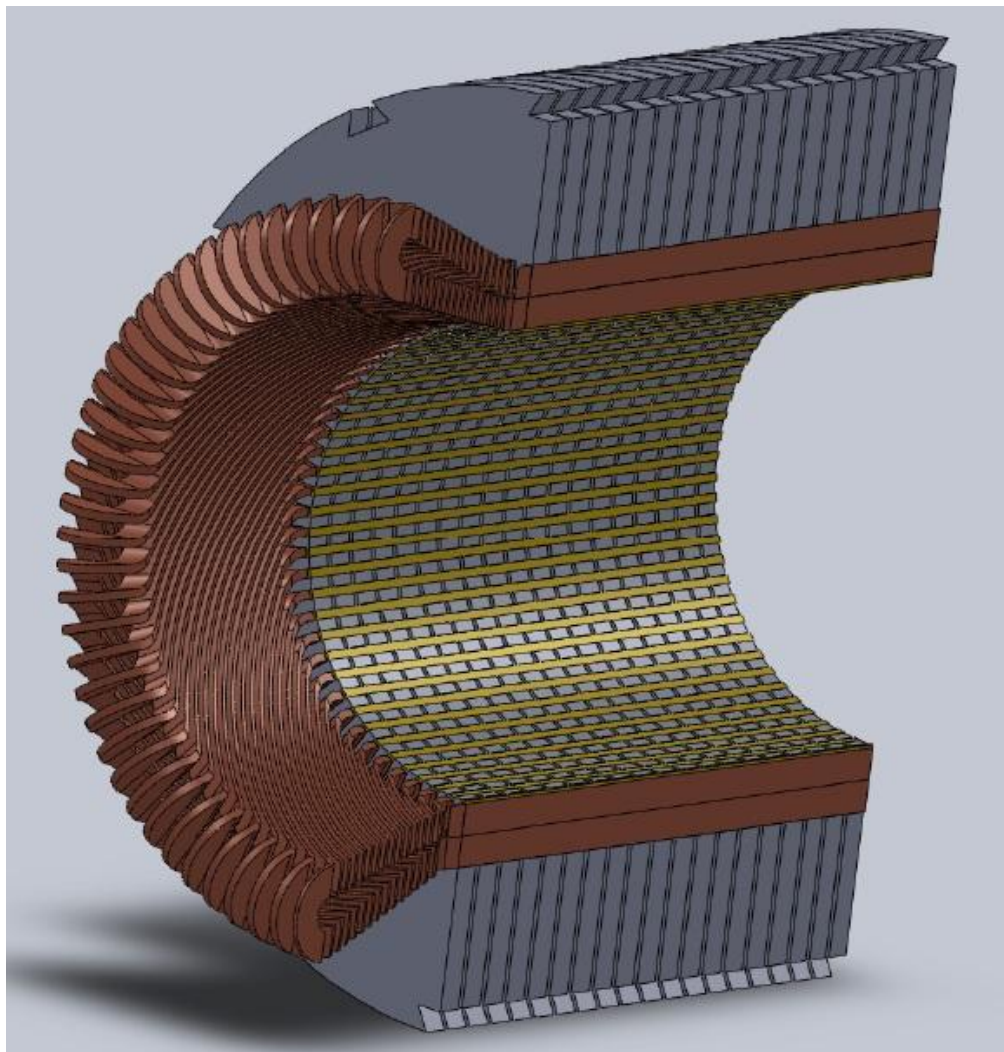


*Obr. 2.3: Cívka statoru*



*Obr. 2.4: Kuželové vinutí induktu*

Na následujícím obrázku je zachycena navinutá část statoru. Vinutí je uloženo v drážkách a zajištěno drážkovými klíny. Drážkové klíny se vyrábějí z vrstvených materiálů (např. sklotextit nebo texgumoid).

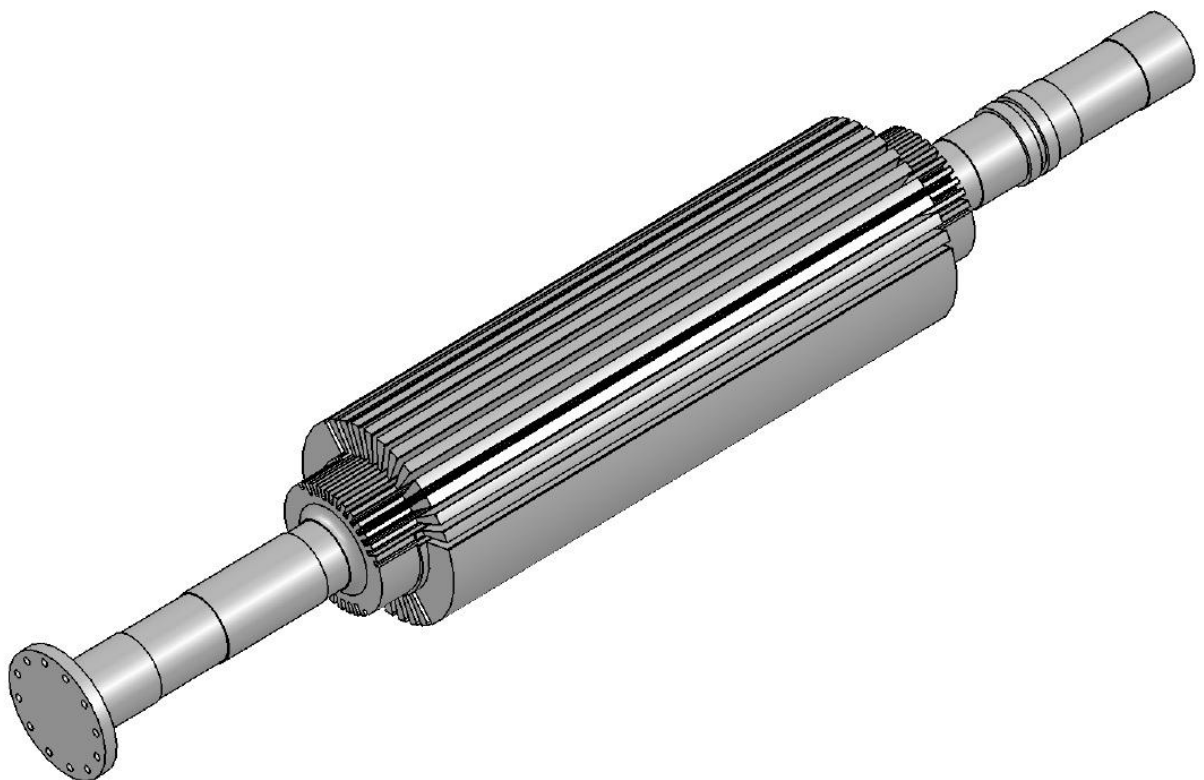


*Obr. 2.5: Navinutá část statoru*

## 2.3 Rotor

Rotor je vykován z chromniklové oceli, která obsahuje další přísady pro zajištění lepších mechanických, ale i magnetických vlastností. Výkovek je poté osoustružen na požadované rozměry. Budící vinutí je uloženo v drážkách vyfrézovaných na dvou třetinách obvodu rotoru. Tyto drážky nejsou normalizovány a jejich rozměry závisí na rozměrech budícího vinutí. Zbylou třetinu odvodu tvoří takzvaný široký zub rotoru, který slouží jako pól a uzavírá se jím hlavní magnetický tok. Na hřídeli jsou vytvořeny také čepy kluzných ložisek a místa pro uložení ventilátorů. V pravé části hřídele jsou patrné sběrací kroužky, levý konec je zakončený přírubou, která slouží ke spojení s hnacím zařízením. Malý průměr hřídele je vypočtený podle vztahu (2.1).

$$d_H = 0,135 \cdot \sqrt[3]{\frac{P[kW]}{n}} = 0,135 \cdot \sqrt[3]{\frac{24000}{3000}} = 0,27 \text{ m} \quad (2.1)$$

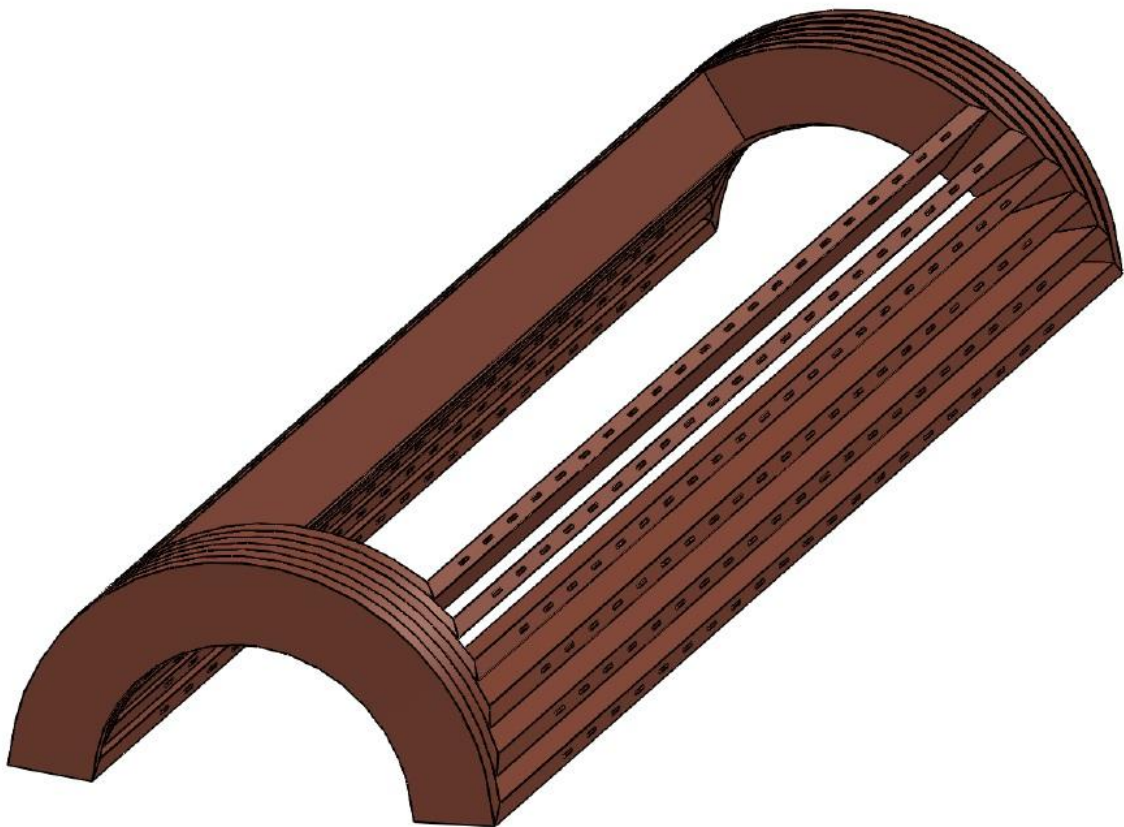


Obr. 2.6: Rotor turboalternátoru

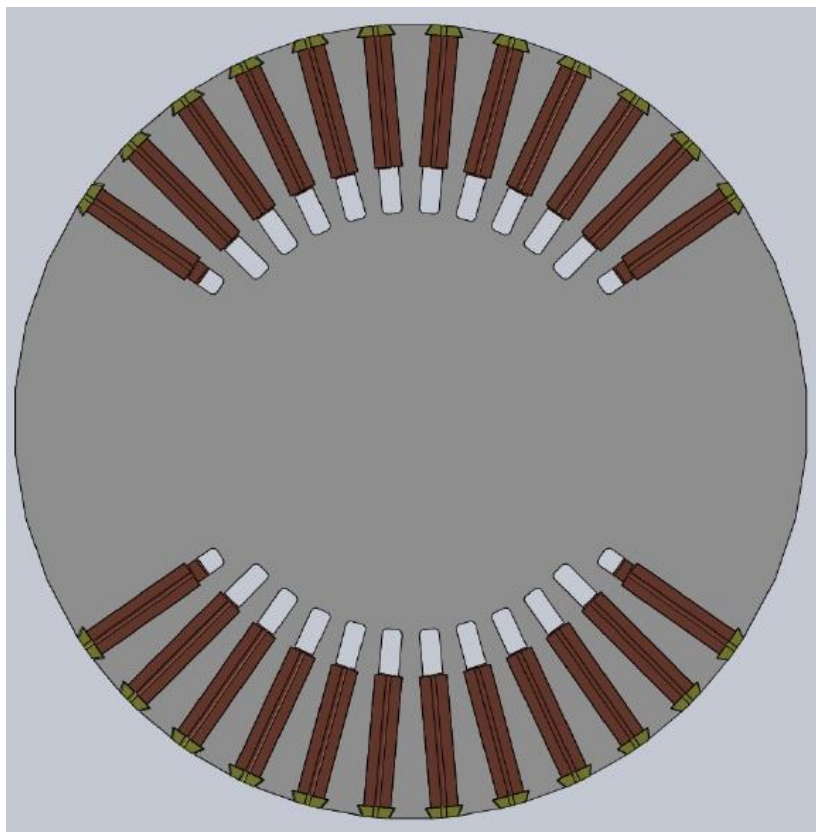


Budící vinutí je koncentrické s čely uloženými na válcové ploše. To znamená, že každá cívka má jiný rozměr. To je dobře patrné na Obr. 2.7, kde se nachází vinutí pro jeden pól stroje. V drážkové části vinutí jsou ve vodičích vyraženy otvory, kterými proudí chladicí vzduch z poddrážkových kanálů. Vinutí je proti odstředivým silám zajištěno drážkovými klíny, které jsou vyrobeny z bronzu a slouží zároveň jako tyče tlumiče. Kruhy tlumiče jsou pak tvořeny ocelovými bandážemi čel vinutí, které dosedají i na drážkové klíny.

Na Obr. 2.8 je vidět řez tělem rotoru. V řezu jsou vidět poddrážkové chladicí kanály, uložení vinutí v drážkách, jeho zajištění drážkovými klíny a chladicí otvory vyražené jak ve vodičích, tak v klínech.

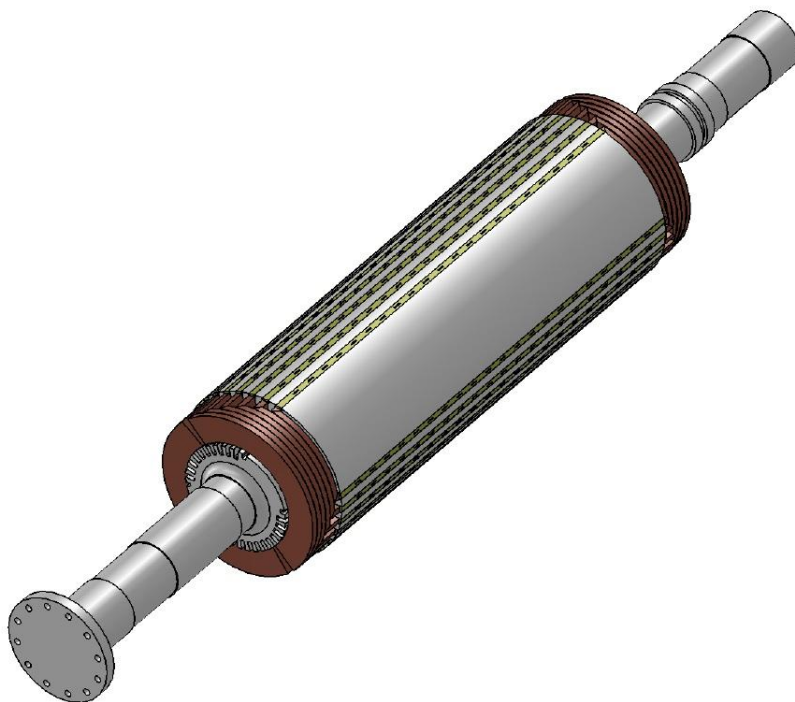


*Obr. 2.7: Budící vinutí turboalternátoru pro jeden pól*

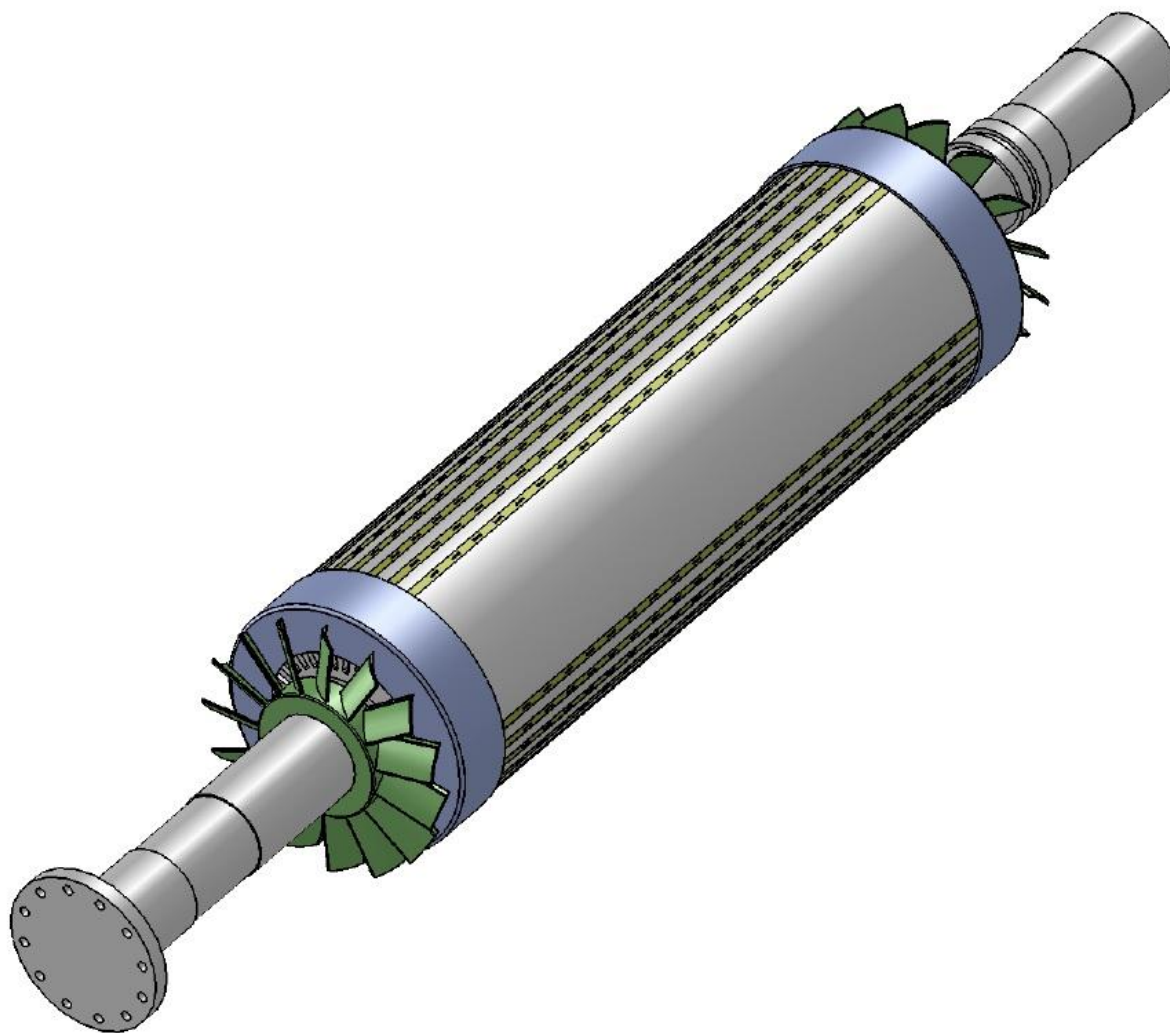


Obr. 2.8: Řez tělem rotoru

Na následujících obrázcích je vidět navinutý rotor bez dalších součástí (Obr. 2.9) a plně sestavený rotor včetně bandáží čel a dvou axiálních ventilátorů (Obr. 2.10).



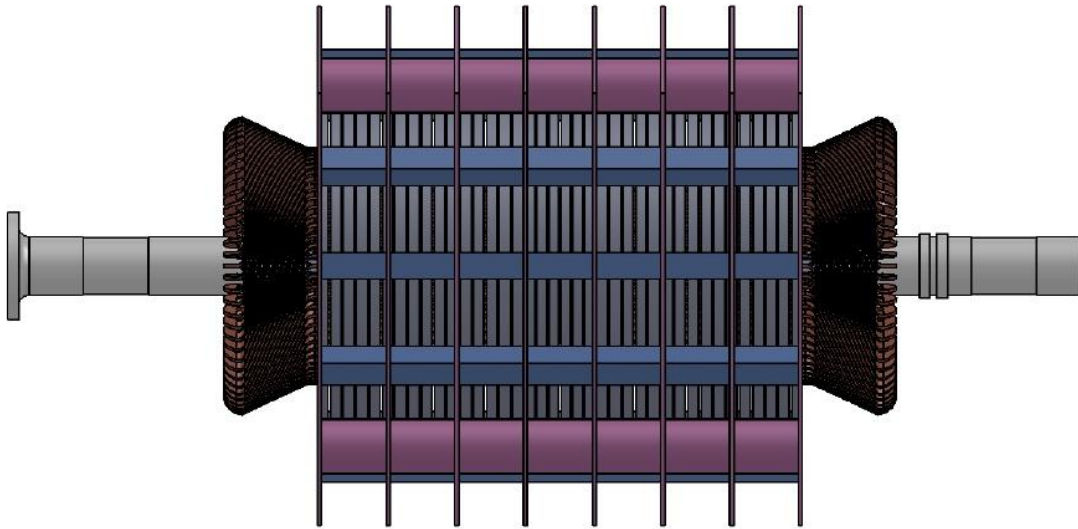
Obr. 2.9: Navinutý rotor, vinutí zajištěno drážkovými klíny



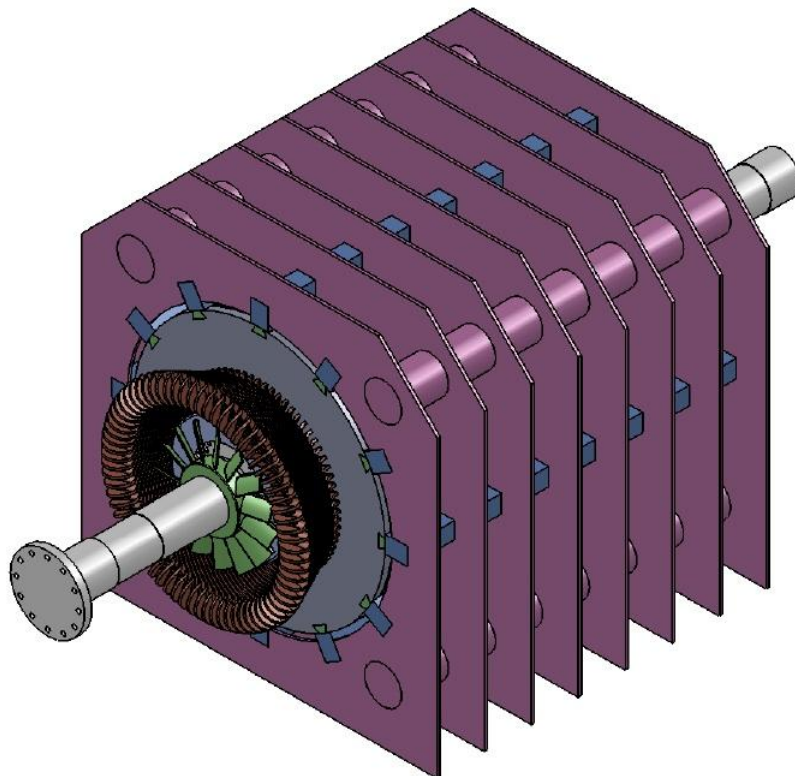
*Obr. 2.10: Plně sestavený rotor*

## 2.4 Sestavy

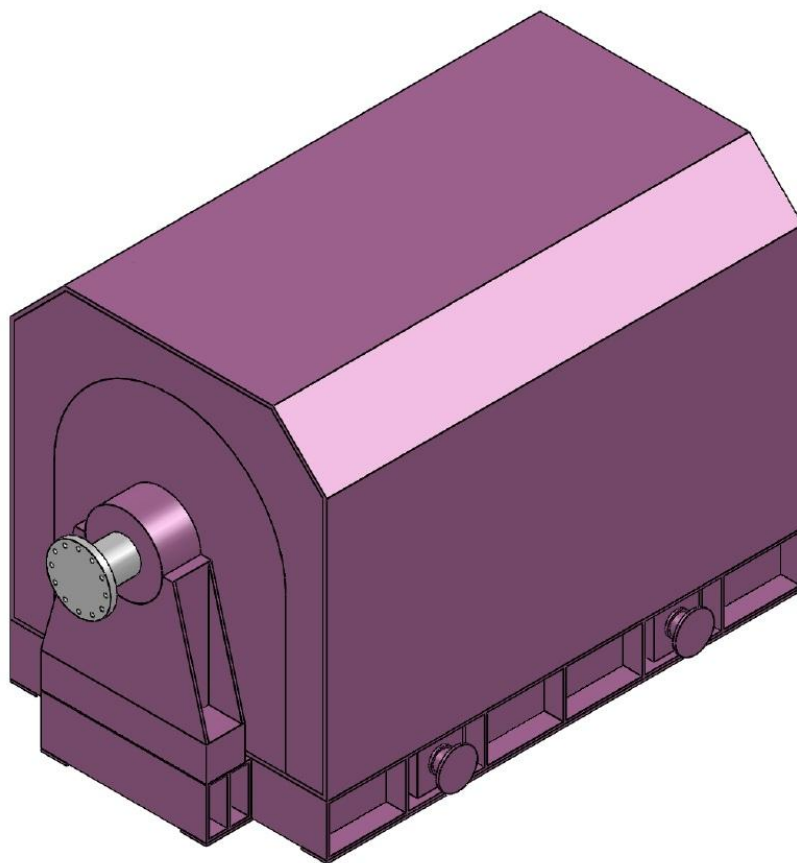
V této kapitole jsou zobrazeny sestavy celého stroje. Nejprve sestava kostry, statoru a rotoru v bočním a izometrickém pohledu (Obr. 2.11 a Obr. 2.12), poté sestava celého stroje včetně krytu, ložiskových stojanů a základové desky (Obr. 2.13 a Obr. 2.14).



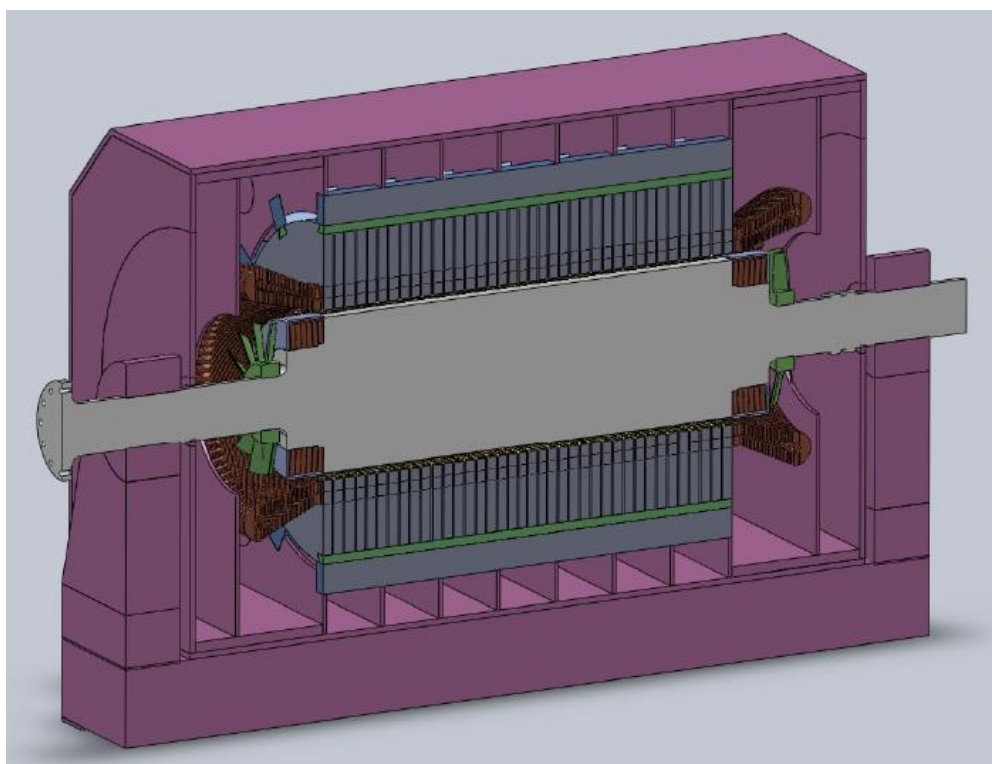
Obr. 2.11: Sestava stroje bez krytu - boční pohled



Obr. 2.12: Sestava stroje bez krytu - izometrický pohled



Obr. 2.13: Celková sestava stroje



Obr. 2.14: Celková sestava stroje v řezu

## Závěr

Elektromagnetický návrh provedený v kapitole 1 je oproti návrhům prováděným v praxi poněkud zjednodušený. V praxi se v současné době používá programů vytvořených speciálně pro návrh daného typu stroje. Tyto programy si často vytváří každý podnik sám na základě vlastních zkušeností a potřeb. Patří tak mezi firemní know - how. Podstatou této práce je však pochopení a názorná ukázka postupu návrhu synchronního stroje s hladkým rotorem. Proto je výše uvedený postup naprosto dostačující a jsou z něj dobře patrné vztahy mezi jednotlivými elektromagnetickými veličinami a rozměry stroje.

Konstrukční uspořádání stroje vychází z klasické koncepce vzduchem chlazených turboalternátorů malých a středních výkonů. Jak již bylo řečeno, tvar krytu a dalších vnějších prvků jako jsou ložiskové stojany a základová deska je inspirován stroji vyráběnými v současnosti.

Model stroje vytvořený v programu SolidWorks 2010, je také částečně zjednodušený. Nejsou zde například nakresleny povrchové drážky pro přívod budícího proudu od kroužků, konzoly pro uchycení čel statorového vinutí a podobně. S ohledem na hardwarový výkon použité počítačové sestavy není v modelu zakreslena ani izolace vinutí a vyložení drážek. Celou drážku tak vyplňují pouze vodiče a drážkové klíny.

Součástí práce není tepelný ani ventilační výpočet, proto jsou rozměry poddrážkových kanálů rotorového vinutí pouze odhadnuty na základě návrhu stroje podobného výkonu provedeného v [2]. Také rozměry a tvar lopatek axiálních ventilátorů a chladících otvorů v budícím vinutí jsou odhadnuty.

Tato zjednodušení ovšem nijak výrazně neovlivňují celkovou podobu modelu. Pro ilustraci konstrukčního uspořádání skutečného stroje jsou tedy výše uvedené modely dostačující.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] ČERVENÝ, Josef: *Stavba elektrických strojů 1 a 2*. Plzeň, Přednáškové texty FEL ZČU, 2010/2011
- [2] CIGÁNEK, Ladislav: *Stavba elektrických strojů*. Praha, SNTL, 1958
- [3] LIST, Vladimír, HAK, Josef, a kolektiv: *ELEKTROTECHNIKA II, Elektrické stroje - část 1*, Praha, SNTL, 1969
- [4] KOPYLOV, Igor Petrovič, a kolektiv: *Stavba elektrických strojů*, Praha, SNTL, 1988
- [5] BARTOŠ, Václav: *Teorie elektrických strojů*, Plzeň, ZČU, 2006, ISBN 80-7043-509-7
- [6] DOSTÁL, Jiří: *Návrh turboalternátoru*, Plzeň, Diplomová práce FEL ZČU, 2011
- [7] Firma SIEMENS, *Produktový katalog turboalternátorů řady SGen-100A-2P Series*
- [8] Firma BRUSH TURBOGENERATORS, *Produktový katalog turboalternátorů řady DAX 10*

## Přílohy

### Seznam příloh

Příloha č. 1: Rozměry drážek M,W,U, zdroj [1]

Příloha č. 2: Nomogram - Carterův činitel respektující vliv drážkování induktu, zdroj [1]

Příloha č. 3: Nomogram k určení skutečné indukce v zubech induktu, zdroj [1]

Příloha č. 4: Magnetizační charakteristika dynamových plechů tloušťky 0,5 mm, zdroj [1]

Příloha č. 5: Magnetizační charakteristika konstrukční oceli, zdroj [1]

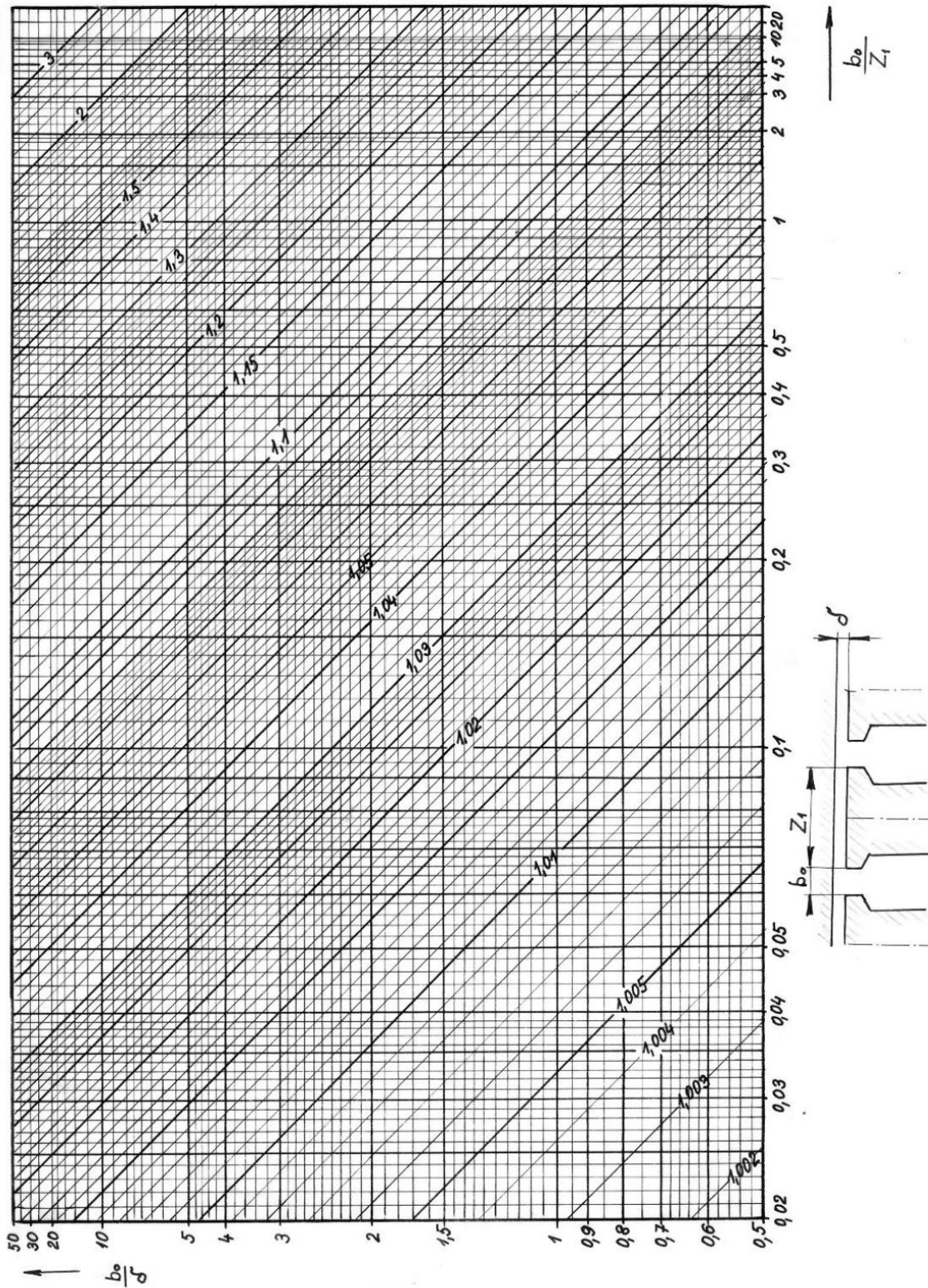


## Příloha č. 1

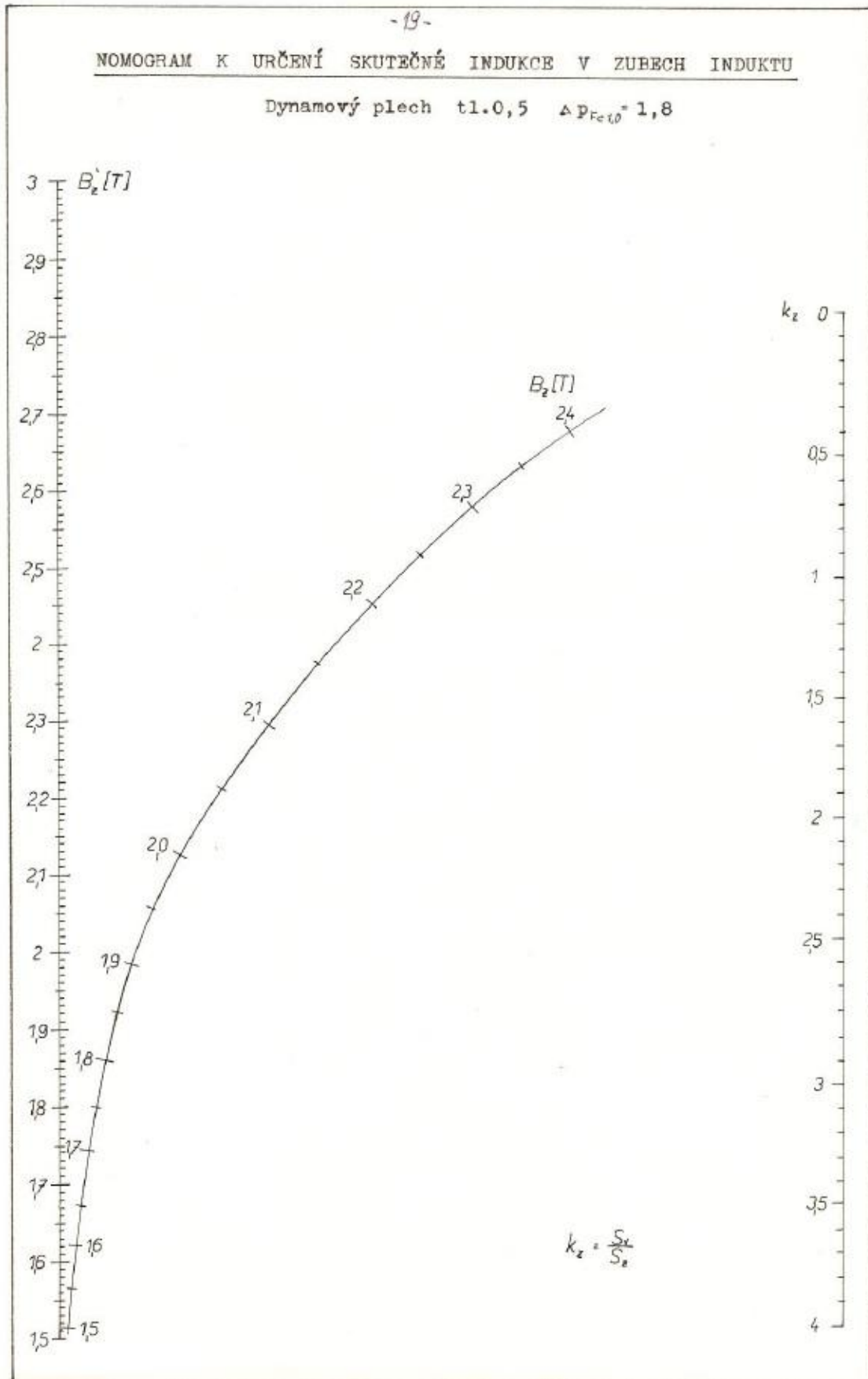
Drážka M'					Drážka W						Drážka U
$b_1$	$h_0$	$h_1$	$x_1$	$\lambda_e$	$b_1$	$b_0$	$h_0$	$h_1$	$u$	$\lambda_e$	$b_1$
5	0,7	3,5	1,2	0,704	4	2,2	0,5	0,90	1,50	0,561	1,4
5,2		3,3	1,1	0,658	4,2			1,00	1,40	0,587	1,5
5,5		3,6	1,2	0,664	4,4	2,5		0,95	1,55	0,516	1,6
5,8		3,5	1,2	0,621	4,6			1,05	1,45	0,540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

Příloha č. 2

CARTERŮV ČINITEL NA DRÁŽKOVÁNÍ

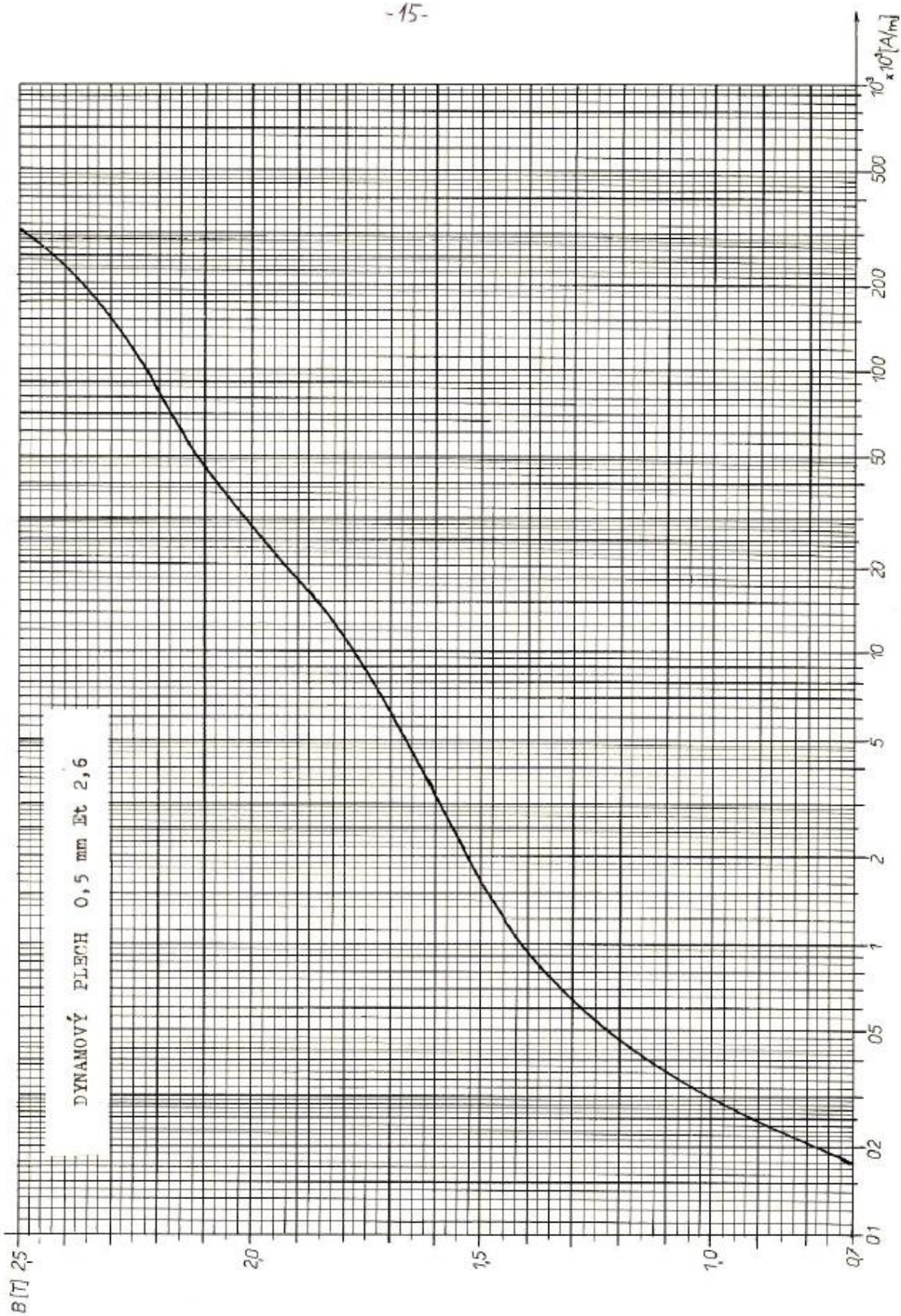


Příloha č. 3



Příloha č. 4

-15-



Příloha č. 5

