



Fakulta elektrotechnická  
Katedra elektroenergetiky a ekologie

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

Návrh synchronního generátoru vhodného pro použití v jaderné  
elektrárně

Autor práce: Luděk Grešl  
Vedoucí práce: Ing.Pavel Světlík

Plzeň 2016

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2015/2016

**ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**  
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Luděk GREŠL**  
Osobní číslo: **E13N0022K**  
Studijní program: **N2644 Aplikovaná elektrotechnika**  
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**  
Název tématu: **Návrh synchronního generátoru vhodného pro využití v jaderné elektrárně**  
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

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

1. Prostudujte a popište koncepty návrhu na rozšíření jaderné elektrárny Temelín.
  2. Pro zvolený koncept vytvořte elektromagnetický návrh synchronního generátoru včetně tepelného výpočtu.
  3. Vytvořte konečně - prvkový model navrženého generátoru a proveďte simulaci magnetického obvodu.
-

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **30 - 40 stran**

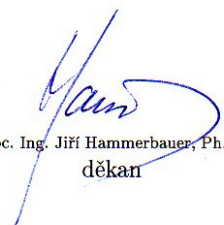
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:


1. Kopylov, I., P.: **Stavba elektrických strojů, SNTL/MIR, 1988**
2. Pyrhönen, J., Jokinen, T., Hrabovcová, V.: **Design of rotation electrical machines, John Wiley & Sons, Ltd, 2008**
3. **Internetové zdroje**

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Pavel Světlík**  
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2015**  
Termín odevzdání diplomové práce: **16. května 2016**

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



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

V Plzni dne 15. října 2015

## Abstrakt

Práce se zabývá návrhem synchronního generátoru, který by byl vhodný pro použití v novém bloku JE Temelín. Součástí návrhu je elektromagnetický výpočet a tepelný výpočet. Výsledky výpočtů jsou ověřeny pomocí koncového modelu ve speciálním SW.

## Klíčová slova

synchronní stroj, synchronní generátor, turboalternátor, elektromagnetický výpočet, tepelný výpočet, návrh synchronního generátoru

## Abstract

Grešl, Luděk. *Design of synchronous generator suitable for using at the nuclear power plant [Návrh synchronního generátoru vhodného pro využití v jaderné elektrárně ]*. Pilsen 2016.

Master thesis (in Czech). University of West Bohemia. Faculty of Electrical Engineering. Department of Electrical Power Engineering and Ecology. Supervisor: Ing. Pavel Světlík

This diploma thesis is focused on a design of the synchronous generator suitable for using at the new block of the nuclear power plant Temelín (Czech Rep.).

The design including the electromagnetic calculation and thermal calculation of this generator. The results are checked by the simulation at the special SW.

## Keywords

Synchronous machine, synchronous generator, turbo-alternator, electromagnetic calculation, thermal calculation, design of synchronous 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 bakalářské práce. Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této práce, je legální.

V Plzni dne .....

Luděk Grešl

.....

## Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu práce, panu Ing. Pavlu Světlíkovi, za rady, konzultace a metodické vedení při vytváření této práce.

# Obsah

Seznam symbolů a zkratk.....	6
1. Úvod.....	8
1.1. Význam a použití synchronních strojů.....	8
1.2. Jaderná elektrárna Temelín.....	9
1.3. Možnosti rozšíření JE Temelín – reaktory.....	10
2. Elektromagnetický výpočet.....	12
2.1. Výpočet hlavních parametrů stroje.....	12
2.2. Návrh vinutí induktoru - statoru.....	13
2.2.1. Parametry vinutí.....	14
2.2.2. Návrh drážky.....	15
2.2.3. Odporová a rozptylová reaktance statorového vinutí.....	17
3. Návrh magnetického obvodu.....	21
3.1. Dimenzování magnetického obvodu.....	22
3.2. Charakteristika naprázdno.....	23
3.3. Návrh budícího vinutí.....	29
4. Ztráty a účinnost.....	31
4.1. Ztráty.....	31
4.2. Účinnost.....	32
5. Tepelný výpočet.....	33
5.1. Chlazení synchronních strojů s hladkým rotorem.....	34
6. Prvkový model (simulace mag. obvodu).....	39
7. Závěr.....	40
8. Seznam použité literatury.....	41
Přílohy.....	42
Příloha A: Grafy a monogramy.....	42
Příloha B: Tabulky.....	46



## Seznam symbolů a zkratk

Symbol	Název	Jednotka
$k_c$	Carterův činitel	-
$y$	cívkový krok	-
$A_m$	činitel mechanických ztrát	-
$\xi_{rk}$	činitel odporu vstupu vzduchu do drážkových kanálků	-
$\varepsilon$	činitel typu vinutí	-
$k$	činitel, konstanta	-
$P$	činný výkon	W
$C_1$	deformační činitel průběhu magnetické indukce ve vzduchové mezeře	-
$L, l$	délka	m
$o$	délka oka čela	m
$U$	elektrické napětí	V
$R$	elektrický odpor	$\Omega$
$I$	elektrický proud	A
$C$	Essonův činitel elektromagnetického využití	$\text{kVA} \cdot \text{min} \cdot \text{m}^{-3}$
$f$	frekvence	Hz
$m$	hmotnost	kg
$d_h$	hydraulický průměr	m
$H$	intenzita magnetického pole	$\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$
$\nu$	kinematická vazkost vzduchu	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
$B$	magnetická indukce	T
$F$	magnetické napětí	A
$\Phi$	magnetický tok	$\text{V} \cdot \text{s}^{-1}$
$m'$	matematický počet fází	-
$\rho$	měrná hmotnost	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
$c_v$	měrné objemové teplo vzduchu	$\text{W} \cdot \text{s} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$
$\rho_{Cu}$	měrný elektrický odpor vodiče při 20°C	$\Omega \cdot \text{m}^{-1}$
$\xi$	náhradní výška vodiče	m
$Nu$	Nusseltovo číslo	-
$A$	obvodová proudová hustota	A/m
$u$	obvodová rychlost motoru	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
$n$	otáčky	$\text{min}^{-1}$
$\Delta\theta$	oteplení	K
$S$	plocha	$\text{m}^2$
$N, n$	počet	-
$q$	počet drážek na pól a fázi	-
$Q$	počet drážek statoru	-
$m$	počet fází	-

a	počet paralelních větví	-
p	počet pólů	-
i	počet, index	-
$\gamma_g$	poměrná hodnota rozptylového magnetického toku	-
x	poměrná reaktance	-
$\beta$	poměrné krácení kroku vinutí	-
$\sigma$	proudová hustota	A.m <sup>-2</sup>
D	průměr	m
u	průměrná hodnota úbytku napětí	-
Q	průtok	m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup>
X	reaktance	$\Omega$
Re	Reynoldsovo číslo	-
t	rozteč	m
v	rychlost	m.s <sup>-1</sup>
$\nu$	řád harmonické	-
$\alpha$	součinitel přestupu tepla	W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup>
$\lambda$	součinitel tepelné vodivosti	W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>
b	šířka	m
š	šířka	m
z	šířka zubu	m
R	tepelný odpor	k.W <sup>-1</sup> .m <sup>-1</sup>
$\theta$	teplota	°C
$\Delta p_r$	tlak vyvolaný otáčením rotoru	Pa
$\cos \varphi$	účinník	-
$\eta$	účinnost	-
$\alpha_i$	úhel sklonu čel	°
$\delta$	velikost vzduchové mezery	m
v	výběh čela vinutí z drážky	m
E	vyložení čel	m
h	výška, hloubka	m
c	vzdálenost mezi čely	m
S	zdánlivý výkon	VA
$\Delta p_{Fe}$	ztrátové číslo plechů	W.kg <sup>-1</sup>
$\Delta P$	ztrátový výkon	W

# 1. Úvod

## 1.1. Význam a použití synchronních strojů

Elektrické stroje slouží obecně pro přeměnu elektrické energie na mechanickou a naopak. V dnešní době se využívají především k přeměně energie mechanické na elektrickou a z hlediska této přeměny se řadí mezi nejdůležitější. Takto funkčně koncipované synchronní generátory nazýváme také alternátory. Nejčastěji se jedná o třífázové provedení, a to z důvodu použití třífázového rozvodu a distribuce elektrické energie. Dalším důvodem 3f provedení je nutnost vytvoření točivého magnetického pole v motorickém režimu (v čase i prostoru fáze posunutá o  $120^\circ$ ). Výhodou těchto strojů je výroba jak činné, tak jalové složky elektrické energie. Veškeré děje, týkající se přeměny energií v el. strojích jsou založené na principu elektromagnetické indukce.

S rozvojem polovodičové řídicí techniky a mikroprocesorů nacházejí synchronní stroje uplatnění i jako pohony. Synchronní motory se vyznačují velice dobrým účínkem, dají se použít v aplikacích požadující velké výkony. To je však vykoupeno obtížnou regulací otáček a samotným spouštěním motoru.

Synchronní stroje lze rozdělit do charakteristických skupin:

- |                       |                                |
|-----------------------|--------------------------------|
| podle způsobu buzení  | - elektricky buzené            |
|                       | - buzené permanentními magnety |
| podle aplikace        | - průmyslové                   |
|                       | - trakční                      |
| podle tvaru rotoru    | - s hladkými póly              |
|                       | - s vyniklými póly             |
| podle způsobu provozu | - motor/generátor              |
|                       | - kompenzátor                  |

Alternátory, které jsou poháněny v tepelných elektrárnách turbínami, jsou z pravidla velkého výkonu – otáčky se pohybují v hodnotách 3000 ot./min. Pro tyto účely se používají stroje s hladkým rotorem, jinak nazývané turboalternátory. Důvod je ten, že vzhledem k relativně malému poloměru při těchto otáčkách působí menší odstředivé síly na

mechanickou soustavu. Stroje s vyniklými póly – hydroalternátory najdou své využití v aplikacích s menšími požadavky na rychlost otáčení, bývají poháněné vodními turbínami ve vodních elektrárnách. Jestliže se hydroalternátory otáčejí pomaleji než turboalternátory, musí být k dosažení dané výstupní frekvence použito větší množství budících cívek.

## 1.2. Jaderná elektrárna Temelín

Jaderná elektrárna Temelín (dále jen JET) je v současné době elektrárna s největším instalovaným výkonem, v české republice. Výstavba začala roku 1982 a roku 2002 byla dokončena stavba druhého bloku, z původně plánovaných čtyř. Původní výkon každého z bloků byl 1000MWe. Po rekonstrukci stoupl výkon bloků na 1055MWe. Koeficient ročního využití elektrárny dosahuje hodnot 85%.

JET je prozatím vybavena dvěma tlakovodními reaktory. Každý z těchto reaktorů má nominální tepelný výkon 3100 MWt. Generátor se skládá z parní turbíny, elektrického generátoru, budiče a pomocného budiče. Vyrobená elektřina je blokovými transformátory transformována na napětovou úroveň 400kV (z původní hodnoty 24kV).

Náklady na stavbu prvních dvou bloků byly přibližně 98 mld. korun českých, což znamená investiční náklady přibližně 50 000 Kč/kW. Čistě ekonomická návratnost investice je odhadována na méně než 20 let.

V současné době, kdy jsou významným tématem v oblasti energetiky dvě otázky, a to přístup k energetickým zdrojům a negativní vliv emisí na životní prostředí, je investice do výstavby a rozvoje jaderných elektráren nezbytnou záležitostí.

V červnu, roku 2015 schválila vláda *Národní akční plán rozvoje jaderné energetiky ČR*. V rámci tohoto plánu by měla být neodkladně zahájena výstavba jednoho jaderného bloku v obou dosavadních jaderných elektrárnách na území ČR – Dukovany a Temelín. Tento plán navazuje na koncepci, podle které by mělo být jádro hlavním zdrojem výroby elektrické energie v dalších desetiletích. To by mělo zajistit energetickou soběstačnost našeho státu. Cena stavby jednoho bloku je odhadována cca na 150 mld. Kč.

### **Generátor JET**

Stávající generátory disponují těmito parametry:

Nominální zdánlivý výkon	1 111 MVA
Výkon na svorkách alternátoru	981 MW
Dodávaný výkon do elektrické sítě	912 MW
Účinnost	0,9
Nominální sdružené napětí	24 kV
Nominální fázový proud	26 726 A
Nominální frekvence	50 Hz
Nominální otáčky	3 000 ot/min (otáčky parní turbíny)
Hmotnost	564 t
Chlazení generátoru	vodík - voda
Vlastní spotřeba bloku	69 MW

## **1.3. Možnosti rozšíření JE Temelín – reaktory**

Reaktory typu PWR (Pressurized Water reactor)

### **VVER 1000**

Jedná se o tlakovodní reaktor ruského typu VVER, tento typ patří mezi nejrozšířenější reaktory na světě. Tento typ reaktoru je použit i ve stávajících blocích JE Temelín. Dosavadní reaktory nesou označení VVER 1000 typ 320, jehož tepelný výkon je 3 000 MWt. Od dostavby tohoto bloku dostal reaktor určitých konstrukčních změn a vylepšení. Byly vyvinuty modifikace tohoto reaktoru, které vedly k zjednodušení konstrukce a tyto změny by měly vést ke zvýšení aktivní i pasivní bezpečnosti.

Předností těchto reaktorů je jejich velmi dobrá stabilita a bezpečnostní charakteristiky. Z hlediska bezpečnosti je zajímavý záporný teplotní koeficient reaktivity, kdy zvyšování teploty chladiva (moderátoru) vede ke snížení moderačního účinku a tím pádem k útlumu

štěpné reakce. Nevýhodou je to, že na konci roční (jedna a půl roční kampaně) je nutné pro výměnu části paliva reaktor kompletně odstavit a aktivní zónu přeskládat.

### **MIR 1200 – VVER 1200**

Tlakovodní reaktor, označovaný také jako AES 2006, vyvinutý z VVER 1000. EU licenci získal v roce 2007. Bezpečnostní koncepce tohoto reaktoru je založena na aktivních bezpečnostních prvcích (tj. dieselagregáty, čerpadla) a prvcích pasivních (na základě fyzikálních zákonů a přírodních sil).

První prototypové bloky jsou stavěny v lokalitě Leningrad II (typ 392) a Novoroněž (typ 392M). Celkový tepelný výkon by měl být 3 200 MWt. Účinnost tohoto reaktoru je více než 35% a projektová životnost 50+ let. Stávající reaktory VVER 1 000 mají udávanou životnost 40+ let a účinnost 33%.

### **AP 1000 (sp. Westinghouse)**

Jedná se o standardizovaný tlakovodní reaktor, v EU je licencovaný od roku 2007. Společnost Westinghouse je americká společnost, která se řadí mezi přední dodavatele jaderných technologií.

V případě potíží, v podobě havárií, využívá tento typ reaktoru pasivní bezpečnostní systémy, využívajících fyzikálních zákonů. Nespolehá se tedy na dieselagregáty, čerpadla atd., ale využívá například pohon pomocí expanze stlačeného plynu a gravitaci. Reaktor by se v případě poruchy měl být schopen sám odstavit, bez zásahu operátora a bez potřeby dodávky elektrické energie nebo zapojení zmiňovaných aktivních bezpečnostních prvků.

### **Areva – EPR**

Jedná se o další typ tlakovodního reaktoru. Konstrukčně vychází ze starších typů tlakovodních reaktorů N4 a KONVOI. Certifikát EU má od roku 1999. U tohoto typu reaktoru jsou používány čtyři samostatné bezpečnostní subsystemy, které jsou vzájemně propojeny. Každý tento subsystem dokáže vyřadit reaktor samostatně.

## 2. Elektromagnetický výpočet

Tato kapitola je zaměřena na elektromagnetický výpočet synchronního generátoru. V podstatě se jedná o výpočet hlavních rozměrů stroje, návrh vinutí induktoru a dimenzování magnetického obvodu, budícího vinutí, v závislosti na zadaných parametrech. Zadané hodnoty vycházejí z generátorů, které jsou momentálně v JET použity, v prvních dvou blocích.

### Zadané parametry:

Činný výkon:	1055 MW
Sdružené napětí:	24 kV
Jmenovité otáčky:	3000 ot/min (vychází z jmenovitých otáček turbíny)
Frekvence:	50 Hz
Počet fází:	$m = 3$
Účinník:	0,92
Počet pólů:	$2p = 2$

### 2.1. Výpočet hlavních parametrů stroje

Hodnoty dopočteny podle zadaných parametrů.

Fázové napětí:

$$U_f = \frac{U}{\sqrt{3}} = \frac{24000}{\sqrt{3}} = 13856 \text{ [kV]}$$

Zdánlivý výkon:

$$S = \frac{P}{\cos \varphi} = \frac{1055}{0,92} = 1146,74 \text{ [MVA]}$$

Fázový proud:

$$I_1 = \frac{S}{U_f \cdot \sqrt{3}} = \frac{1146,74 \cdot 10^6}{24000 \cdot \sqrt{3}} = 27586,28 \text{ [A]}$$

Počet pólpárů:

$$p = \frac{60 \cdot f}{n} = \frac{60 \cdot 50}{3000} = 1$$

Průměr induktoru ve vzduchové mezeře (tj. vrtání statoru)

-vypočteme dle empirického vztahu:

$$D_1 = 0,08 \cdot (2p)^{0,625} \cdot S^{0,185} = 0,08 \cdot (2 \cdot 1)^{0,625} \cdot 1146740^{0,185} = 1,63 \text{ [m]}$$

Pro takto velký zdánlivý výkon nebyl nalezen graf závislosti průměru stroje na zdánlivém výkonu. Další výpočet tedy bude vycházet z této hodnoty.

Pro zjednodušení dosazování do vzorců a usnadnění výpočtů **zvolíme** hodnotu  $D_1 = 1,6 \text{ [m]}$ .

Obvodová proudová hustota:

Předběžnou obvodovou proudovou hustotu odhadneme, návrhové tabulky nepočítají s takto výkonnými stroji:

$$A = 120\,000 \text{ A/m}$$

Indukce ve vzduchové mezeře by je odhadnuta přibližně na:  $B = 1,1 \text{ T}$

Pólová rozteč:

$$t_p = \frac{\pi \cdot D_1}{2p} = \frac{\pi \cdot 1,6}{2} = 2,513 \text{ [m]}$$

## 2.2. Návrh vinutí induktoru - statoru

Rozeř mezi drážkové rozteče zvolíme s ohledem na velikost napětí a průměr stroje.

Zvolíme drážkovou rozteč:

$$t_{d1} = 70 \text{ [mm]}$$

Z tohoto údaje vypočteme: počet drážek induktoru

$$Q = \frac{\pi \cdot D_1}{t_{d1}} = \frac{\pi \cdot 1600}{70} = 72$$

počet drážek na pól a fázi

$$q = \frac{Q}{2p \cdot m} = \frac{72}{2 \cdot 3} = 12$$

Předběžný počet drážek závitů jedné fáze v sérii:

$$N_s = \frac{\pi \cdot D_1 \cdot A}{2 \cdot m \cdot I_1}$$

Počet vodičů v drážce:

$$n_d = \frac{a_{st} \cdot N_s}{p \cdot q}$$

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



- zaokrouhlíme na celé číslo:  $n_d = 1$

Skutečný počet závitů jedné fáze v sérii:

$$N_s = \frac{n_d \cdot p \cdot q}{a_{st}}$$

Skutečná odvodová proudová hustota:

$$A = \frac{2 \cdot m \cdot I_1}{\pi \cdot D_1} \cdot N_s \quad [A/m]$$

### 2.2.1. Parametry vinutí

Počet drážek na pól:

$$Q_p = \frac{Q}{2p} = \frac{72}{2} = 36$$

Volíme cívkový krok v počtu drážek:

Ten volíme tak, aby byl co nejnižší podíl páté harmonické složky a co nejvyšší podíl první harmonické složky.

$y_{1d}$

Činitel zkrácení kroku:

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

Krok na komutátoru:

$$y_k = \frac{\varepsilon \cdot K \pm a_{22}}{p}$$

Kroky v počtu cívkových stran:

přední cívkový krok  $y_1 = 2 \cdot u \cdot y_{1d} + 1$

Zadní cívkový krok  $y_2 = 2 \cdot y_k - y_1$

Vinutí střídavé:

počet skupin vinutí  $a_{22} \cdot m$

Počet vinutí v jedné fázi  $\frac{a_{22} \cdot m}{m_1}$

Počet cívek ve skupině  $\frac{Q}{a_{22} \cdot m_1}$

Výpočet činitelů vinutí:

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

Pozn:

činitel základní harmonické:

$$k_{v1} = \sin\left(1\beta\frac{\pi}{2}\right) \frac{\sin 1 \frac{\pi}{m'}}{n \cdot \sin 1 \frac{\pi}{m' \cdot n}}$$

činitele 5, 7, 11, 13 harmonickou dopočteme obdobně. Výsledky jsou uvedeny níže:

$v$	1	5	7	11	13
$k_{vv}$					

Tabulka 2.2.1.1: Činitele vinutí příslušných harmonických

Essenův činitel elektromagnetického využití stroje – skutečná hodnota:

$$C = \frac{\pi^2}{60\sqrt{2}} \cdot A \cdot B_{\delta} \cdot k_{v1} \text{ [kVA} \cdot \text{min} \cdot \text{m}^3\text{]}$$

Efektivní délka stroje:

$$l_s = \frac{S}{C \cdot D_1^2 \cdot n} \text{ [m]}$$

Počet paketů:

$$t = \frac{l_s}{\xi_p}$$

Počet kanálů:

$$i_k = t - 1$$

Celková délka induktoru:

$$L = l_s + \xi_k \cdot i_k \text{ [m]}$$

### 2.2.2. Návrh drážky

Výpočet drážky se provádí v závislosti na typu drážky. Následující výpočty znázorňují návrh drážky ve tvaru M, s Roeblovou tyčí uprostřed.

Šířka zubu:

$$z_1 = \frac{B_{\delta} \cdot t_{d1}}{B'_{z1} \cdot k_{Fe}} \quad [mm]$$

Šířka drážky:

$$b_d = t_{d1} - z_1 \quad [mm]$$

Zvolíme nejbližší normalizovanou drážku naším výpočtům.

Skutečná šířka zubu:

$$z_1 = t_{d1} - b_d \quad [mm]$$

Průřez Roeblovy tyče:

$$S'_{Cu1} = \frac{I_1}{a_{st} \cdot \sigma_{Cu1}} \quad [mm^2]$$

Výšku a šířku holého vodiče zvolíme :

$$\text{výška } h_v = \quad [mm]$$

$$\text{šířka } b_v = \quad [mm]$$

Průřez holého vodiče je tedy:

$$S_1 = h_v \cdot b_v \quad [mm^2]$$

Počet vodičů v jednom sloupci tyče:

$$i = \frac{S'_{Cu1}}{2 \cdot S_1}$$

Skutečný průřez tyče:

$$S_{Cu1} = 2 \cdot i \cdot S_1 \quad [mm^2]$$

Skutečná proudová hustota:

$$\sigma_{Cu1} = \frac{I_1}{a_{st} \cdot S_{Cu1}} \quad [A/m]$$

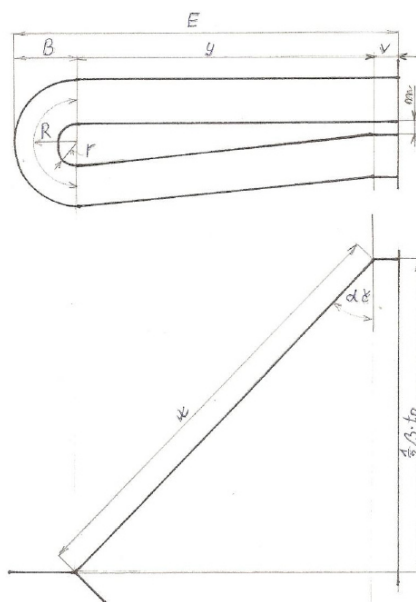
Následně se určí prostor pro šířku holého vodiče a hloubka drážky, viz. tabulka. Rozměry klínu a drážky se určí podle normy.

Pozice	Položka	Šířka	Hloubka
1.			
2.			
3.			
n.			

Tabulka 2.2.2.1. Složení a rozměry drážky

### 2.2.3. Odporová a rozptylová reaktance statorového vinutí

Jedná se o dvupólový stroj, takové stroje mají zpravidla evolventní čela vinutí, s kuželovým uspořádáním. Výpočty v následující kapitole jsou přibližné, jelikož v praxi se pro tyto výpočty používá sofistikovaný software – výpočty délky čel a evolventy jsou velice obtížné. Tyto přibližné výpočty by měli být dostačující pro určení alespoň přibližné rozptylové reaktance a odporu statorového vinutí.



Obrázek 2.2.3.1. Rozměry čela válcového vinutí

Vzdálenost mezi čely vinutí:

$$c = 4 + \frac{U[kV]}{2} = 4 + \frac{24}{2} = 14 [mm]$$

Úhel sklonu čel válcového vinutí:

$$\sin \alpha_{\xi} = \frac{b_{\xi} + c}{t_{\xi 1}}$$

$$\alpha_{\xi} = \arcsin \alpha_{\xi} [^{\circ}]$$

- pokud šířku čela  $b_d$  zvolíme stejnou, jako šířku drážky  $b_d$ , můžeme tvrdit:

Délka čela:

$$x = \frac{\beta \cdot t_p}{2 \cos \alpha_{\xi}} [mm]$$

$$B = \frac{h_2}{2} + r [mm]$$

Kde volíme  $r$  [mm]

$$y = \frac{\beta \cdot t_p}{2} \tan \alpha_{\xi} [mm]$$

Délka oka:

$$o = \frac{\pi \cdot R}{2} [mm]$$

-kde:

$$R = \frac{B + r}{2} [mm]$$

Vyložení čel:

$$E = v + y + B [mm]$$

Délka čela:

$$l_{\xi} = 2(v + x + o) [m]$$

-kde:  $v$  je výběh cívky z drážky,  $v$  závislosti na napětí stroje

Délka vodiče:

$$l_v = L + l_{\xi} [m]$$

Odpor jedné fáze:

výpočet elektrického odporu pro stejnosměrný proud (tedy bez uvažování skin efektu)

$$R'_{\frac{1}{20}} = \rho_{cu} \cdot \frac{2l_v \cdot N_s}{a_{st} \cdot S_{cu1}} \quad [\Omega]$$

-kde:  $\rho_{cu}$  je měrný odpor vodiče při teplotě 20°C

Vliv skin efektu:

- náhradní výška vodiče:

$$\xi = 2\pi \cdot h_v \cdot \sqrt{\frac{j \cdot b_v \cdot f}{b_v \cdot \rho_{cu}}} \cdot 10^{-7} \quad [mm]$$

- činitel zvýšení elektrického odporu:

$$k_{cu} = \frac{g^2 - 0,2}{9} \cdot \xi^4$$

-kde  $g$  prezentuje celkový počet vodičů v drážce nad sebou.

$$g = i \cdot n_d$$

( $i$  – počet vodičů, na který se rozdělí původní vodič na výšku;  $j$  – počet vodičů v drážce vedle sebe)

Odpor při střídavém proudu a teplotě 20°C:

$$R_{\frac{1}{20}} = (1 + k_{cu}) R'_{\frac{1}{20}} \quad [\Omega]$$

Odpor při 75°C:

$$R_{\frac{1}{75}} = 1,22 \cdot R_{\frac{1}{20}} \quad [\Omega]$$

Procentuelní hodnota úbytku napětí na ohmickém odporu:

$$u_R = \frac{R_{\frac{1}{75}} \cdot I_1}{U_f} \cdot 100 \quad [\%]$$

Rozptylová reaktance satorového vinutí:

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

Procentuelní hodnota úbytku napětí na rozptylové reaktanci:

$$u_\sigma = \frac{X_\sigma \cdot I_1}{U_f} \cdot 100 \quad [\%]$$

Procentuelní hodnota rozptylové reaktance:

$$x_{\sigma} = u_{\sigma} [\%]$$

### 3. Návrh magnetického obvodu

Magnetický tok ve stroji se uzavírá přes tzv. magnetický obvod. Tento obvod je tvořen železem, ze kterého je stroj sestaven a vzduchovou mezerou.

Vzhledem k faktu, že magnetický odpor vzduchové mezery je relativně veliký, volí se mezera co možná nejmenší. Magnetický odpor ovlivňuje velikost budícího proudu, který je potřeba k vybuzení příslušného magnetického toku. Velikost vzduchové mezery je ale jistým kompromisem, jelikož nesmí být příliš malá, z důvodu přesnosti uložení a tuhosti hřídele. Dalším faktorem je nárůst pulsací drážkové harmonické.

Při návrhu magnetického obvodu vycházíme z velikosti magnetického toku a vlastností použitých materiálů. Pro zjednodušení výpočtů se uvažuje průchod magnetického toku pouze širokým zubem rotoru. Skutečnost je však taková, že část toku prochází i úzkými zuby. Pro komplexní řešení, které by zahrnovalo i tyto výpočty, by se dala použít například metoda konečných prvků.

Magnetický tok určíme jednak z rovnice pro indukované napětí (a), a jednak z rozměrů stroje a velikosti indukce ve vzduchové mezeře (b). Tyto hodnoty by se měli přibližně rovnat. V jistém smyslu se jedná i o kontrolu předchozích výpočtů.

$$a. \quad \Phi = \frac{U_f}{4,44 \cdot f \cdot N_s \cdot k_{p2}} \quad [V \cdot s]$$

$$b. \quad \Phi = \frac{2}{\pi} \cdot t_p \cdot l_g \cdot B_g \quad [V \cdot s]$$

Pro následující výpočty je nutné znát velikost celkového magnetického toku (součet hlavního a rozptylového magnetického toku). Tuto velikost odhadneme.

Celkový magnetický tok:

$$\Phi' = \Phi + \Phi_g = \Phi \cdot (1 + \gamma_g)$$

- kde  $\gamma_g$  je předpokládaná poměrná hodnota rozptylové reaktance ve vzduchové mezeře.

Její hodnota bývá v rozmezí 0,1 - 0,2.

Velikost vzduchové mezery:



Velikost vzduchové mezery zdatelně ovlivňuje hodnotu nesyčené synchronní reaktance. Při volbě velikosti mezery vycházíme tedy z požadované procentuální hodnoty nesyčené synchronní reaktance.

$$\delta = k \cdot \frac{A \cdot t_p}{B_\delta} \cdot \frac{10^{-6}}{x_d - x_\delta} \quad [m]$$

-kde  $k$  záleží na velikosti Carterova činitele a dalších parametrech

$x_d=200$  je procentuelní hodnota rozptylové reaktance. Reaktance není zadána, volí se tedy podle počtu pólů ( $2p = 2$  odpovídá hodnotě 200 – 220 %)

Podle literatury [2] je možné tuto hodnotu získat následujícím výpočtem:

$$\delta = 0,3 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{A \cdot t_p}{B_\delta} \quad [m]$$

Magnetické napětí reaktance kotvy

- nejprve amplituda základní harmonické kotvy

$$F_a = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{1}{C_1} \cdot A \cdot t_p \cdot k_{v1} \quad [A]$$

- kde  $C_1$  je činitel základní harmonické magnetické ve vzduchové mezeře

### 3.1. Dimenzování magnetického obvodu

Vnější průměr statorových plechů volíme s ohledem na výšku a sycení jha magnetickou indukci.

$$D_s = 2 \cdot D_1 \quad [A]$$

Výška jha statoru:

$$h_{js} = \frac{1}{2} \cdot (D_s - D_1 - 2h_d) \quad [m]$$

Indukce ve jhu statoru:

$$B_{js} = \frac{\Phi}{2 \cdot h_{js} \cdot k_{Fs} \cdot l_s} \quad [T]$$

Vnější průměr rotoru:

$$D_r = D_1 - 2\delta \quad [m]$$

Výška pólu:

$$h_p \quad [m]$$

Výška jha rotoru:

$$h_{jr} = D_r - 2 \cdot h_{r2} \quad [m]$$

Odhadneme hloubku první rotorové drážky, vedle širokého zubu:  $h_{r1} = [m]$

hloubka ostatních rotorových drážek odhadnuta na:  $h_{r2} = [m]$

Výška pólu  $h_p = h_{r1} \quad [m]$

Indukce ve jhu rotoru:

$$B_{jr} = \frac{1,1 \cdot \Phi}{2 \cdot L \cdot h_{jr}} \quad [T]$$

### Výpočet délky středních čar magnetického obvodu:

Výpočet pro pól:

$$l_p = h_p = h_{r1} \quad [m]$$

Výpočet pro jho rotoru:

$$l_{jr} = \frac{D_1}{2} - h_{r2} \quad [m]$$

Výpočet pro zub statoru:

$$l_z = h_d \quad [m]$$

Výpočet pro jádro induktoru:

$$l_{ji} = \frac{\pi [D_1 + 2(h_d + h_p)]}{4p} \quad [m]$$

## 3.2. Charakteristika naprázdno

Charakteristika naprázdno je závislost magnetického napětí  $F$ , na procentuální velikosti elektrického napětí  $U$ , vztažené k jmenovité hodnotě výstupního napětí.

Na svislou osu lze vynášet i magnetickou indukci nebo procentuální magnetický tok (úměrné veličiny).

Aby bylo možné charakteristiku sestavit, musíme znát charakteristiku vzduchové mezery. Charakteristika vzduchové mezery je tečna k výsledné charakteristice, procházející počátkem. Dalším krokem je určení dostatečného počtu hodnot  $F$ , pro různé procentuální

hodnoty  $U$  (100%, 115%, 130%, případně pro 80%). Pro tyto body je třeba určit velikost celkového magnetického napětí, které je rovno součtu magnetických napětí ze všech úseků.

Při výpočtech vycházíme ze vztahu  $F = H \cdot l$ ,

- kde : -  $H$  je intenzita magnetického pole
- $l$  je střední délka siločáry úseku

Celkové magnetické napětí je tedy:

$$F_c = F_\delta + F_{F\delta} = F_\delta + F_{ji} + F_z + F_p + F_{jr}$$

- kde: -  $F_\delta$  magnetické napětí ve vzduchové mezeře
- $F_{F\delta}$  celkové magnetické napětí v železné části magnetického obvodu
- $F_{ji}$  magnetická indukce ve jhu statoru
- $F_z$  magnetická indukce v zubu statoru
- $F_p$  magnetická indukce v pólu rotoru
- $F_{jr}$  magnetická indukce ve jhu rotoru

**Magnetické napětí ve vzduchové mezeře pro  $U=100\% U_N$ :**

$$F_\delta = 0,8 \cdot k_c \cdot \delta \cdot B_\delta \cdot 10^6 = [A]$$

- kde hodnota Carterova činitele je:

$$k_c = k_{c\delta} \cdot k_{ck}$$

- kde Carterův činitel respektující vliv drážkování induktoru je:  $\frac{b_0}{z_1}$
- pro otevřenou drážku platí  $b_0 = b_d$

$$\frac{B_\delta}{\delta}$$

- Carterův činitel respektující vliv radiálních ventilačních kanálů:

$$k_{ck} = \frac{1}{1 + \frac{\delta}{2 + \delta} \cdot \frac{\tilde{s}_k \cdot i}{l_s}}$$

**Magnetické napětí ve jhu induktoru (tj. statoru) pro  $U=100\% U_N$ :**

$$F_{ji} = H_{ji} \cdot l_{ji} [A]$$

- kde  $H_{ji}$  je intenzita magnetického pole ve jhu induktoru. Tato hodnota je odečtena z grafu magnetizační charakteristiky, podle přílohy, pro indukci jha statoru.

$$B_{ji} = \frac{\Phi}{2 \cdot S_{ji} \cdot k_{Fs}} = \frac{\Phi}{2 \cdot h_{ji} \cdot l_s \cdot k_{Fs}} [T]$$

**Magnetické napětí ve jhu rotoru pro  $U=100\% U_N$ :**

$$F_{jr} = H_{jr} \cdot L_{jr} [A]$$

- kde  $H_{jr}$  je intenzita magnetického pole ve jhu rotoru. Tato hodnota je odečtena z grafu magnetizační charakteristiky, podle grafu v příloze, pro indukci jha rotoru.

$$B_{jr} = \frac{(1 + \gamma_G) \cdot \Phi}{S_{jr}} = \frac{(1 + \gamma_G) \cdot \Phi}{h_{jr} \cdot L_r} [T]$$

- kde  $L_r$  je délka rotoru

**Magnetizační napětí v zubu statoru pro  $U=100\% U_N$ :**

Protože byla použita obdélníková drážka, dochází k tomu, že se šířka zubu s narůstajícím průměrem zvětšuje a s tím se mění i průřez železa. Dochází proto i ke změně magnetické indukce. Železo má nelineární magnetizační charakteristiku. Postup výpočtu je popsán níže. Zjistíme šířky zubů na průměru vrtání plechů statoru, na průměru procházejícím středem hloubky drážek a na průměru patní kružnice. Použijeme indexy  $i = 1, 2, 3$ .

$$D_1$$

$$D_2 = D_1 + h_d$$

$$D_3 = D_1 + 2 \cdot h_d$$

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

- kde vypočteme drážkovou rozteč:

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

Zdánlivá indukce bude tedy:

$$B'_{di} = \frac{t_{di} \cdot B_G}{z_i \cdot k_{Fs}}$$

Pokud mluvíme o zdánlivé magnetické indukci, uvažujeme magnetický tok procházející pouze zubem. Dochází-li k sycení magnetického obvodu (při indukci přesahující cca 1.6 T), dochází k poklesu relativní permeability železa. Tím pádem narůstá magnetický odpor a dochází k tomu, že část toku prochází drážkou a hodnota indukce v zubu poklesne. Rozdíl mezi skutečnou a zdánlivou magnetickou indukcí narůstá, s narůstajícím sycením magnetického obvodu.

Hodnotu skutečné magnetické indukce se zjišťuje z monogramu nebo z magnetizační charakteristiky daného materiálu, pomocí tzv. koeficientu odlehčení. Ten je dán poměrem mezi kolmým průřezem drážky a zubu.

Koeficient odlehčení:

$$k_{zi} = \frac{S_d}{S_{zi}}$$

Jednotlivé hodnoty  $B_{zi}$  odečteme z magnetizační charakteristiky materiálu zubů hodnoty intenzity magnetického pole  $H_{zi}$ .

Budeme předpokládat parabolický průběh magnetické intenzity podél výšky zubu a stanovíme střední hodnotu magnetické intenzity:

$$H_{stř} = \frac{H_{z1} + 4 \cdot H_{z2} + H_{z3}}{6} \text{ [A/m]}$$

Velikost magnetického napětí bude:

$$F_z = H_{stř} \cdot l_z \text{ [A]}$$

Výsledné hodnoty pro výpočet magnetizační charakteristiky zubové vrstvy statoru jsou uvedeny v tabulce:

l	$D_i$ [mm]	$t_{di}$ [mm]	$z_i$ [mm]	$z_i$ [mm]	$k_{zi}$	$B'_{zi}$ [T]	$B_{zi}$ [T]	$H_{zi}$ [A/m]	$H_{stř}$ [A/m]	$F_z$ [A]
1										
2										
3										

Tabulka 3.2.1. Výpočet magnetizační charakteristiky zubové vrstvy statoru

**Magnetizační napětí v širokém zubu statoru pro  $U=100\% U_N$ :**

Stejná situace, jako u zubů statoru. Požijeme stejný postup s indexováním ve vzorcích.

Šířky zubu v průřezech  $z_{pi}$  ( $i = 1,2,3$ ):

$$D_{r1} = D_r$$

$$D_{r2} = D_{r1} + h_p$$

$$D_{r3} = D_{r1} + 2 \cdot h_p$$

Pokud budeme uvažovat, že široký zub bude pokrývat 1/3 obvodu rotoru:

$$z_{pi} = \frac{\pi \cdot D_{ri}}{6}$$

Magnetická indukce bude tedy:

$$B_{pi} = \frac{(1 + \gamma_\sigma) \cdot \Phi}{z_{pi} \cdot L_r} [T]$$

Pro jednotlivé hodnoty  $B_{pi}$  odečteme z magnetizační charakteristiky materiálu rotoru intenzity magnetického pole  $H_{pi}$ .

Střední hodnota magnetické intenzity je tedy:

$$H_{pstř} = \frac{H_{p1} + 4 \cdot H_{p2} + H_{p3}}{6} [A/m]$$

Velikost magnetického napětí vypočteme ze vzorce:

$$F_p = H_{pstř} \cdot l_p [A]$$

Výsledné hodnoty pro výpočet magnetizační charakteristiky širokého zubu rotoru jsou uvedeny v tabulce:

$i$	$D_{ri} [m]$	$z_{pi} [m]$	$B_{pi} [T]$	$H_{pi} [A/m]$	$H_{pstř} [A/m]$	$F_p [A]$
1						
2						
3						

Tabulka 3.2.2. Výpočet magnetizační charakteristiky širokého zubu rotoru

Konečný výpočet charakteristiky naprázdno je proveden v následující tabulce. Uvedené výsledky zahrnují výpočty pro  $U=80\% U_N$ ,  $U=115\% U_N$ ,  $U=130\% U_N$

		U <sub>N</sub>			U <sub>N</sub> · k <sub>1</sub>			U <sub>N</sub> · k <sub>2</sub>			U <sub>N</sub> · k <sub>3</sub>		
		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		$\delta = ?? \text{ m}$											
λ <sub>qNz</sub>	Hlava	k <sub>z1</sub> =	$B_{z1}$										
			$B_{z1}$										
	Střed	k <sub>z2</sub> =	$B_{z2}$										
			$B_{z2}$										
λ <sub>pNz</sub>	Pata	k <sub>z3</sub> =	$B_{z3}$										
			$B_{z3}$										
Stř. hodnota		l <sub>z</sub> = ?? m											
Jho statoru		l <sub>s</sub> = ?? m											
Jho rotoru		l <sub>r</sub> = ?? m											
λ <sub>pλ</sub>	Hlava												
	Střed												
	Pata												
	Stř. hodnota	l <sub>p</sub> = ?? m											
$\Sigma F = F_g + F_z + F_{j1} + F_{j2} + F_p$													

Tabulka 3.2.3. Magnetizační charakteristika celého magnetického obvodu

### 3.3. Návrh budícího vinutí

Pro návrh vinutí je potřeba znát velikost budícího magnetického napětí. Velikost tohoto napětí určíme pomocí charakteristiky naprázdno. Postup je následující:

- vyneseme napětí  $U_f = 100\% U_n$
- tomuto  $U_f$  přičteme ve směru proudu úbytek na činném odporu  $u_r$  a v kolmém směru úbytek na rozptylové reaktanci  $u_\sigma$
- z charakteristiky naprázdno získáme hodnotu  $U_{i,}$ , která odpovídá velikosti magnetického napětí  $F_v$  (magnetické napětí je potřeba pro vyvolání magnetického toku. Tento tok je nezbytný pro indukci napětí  $U_i$ ).

Magnetické napětí reakce kotvy:

$$F_a = \frac{\sqrt{2}}{C_1 \cdot \pi} \cdot A \cdot t_p \cdot k_{v1} [A]$$

- kde  $C_1$  je deformační činitel průběhu magnetické indukce ve vzduchové mezeře. Hodnoty se pohybují v rozmezí 1,02 – 1,1

Velikost budícího magnetického napětí pro jmenovité zatížení a účinník jsme zjistili graficky, viz. postup výše.

$$F_b [A]$$

Z úbytku napětí na činném odporu budících cívek určíme průřez budícího vinutí:

$$S_{Cub} = \rho_{Cu} \cdot \frac{2p \cdot l_{b\delta} \cdot F_b}{U_b} [mm^2]$$

- kde  $U_b$  je zvolené budící napětí
- kde  $l_{b\delta}$  je odhadovaná délka budící cívky:

$$l_{b\delta} = 2(L_r + l_{\delta r}) [m]$$

- kde  $l_{\delta r}$  je odhadovaná délka čela budící cívky:

$$l_{\delta r} \cong 0,7 \cdot t_p [m]$$

Z důvodu jisté rezervy zvolíme nejbližší vyšší používaný průřez vodiče. Zvolíme podle katalogu výrobce.

$$S_{Cub} [mm^2]$$



Zvolíme proudovou hustotu:

$$\sigma_{CuB} \text{ [A/mm}^2\text{]}$$

Těmto hodnotám odpovídá budící proud:

$$I_B = \sigma_{CuB} \cdot S_{CuB} \text{ [A]}$$

Nyní je možné určit počet závitů budící cívky:

$$N_B$$

## 4. Ztráty a účinnost

### 4.1. Ztráty

#### Jouleovy ztráty:

- ve vinutí statoru:

$$\Delta P_{\text{Cuk1}} = m \cdot R_{1/75} \cdot I_f^2 \text{ [kW]}$$

- v budícím vinutí:

$$\Delta P_{\text{Cukb}} = R_{1/75} \cdot I_b^2 \text{ [kW]}$$

#### Ztráty v železe:

Ztráty v jádře induktoru:

- ztrátové číslo plechů:  $\Delta p_{Fe} = 1,8 \text{ [W} \cdot \text{kg}^{-1}]$
- měrná hmotnost plechů:  $\rho_{Fe} = 7800 \text{ [kg} \cdot \text{m}^{-3}]$

- hmotnost jádra induktoru:

$$m_{Fej} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_s^2 - D_3^2) \cdot l_s \cdot k_{Fe} \cdot \rho_{Fe} = \frac{\pi}{4} \cdot$$

Ztráty v jádře induktoru jsou tedy:

$$\Delta P_{Fej} = 1,8 \cdot \Delta p_{Fe} \cdot B_{js}^2 \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} \cdot m_{Fej} \text{ [kW]}$$

#### Ztráty v zubech statoru:

- hmotnost zubů statoru:

$$m_{Fsz} = Q \cdot z_2 \cdot h_d \cdot l_s \cdot k_{Fe} \cdot \rho_{Fe} \text{ [kg]}$$

- kde  $z_2$  je střední šířka zubu, která byla vypočítána v předchozí kapitole

Ztráty v zubech induktoru jsou tedy:

$$\Delta P_{Fsz} = 2 \cdot \Delta p_{Fe} \cdot B_{z2}^2 \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} \cdot m_{Fsz} \text{ [kW]}$$

**Ztráty povrchové:**

$$\Delta P_p = \frac{2}{3} \cdot \frac{\pi}{2} \cdot D_r \cdot L_r \cdot k_0 \cdot \left( \frac{Q_n}{10\,000} \right)^{1,5} \cdot (t_{d1} \cdot \beta \cdot 1\,000 \cdot B_\delta \cdot k_c)^2 \quad [W]$$

- kde  $k_0 = 23,3$  a  $\beta = 0,02$  jsou činitele povrchových ztrát pro masivní ocel

**Ztráty mechanické:**

- obvodová rychlost rotoru:

$$v = \frac{\pi \cdot D_r \cdot n}{60} \quad [m/s]$$

Mechanické ztráty jsou tedy:

$$\Delta P_m = A_m \cdot v^{2,5} \cdot D_r \cdot \sqrt{L_r} \quad [kW]$$

- kde  $A_m$  je koeficient mechanických ztrát

**Přídavné ztráty:**

Přídavné ztráty se odhadují ze zdánlivého výkonu. Odpovídá jim hodnota 0,3% zdánlivého výkonu.

$$\Delta P_{přid} = 0,003 \cdot S = [kW]$$

**Celkové ztráty:**

Celkové ztráty se vypočítají jako součet jednotlivých druhů ztrát.

$$\Delta P = \Delta P_{Cu1} + \Delta P_{Cu2} + \Delta P_{Fej} + \Delta P_{Fes} + \Delta P_p + \Delta P_m + \Delta P_{přid} \quad [kW]$$

**4.2. Účinnost**

$$\eta = 100 \cdot \left( 1 - \frac{\Delta P}{P + \Delta P} \right) \quad [\%]$$

## 5. Tepelný výpočet

Cílem tepelného výpočtu je zjištění středního a případně i maximálního oteplení jednotlivých částí stroje. Při výpočtech se soustředíme zejména na ty části, jejichž vlastnosti se při změně teploty mění. V elektrických strojích jde zejména o izolaci a části, které k izolaci přiléhají. Je logické, že oteplení materiálů v těchto oblastech nesmí přesáhnout mez, která je dána výrobcem materiálu.

Pokud nastane riziko, že dojde k překročení těchto teplot, je třeba upravit ventilační systém elektrického stroje. Tyto úpravy s sebou nesou jistá úskalí, protože zpravidla dochází k zvětšení rozměrů, hmotnosti a logicky i ceny.

Izolační materiály lze dělit podle tepelné odolnosti do tříd:

Třída	Maximální teplota °C	Materiál
Y	90	neimpregnované organické látky (papír, bavlna, hedvábí atd.)
A	105	Impregnované organické látky třídy A (olejem nebo jinou organickou látkou)
E	120	fólie na bázi polyetyléntereftalátu
B	130	anorganické látky (slída, skelné tkaniny) spojované laky na bázi pryskyřice (asfalt, šelak, apod.)
F	155	anorganické látky spojované pryskyřicemi a anorganickými látkami
H	180	anorganické látky s pojivy na bázi silikonových laků a pryskyřic
C	>180	anorganické látky (sklo, porcelán, slída)

*Tabulka 5.1. Třídy tepelné odolnosti izolačních materiálů*

Pozn. Tabulka přebrána z IEC 60085:2007

Pro samotný tepelný výpočet se vychází z matematického modelu stroje, údajů a konstant, které sou specifické pro daný konkrétní případ. Tyto parametry nelze stanovit s naprostou jistotou, protože jsou závislé na vlastnostech použitých materiálů, ale i na technologickém zpracování a konstrukčním uspořádání.

Při návrhu matematického obvodu platí jednoduché pravidlo – nepožadovat složitý matematický model. Některé parametry totiž nelze určit přesně (tepelné vodivosti, uvažované ztráty, součinitele přenosu tepla atd.) Pro analytické řešení se používá tzv. tepelná síť, což je jednorozměrný matematický model, zkoumaného, trojrozměrného objektu. Využívá se elektroanalogie – předpokládá se ekvivalentní chování tepelného a elektrického obvodu. Díky těmto principům lze použít k řešení tepelných výpočtů Ohmův zákon a Kirchhoffovi zákony.

## 5.1. Chlazení synchronních strojů s hladkým rotorem

Existují tři základní principy chlazení těchto strojů:

- Chlazení vzduchové
- Chlazení plynové
- Chlazení kapalinové

Aplikace jednotlivých typů závisí víceméně na výkonu stroje. Pro stroje s nejmenšími výkony se používá chlazení vzduchové, pro výkony nejvyšší chlazení kapalinové a plynové. Kapaliny a plyny používané v chladicích systémech, mají větší měrné tepelné vodivosti těchto médií. Je samozřejmé, že typ chlazení ovlivní konstrukci stroje. U plynového a kapalinového chlazení cena stroje rapidně stoupá.

### **Vzduchové chlazení**

Tento typ chlazení se používá u strojů s relativně malými výkony. Existuje několik možností chlazení.

*Ventilační systém rotoru:*

*Přímé chlazení:* Používá se pro velké výkony. Chladicí vzduch je v přímém styku s vodičem, ve vodičích jsou vytvořené otvory. Otvory se spojují a vytvoří ventilační kanál, který přes otvor v podrážkovém klínu spojuje vzduchovou mezeru a podrážkový kanál. Otvory mají pro lepší ventilační účinek radiální tvar. Systém je závislý na délce rotoru (ke středu rotoru proudí menší množství vzduchu, než by odpovídalo ztrátám).

*Povrchové chlazení:* Používá se u strojů s malým výkonem. Chladicí povrch se zvětší tak, že se vytvoří ventilační drážky v zubu. Tato drážka je uzavřena klínem, ve kterém jsou otvory, kterými proudí vzduch z drážky do vzduchové mezery.

*Systém Punga:* Tento chladicí systém je relativně dost účinný. Jsou v něm odstraněny nevýhody předešlých systémů. Vzduch je vháněn ze vzduchové mezery nabíracími otvory v klínu drážky a prochází šikmými kanály ke dnu drážky. Přifukovacím kanálem přechází na druhou stranu drážky a z tohoto místa šikmým kanálem, skrz výfukový otvor zpět do vzduchové mezery. Výborná je kombinace tohoto systému chlazení s komorovým chlazením statoru.

*Ventilační systém statoru:*

*Komorové chlazení:* Prostor nad plechy statoru je rozdělený na přetlakové a podtlakové komory, které jsou navzájem propojeny soustavou trubek, skrz které proudí vzduch

*Kapsový systém:* Prostor nad plechy statoru je rozdělen na podtlakovou a přetlakovou část („kapsy“). Přetlakový a podtlakový prostor jsou střídavě spojeny radiálními štěrbinami skrz plechový statorový svazek. Liché štěrbin spojeny s podtlakovým prostorem, sudé s přetlakovým.

*Systém proplachovací:* Prostor v kostře statoru je uspořádán stejným způsobem, jako u kapsového systému, má však odlišné propojení těchto kapes. Vzduch vstupuje do štěrbin v té části chladicího obvodu, která je proti přetlakové kapse. Z té samé štěrbin vystupuje v jiné sekci obvodu do podtlakového prostoru. Vhodné uspořádání rozpěrných vložek ve ventilační štěrbině určuje směr proudění vzduchu. Statorový chladicí vzduch nepřechází do vzduchové mezery ani do prostoru zubů. Mezera a prostor zubů je chlazen vzduchem, který přichází přímo vzduchovou mezerou. Proplachovací systém odstraňuje problém s prouděním vzduchu směrem ke středu stroje (proti vzduchu vycházejícího z rotoru), ke kterému dochází u předchozích dvou metod.

### **Plynové chlazení**

V tomto systému se používá směs vzduchu a vodíku nebo hélia (98% vodík + 2% vzduch).

V takovéto atmosféře nestárnou izolační materiály. Vodík má sice menší elektrickou

pevnost než vzduch, může tedy snáze dojít ke koruně, ale vzhledem k tomu, že není přítomen kyslík, to izolaci nevadí. Vodík se vyznačuje velkou tepelnou vodivostí (cca 7x větší, než vzduch), z toho vyplývá nízký tepelný odpor plynných vrstviček v izolaci – vodivost vodíku je srovnatelná s vodivostí izolace. Důležitý je vyšší součinitel přestupu tepla, při stejném tlaku v porovnání se vzduchem. To znamená, potenciální zvýšení výkonu turboalternátoru o 20% bez dalších úprav. Velikost tohoto součinitele narůstá s tlakem, úskalím je ale lineární nárůst ventilačních ztrát.

Nevýhodou této směsi je výbušnost se vzduchem. Stroj musí být dokonale utěsněn. Další skutečnost je ta, že kostra stroje musí být dimenzována na přetlak uvnitř (zkušební tlak kostry je 7 atm. a při tomto tlaku nesmí maximální namáhání přesáhnout 2/3 meze pružnosti). Provozní čistota vodíku se pohybuje v rozmezí 96-98%. Kromě mazacího oleje je nutné použití těsnícího oleje. Stroj s tímto typem chlazení má velice náročné vodíkové a olejové hospodářství.

#### *Ventilační systém statoru:*

Typ 1. Rozdělené vinutí s tenkovrstvými ocelovými trubkami. Skrze tyto trubky protéká vodík. Trubky mají na povrchu slabou izolaci – izolace proti rozdílu napětí mezi paralelními pásy v permutované tyči.

Typ 2. Permutovaná tyč z dutých vodičů

#### *Ventilační systém rotoru:*

Typ 1. Drážkové řezy s dutými vodiči

Typ 2. Cívka se vstupními a výstupními radiálními otvory. Vstupní otvory se nacházejí na čele cívky a výstupní uprostřed rotoru.

### **Kapalinové chlazení**

V těchto chladících systémech se používá olej a chladící voda. Při relativně malém průtoku kapaliny dochází k odvedení značného množství tepla, což je způsobeno velkou měrnou tepelnou vodivostí kapalin.

Olej má sice dobré izolační vlastnosti, díky nimž odpadá nebezpečí zkratu. Má však horší chladicí vlastnosti než voda. Toto fluidum se používá u transformátorů.

Nevodivá voda je dokonale vyčištěná voda. Má velký chladicí účinek – součinitel přestupu tepla je 570x větší, než u vzduchu. V reálu ale nelze použít srovnatelné rychlosti proudění vzduchu a vody. Můžeme říci, že výsledný chladicí účinek vody je v ideálních podmínkách 50x větší, než vzduchu. Aby chladicí voda nezpůsobovala zkraty a neohřívala se svodovými proudy, musí mít velký elektrický odpor (5000-500  $\Omega/m$ , výjimečně 200 $\Omega/m$ ). Nestačila by tedy voda destilovaná, musí být odstraněny všechny ionty, pomocí iontových filtrů. Aby nevznikali ionizující příměsi, musí být všechny součásti chladicího systému z nerezových materiálů.

#### *Ventilační systém statoru:*

Oběh chladicí vody je buď z jedné strany na druhou, nebo skrz celý závit. Tlak vody ve vodičích je nižší, než ve stroji, aby v případě nějaké netěsnosti nevytékala voda do útrob stroje.

#### *Ventilační systém rotoru:*

Např. systém AEG. Na strupu do rotoru je vysoký přetlak (cca 100 atm.), který vzniká rotací. V rotorové drážce jsou duté vodiče. Voda je do motoru přiváděna vývrtem v ose hřídele. Na dně drážky je přívodní trubka, do které jsou vloženy odbočovací segmenty, na které jsou napojeny trubičky, které procházejí výřezy ve vodičích.

Vodní chlazení rotoru se provádí zatím jen experimentálně. Běžné je chlazení statorového vinutí.

V moderních strojích se používají výše popsané principy, případně jejich kombinace. Potřeba zvyšování výkonů generátorů vedla i k nezbytnému vývoji způsobů chlazení. Větší výkon vede ke větším ztrátám, které se projevují ve formě tepla, a tím pádem roste potřeba stroj chladit. Systém musí zajistit rovnoměrné chlazení stroje po celé jeho délce.



U strojů s hladkým rotorem se používá vzduchové chlazení přibližně do výkonů 200MW. Statorové a rotorové vinutí je zpravidla chlazeno nepřímou. U výkonů nad 250MW se většinou používá chlazení vodíkem, vodiče se chladí přímo. Další možností je kombinované chlazení. Statorové vinutí je chlazeno vodou – přímo a rotorové vinutí vodíkem. Vodní chlazení rotoru je zatím v pokusné fázi, tyto stroje jsou unikátní. Za zmínku stojí i to, že se v posledních letech začíná využívat efekt supravodivosti (ne příliš často). K tomuto jevu dochází, ochladíme-li vodič na velmi nízkou teplotu. Při stejném zatížení můžeme použít supravodič o mnohem menším průřezu, než by měl obyčejný vodič. Jako chladicí médium je používáno kapalné hélium. Hélium se používá pro chlazení statoru, jelikož u statoru není takový problém s odvodem a přívodem tohoto média.

## 6. Prvkový model (simulace mag. obvodu)

Vytvoříme simulaci magnetického obvodu metodou konečných prvků. Výsledky simulace by se měli přibližně shodovat s vypočtenými výsledky. Pro simulaci bude použit speciální SW. Pro použití této metody je nutné znát parametry, které budou do programu zadány. Řešení úlohy bude provedeno dvourozměrně. Metoda konečných prvků v jistém slova smyslu zjednodušuje výpočet takových složitých soustav, jako jsou magnetická pole. Pro matematické řešení by bylo nutné řešit soustavu parciálně diferenciálních rovnic, MKP rozdělí pole na drobné elementy (trojúhelníkového tvaru), což umožňuje převod těchto složitých rovnic na soustavu obyčejných lineárních rovnic, o mnoha neznámých. Řešení jednotlivých elementů je aproximováno lineární interpolací.

## 7.Závěr

Návrh synchronního stroje takovýchto rozměrů není snadnou záležitostí. Svým výkonem se vymyká veškerým návrhovým tabulkám a grafům v dostupné literatuře. Stroje takovýchto rozměrů byly již sestrojeny, ale *know-how* si každá konstrukční společnost drží, jako výrobní tajemství. U generátoru takových rozměrů je více než možné, že bude chlazen kombinovaným chladícím systémem voda – vodík (tak jako stávající generátory JET.

Dosavadní znalosti autora bohužel nestačí na to, aby práci dokončil a generátor navrhl. Proto nemohl být proveden ani tepelný výpočet a simulace magnetického obvodu. Student by se tímto chtěl omluvit a požádat o možnost přepracování této práce.

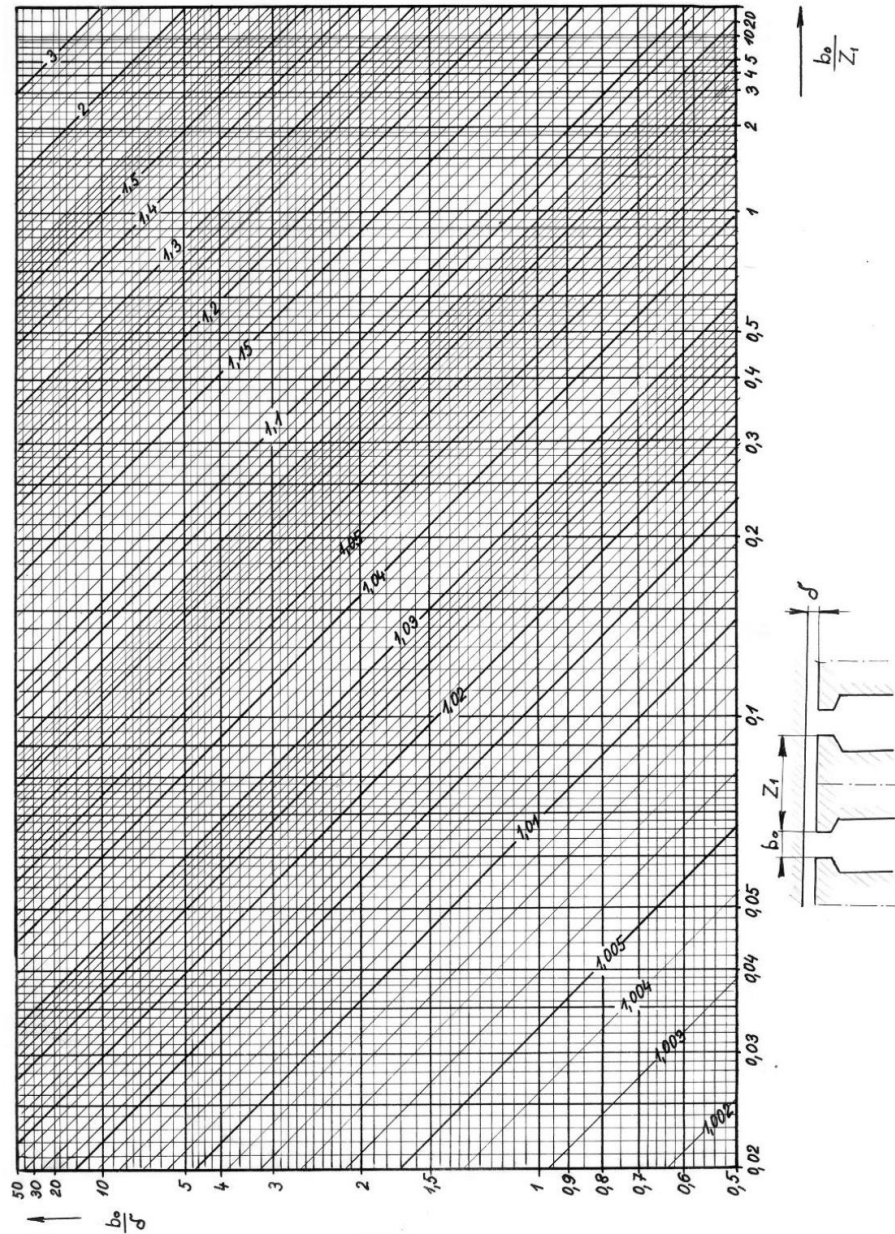
## 8. Seznam použité literatury

- [1] ČERVENÝ, Josef: Stavba elektrických strojů 1, 2. Plzeň, FEL – přednáškové texty ZČU, 2010/11
- [2] CIGÁNEK, Ladislav: Stavba elektrických strojů, Praha, SNTL, 1958
- [3] KOPYLOV, Igor Petrovič, a kolektiv: Stavba elektrických strojů, Praha, SNTL, 1988
- [4] LIST, Vladimír, HAK, Josef, a kolektiv: Elektrotechnika II, Elektrické stroje, Praha, SNTL, 1969
- [5] BARTOŠ, Václav: Teorie elektrických strojů, Plzeň, ZČU, 2006, ISBN 80-7043-509-7

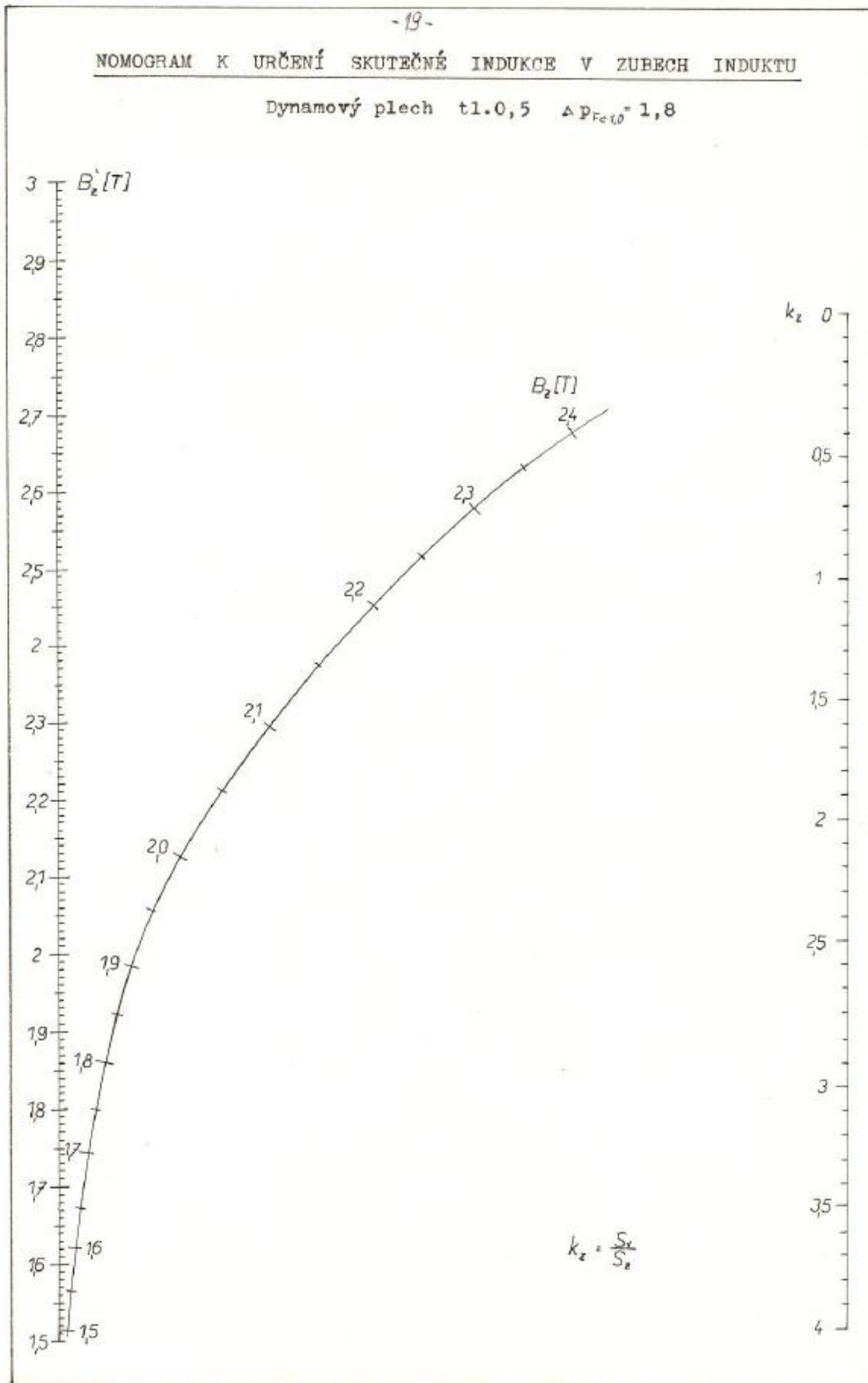
# Přílohy

## Příloha A: Grafy a monogramy

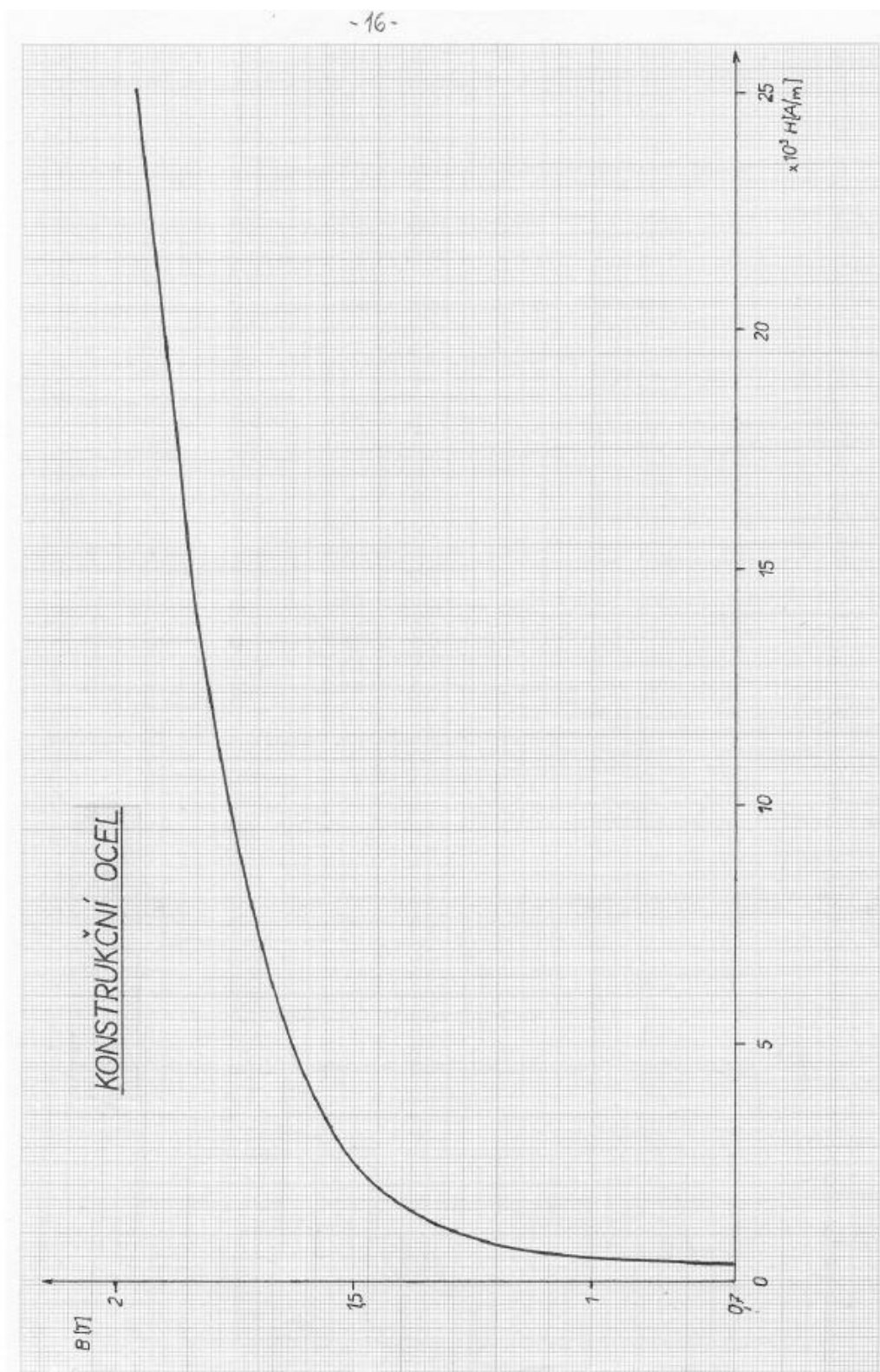
CARTERŮV ČINITEL NA DRÁŽKOVÁNÍ



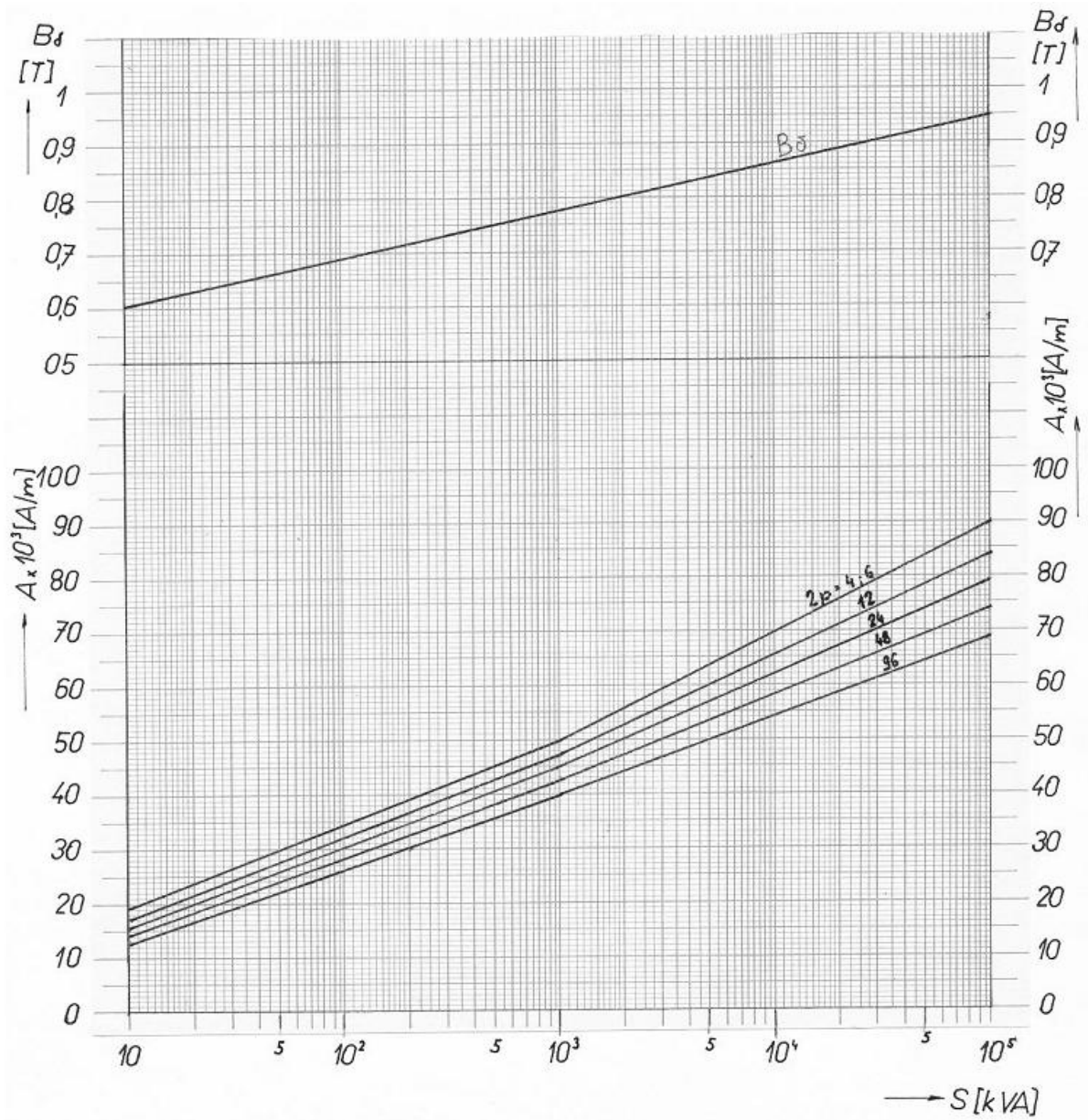
Příloha A.1.1 Carterův činitel



Příloha A.1.2. Monogram pro odečet odlehčení v zubech



Příloha A.1.3. Magnetizační charakteristika konstrukční oceli



Příloha A.1.4. Závislost obvodové proudové hustoty a indukce ve vzduchové mezeře na výkonu stroje



## Příloha B: Tabulky

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

Příloha B: Tabulka rozměrů drážek