

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY  
A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY**

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Návrh asynchronního stroje s dvojitou klecí nakrátko**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2017/2018

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

Jméno a příjmení: **Jiří DRAŽAN**  
Osobní číslo: **E15B0047P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**  
Název tématu: **Návrh asynchronního stroje s dvojitou klecí nakrátko**  
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

Předmětem bakalářské práce je elektromagnetický návrh asynchronního stroje s dvojitou (Boucherotovo) klecí.

1. Provedte elektromagnetický návrh asynchronního motoru s dvojitou klecí nakrátko zadaných parametrů.
2. Parametry motoru:  $P=11\text{kW}$  ,  $U_s=230/400\text{V}$  ,  $n_s=1500\text{ot/min}$  ,  $2p=4$  ,  $m=3$ .
3. Sestrojte kružnicový diagram, momentovou charakteristiku a určete další parametry stroje.
4. Nakreslete příčný a podélný řez stroje.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

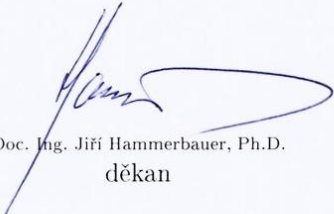
1. KOPYLOV I.P. a kol, Stavba elektrických strojů, SNTL Praha 1988.
2. PECHÁNEK, Roman (Akademický rok 2016/2017). Projektování elektrických zařízení [2016] Západočeská univerzita v Plzni.
3. Odborné časopisy.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Lukáš Veg

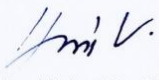
Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: 10. října 2017

Termín odevzdání bakalářské práce: 7. června 2018

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



  
Prof. Ing. Václav Kús, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 10. října 2017

**Abstrakt**

Předkládaná bakalářská práce se zabývá návrhem trojfázového čtyřpólového asynchronního stroje s dvojitou (Boucherotovou) klecí nakrátko o jmenovitém výkonu 11 kW. Pozornost je v této práci věnována převážně elektromagnetickému výpočtu stroje, který sestává z vlastního návrhu a dimenzováním konstrukčních částí stroje, na jejichž základě jsou stanoveny prvky náhradního schématu, ztráty, oteplení a provozní charakteristiky. Dále práce obsahuje grafické přílohy: kružnicový diagram, provozní charakteristiky, příčný a podélný řez stroje a jeho modelové zobrazení.

**Klíčová slova**

třífázový asynchronní stroj, dvojitá (Boucherotova) klec nakrátko, stator, rotor, magnetický obvod, odpor, reaktance, ztráty, oteplení, skinefekt, provozní charakteristiky

**Abstract**

This bachelor thesis presents the design of 3-phase 4-pole 11 kW induction motor with double (Boucherot) squirrel cage. This thesis is focused on the design of electromagnetic model of this machine, which consists of design and dimensioning of construction parts of this machine, calculation of equivalent diagram, losses, warming and working characteristics. After that there are graphic attachments in this thesis as: circle diagram, working characteristics, radial and axial cross section view of this machine and its own model.

**Key words**

3-phase induction motor, double (Boucherot) squirrel cage, stator, rotor, magnetic circuit, resistance, reactance, losses, warming, skin effect, working characteristics

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou 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 bakalářské práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 4. 6. 2018

Jiří Dražan

## **Poděkování**

Touto cestou bych rád vyslovil upřímný dík vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Lukáši Vegovi a konzultantovi Ing. Janu Laksarovi za velmi užitečné profesionální rady a připomínky. Velmi si cením ochoty a trpělivosti, s níž oba zmínění pánové přistupovali k řešení mých dotazů.

## Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>9</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>13</b>
<b>1 ZADÁNÍ NÁVRHU</b> .....	<b>14</b>
<b>2 VOLBA HLAVNÍCH ROZMĚRŮ</b> .....	<b>14</b>
<b>3 NÁVRH STATOROVÉHO VINUTÍ</b> .....	<b>16</b>
3.1 NÁVRH PROVEDENÍ STATOROVÉHO VINUTÍ .....	19
<b>4 NÁVRH ROZMĚRŮ DRÁŽEK A ZUBŮ STATORU</b> .....	<b>20</b>
<b>5 NÁVRH ROZMĚRŮ ROTORU</b> .....	<b>24</b>
5.1 NÁVRH KRUHŮ NAKRÁTKO .....	29
<b>6 VÝPOČET MAGNETICKÉHO OBVODU</b> .....	<b>31</b>
<b>7 PARAMETRY NÁHRADNÍHO SCHÉMATU STROJE</b> .....	<b>34</b>
7.1 ODPOR STATORU .....	35
7.2 ROZPTYLOVÁ REAKTANCE STATORU .....	36
7.3 ODPOR ROTORU .....	37
7.4 REAKTANCE ROTORU .....	38
7.5 NÁHRADNÍ SCHÉMA STROJE A ÚČINÍK NAPRÁZDNO .....	40
<b>8 JMENOVITÉ ZTRÁTY STROJE</b> .....	<b>43</b>
<b>9 KONTROLA OTEPLENÍ STROJE</b> .....	<b>48</b>
<b>10 VLIV SKINEFEKTU A NASYCENÍ ZUBŮ</b> .....	<b>51</b>
10.1 SKINEFEKT .....	51
10.2 NASYCENÍ ZUBŮ STATORU A ROTORU .....	53
10.3 IMPEDANCE STROJE S VLIVEM SKINEFEKTU A NASYCENÍ ZUBŮ .....	55
<b>11 PROVOZNÍ CHARAKTERISTIKY</b> .....	<b>57</b>
11.1 KRUŽNICOVÝ DIAGRAM .....	62
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>63</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b> .....	<b>66</b>
<b>PŘÍLOHY</b> .....	<b>1</b>



## Seznam symbolů a zkratek

### Veličiny

$A$ .....	lineární proudová hustota ( $A \cdot m^{-1}$ )
$a$ .....	počet paralelních větví vinutí, výška kruhu nakrátko (m)
$B$ .....	magnetická indukce (T), činitel
$B$ .....	tepelná třída izolace
$b$ .....	šířka (m)
$b_0$ .....	otevření drážky (m)
$b_m$ .....	šířka můstku mezi rozběhovou a pracovní rotorovou drážkou (m)
$C_N$ .....	činitel nasycení magnetických cest
$c_1$ .....	Hopkinsonův komplexní činitel
$D, d$ .....	průměr (m)
$F$ .....	magnetomotorické napětí (A)
$f$ .....	frekvence (Hz)
$H$ .....	intenzita magnetického pole ( $A \cdot m^{-1}$ )
$h$ .....	výška (m)
$h_0$ .....	výška otevření drážky (m)
$h_m$ .....	výška můstku mezi rotorovou drážkou rozběhovou a pracovní (m)
$I$ .....	elektrický proud (A)
$I_k, I_0, I_\mu$ .....	elektrický proud nakrátko, naprázdno, magnetizační (A)
$J$ .....	proudová hustota ( $A \cdot m^{-2}$ )
$j$ .....	imaginární jednotka
$K$ .....	počet cívek, činitel
$k$ .....	činitel
$k_C$ .....	Carterův činitel

---

$k_B$ .....	činitel tvaru pole
$k_{Fe}$ .....	činitel plnění železa
$k_r$ .....	činitel rozlohy vinutí
$k_v$ .....	činitel vinutí
$k_R, k_X$ .....	činitel zvýšení odporu, reaktance vlivem skin efektu
$k_y$ .....	činitel kroku vinutí
$l$ .....	délka (m)
$l_i$ .....	ideální délka stroje (m)
$l_{Fe}$ .....	délka železa (m)
$M$ .....	točivý moment ( $N \cdot m^{-1}$ )
$m_1$ .....	počet fází statorového vinutí
$m$ .....	hmotnost (kg)
$N_1$ .....	počet závitů jedné fáze statorového vinutí
$n$ .....	počet, otáčky ( $ot \cdot min^{-1}$ )
$O$ .....	obvod (m)
$k$ .....	činitel
$P_1$ .....	elektrický příkon (W)
$P_2$ .....	mechanický výkon (W)
$P_i$ .....	výkon přenesený přes vzduchovou mezeru ( $V \cdot A$ )
$\Delta P$ .....	ztráty (W)
$p$ .....	počet pólpárů
$p_i, p_z$ .....	převod rotorových proudů, impedancí na stranu statoru
$\Delta p$ .....	měrné ztráty ( $W \cdot kg^{-1}$ )
$Q$ .....	počet drážek
$Q_v$ .....	průtok chladícího vzduchu ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )
$q$ .....	počet drážek na pól a fázi

---

$R$ .....	elektrický odpor ( $\Omega$ )
$S$ .....	povrch, plocha průřezu ( $m^2$ )
$s$ .....	skluz
$t_d$ .....	drážková rozteč (m)
$t_p$ .....	pólová rozteč (m)
$O$ .....	obvod (m)
$U_N, U_f, U_i$ .....	napětí sdružené, fázové, indukované (V)
$U_m$ .....	magnetické napětí (A)
$V_d$ .....	počet vodičů v drážce
$X$ .....	reaktance ( $\Omega$ )
$X_\mu$ .....	magnetizační reaktance ( $\Omega$ )
$\gamma_1, \gamma_2$ .....	přední, zadní cívkový krok v počtu cívkových stran
$Z$ .....	impedance ( $\Omega$ )
$\alpha$ .....	magnetický činitel pólového krytí
$\beta$ .....	činitel
$\gamma$ .....	konduktivita ( $S \cdot m^{-1}$ )
$\delta$ .....	velikost vzduchové mezery (m)
$\eta$ .....	účinnost
$\Delta\theta$ .....	oteplení ( $^{\circ}C$ )
$\lambda$ .....	štíhlostní poměr, činitel magnetické vodivosti
$\mu_0$ .....	permeabilita vakua ( $4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} H \cdot m^{-1}$ )
$\xi$ .....	činitel
$\rho$ .....	rezistivita ( $\mu \cdot \Omega \cdot m$ ), hustota ( $kg \cdot m^{-3}$ )
$\omega_s$ .....	synchronní úhlová rychlost ( $rad \cdot s^{-1}$ )

**Indexy**

1.....	statorový, u drážek pozice rozměru
2.....	rotorový, u drážek pozice rozměru
č.....	čelo vinutí
<i>Cu</i> .....	měď
<i>D, H</i> .....	pracovní (dolní), rozběhová (horní) klec nakrátko
<i>d</i> .....	drážka
<i>e, i</i> .....	vnější, vnitřní rozměr
<i>j</i> .....	jho
<i>kn</i> .....	kruh nakrátko
<i>MS</i> .....	mosaz
<i>N</i> .....	jmenovitá hodnota
( <i>s</i> ).....	veličina proměnná se skluzem

## Úvod

Ve světě elektrických strojů se nejvyšší hojnosti použití těší asynchronní stroje. Díky poměrně jednoduchému principu jejich funkce mohou být vyráběny v konstrukčních provedeních, která umožňují snadnou manipulaci a údržbu, nízké výrobní náklady a vysokou dlouhodobou spolehlivost. Zcela bezchybnými však nejsou. Klasické asynchronní stroje s klecovými rotory nakrátko skýtají ve svých rozběhových charakteristikách dva hlavní nepříznivé jevy. Jedná se o velkou hodnotu rozběhového proudu a pro některé aplikace nízký záběrný točivý moment. Řešení těchto problémů lze hledat buď vně stroje, například transfigurací zapojení statorového vinutí hvězda/trojúhelník či použitím výkonových měničů, nebo již při jeho konstrukci, kdy lze navrhnout rotor se speciálním tvarem drážek, resp. tyčí klecových vinutí nakrátko.

Tato bakalářská práce se zabývá druhým ze zmíněných řešení, konkrétně návrhem asynchronního stroje, jehož rotor bude obsahovat dvojitou klec nakrátko, též zvanou Boucherotova, která se skládá ze dvou navzájem izolovaných klecí nakrátko vyrobených z materiálů s různou rezistivitou. Princip její funkce spočívá ve využití skin efektu, který se projevuje při rozběhu stroje z nulových otáček a redukuje proudovou hustotu v rotorových tyčích pouze na oblast blízkou vzduchové mezeře. V takovém okamžiku se proud v rotoru bude uzavírat převážně skrze rozběhovou klec nakrátko tvořenou mosazí s vysokou rezistivitou, což povede ke snížení rozběhového proudu a zároveň zvýšení záběrného točivého momentu stroje. S postupným přibližováním se jmenovitým otáčkám bude vliv skin efektu ubývat a paralelně k ní se zařadí pracovní měděná klec, jejíž rezistivita je značně menší, čímž stroji dodá lepší odolnost vůči přetížení v pracovní oblasti.

Základní tvary výpočetních vztahů a postupů použitých při elektromagnetickém návrhu tohoto stroje pramení z literatury [1-5].

## 1 Zadání návrhu

Jmenovitý mechanický výkon stroje	$P_2 = 11 \text{ kW}$
Jmenovité napájecí napětí	$U_{1N} = 230/400 \text{ V}$
Počet fází statorového vinutí	$m_1 = 3$
Napájecí frekvence	$f_1 = 50 \text{ Hz}$
Počet pólů	$p = 2$

Před zahájením samotného výpočtu stroje je třeba zvolit jeho konstrukční provedení, krytí a způsob chlazení, jelikož od těchto vlastností se poté odvíjí celá řada dalších výpočtů a doporučených hodnot.

Konstrukční provedení	IM B3
Krytí	IP 44
Chlazení	IC 401

## 2 Volba hlavních rozměrů

Prvním krokem při výpočtu asynchronního stroje je určení jeho hlavních rozměrů. Vnitřní průměr statoru a ideální délka vzduchové mezery jsou vzájemně vázány výkonovou rovnicí (2.1):

$$\frac{D_{1i}^2 \cdot l_i \cdot \omega_s}{P_i} = \frac{2}{\pi \cdot \alpha_\delta \cdot k_B \cdot k_{v1} \cdot A \cdot B_\delta'} \quad (2.1)$$

kde činitel pólového krytí  $\alpha_\delta$  a činitel tvaru pole  $k_B$  jsou voleny následovně [1]:

$$\alpha_\delta = \frac{2}{\pi}, \quad k_B = \frac{\pi}{2 \cdot \sqrt{2}}.$$

Na základě grafu na obrázku č. 2.1 v příloze je pro daný výkon zvolena osová výška stroje  $h = 145 \text{ mm}$  a z tabulky na obrázku č. 2.2, též v příloze, odpovídající vnější průměr statoru  $D_{1e} = 246 \text{ mm}$  [1].

Vnitřní průměr statoru je dán vztahem

$$D_{1i} = K_D \cdot D_{1e} = 0,63 \cdot 0,246 \doteq 155 \text{ mm}, \quad (2.2)$$

kde poměr vnitřního a vnějšího průměru statoru  $K_D = 0,63$  je zvolen z rozmezí pro čtyřpólový stroj uvedeného v tabulce na obrázku č. 2.3 v příloze [1].

Následuje výpočet velikosti pólové rozteče statoru

$$t_p = \frac{\pi \cdot D_{1i}}{2 \cdot p} = \frac{\pi \cdot 0,155}{2 \cdot 2} = 121,74 \text{ mm} \quad (2.3)$$

a vnitřního výkonu

$$P_i = P_2 \cdot \frac{k_E}{\eta \cdot \cos \varphi_N} = 11 \cdot 10^3 \cdot \frac{0,97}{0,89 \cdot 0,88} = 13,62 \text{ kVA}, \quad (2.4)$$

kde  $P_2$  je výkon na hřídeli stroje a  $k_E$  udává poměr mezi napětím indukovaným do vinutí statoru a jmenovitým napětím zvolený z grafu na obrázku č. 2.4 v příloze. Předběžná účinnost stroje při jmenovitém chodu  $\eta$  a účiník  $\cos \varphi_N$  se volí na základě grafů na obrázku č. 2.5 v příloze [1], avšak po první iteraci výpočtu stroje byly tyto hodnoty upraveny tak, aby přibližně odpovídaly skutečným hodnotám získaným při výpočtu ztrát a impedance tohoto stroje při jmenovitém chodu.

Synchronní úhlová rychlost hřídele se vypočte jako

$$\omega_s = 2 \cdot \pi \cdot \frac{n_s}{60} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{1500}{60} = 157,08 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}, \quad (2.5)$$

kde  $n_s$  jsou synchronní otáčky, které pro čtyřpólový stroj činí  $n_s = 1500 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ .

Pro stator je zvoleno jednovrstvé vinutí. Tato volba bude blíže popsána v následující kapitole. Velikost činitele vinutí se pro jednovrstvé vinutí volí z mezí  $k_{v1} = 0,95 \div 0,96$  [1].

Nyní lze určit ideální délku statorového, resp. rotorového, paketu

$$\begin{aligned}
 l_i &= \frac{2 \cdot P_i}{D_{1i}^2 \cdot \omega_s \cdot \pi \cdot \alpha_\delta \cdot k_B \cdot k_{v1} \cdot A \cdot B_\delta} = \\
 &= \frac{2 \cdot 13,62 \cdot 10^3}{0,155^2 \cdot 157,08 \cdot \pi \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \frac{\pi}{2 \cdot \sqrt{2}} \cdot 0,96 \cdot 27,09 \cdot 10^3 \cdot 0,9} \doteq 139 \text{ mm},
 \end{aligned} \tag{2.6}$$

kde předběžné velikosti lineární proudové hustoty  $A$  a indukce ve vzduchové mezeře  $B_\delta$  byly původně zvoleny z grafů na obrázku č. 2.6 v příloze, avšak lineární proudová hustota byla zpětně při korekci velikostí průřezů vodičů statorového vinutí pozměněna.

Ideální délka paketů je zároveň skutečná délka statorového, v tomto případě i rotorového, paketu, jelikož stroj neobsahuje radiální ventilační kanály. Platí tedy relace

$$l_i \approx l_{Fe1} \approx l_{Fe2}. \tag{2.7}$$

Následuje kontrola hlavních rozměrů pomocí štíhlostního poměru

$$\lambda = \frac{l_i}{t_p} = \frac{139}{121,74} = 1,14. \tag{2.8}$$

Výsledná hodnota patří do přípustných mezí daných grafem na obrázku č. 2.7 v příloze.

### 3 Návrh statorového vinutí

Počet drážek se volí z rozmezí daného vztahem

$$\begin{aligned}
 Q_{1 \min} \div Q_{1 \max} &= \frac{\pi \cdot D_{1i}}{t_{d1 \max}} \div \frac{\pi \cdot D_{1i}}{t_{d1 \min}} = \\
 &= \frac{\pi \cdot 0,155}{0,0135} \div \frac{\pi \cdot 0,155}{0,0115} = 36 \div 42,
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

kde rozmezí drážkových roztečí  $t_{d1 \min}$  až  $t_{d1 \max}$  se volí z grafu na obrázku č. 3.1 v příloze [1].

Na základě výsledku ze vztahu (3.1) a podmínky, že počet drážek na pól a fázi, daný vztahem (3.2), by měl být celé číslo [1], byl zvolen počet drážek  $Q_1 = 36$ . Tomuto počtu drážek odpovídá drážková rozteč  $t_{d1} = 13,53$  mm.



Kontrolní výpočet počtu drážek na pól a fázi vinutí je

$$q = \frac{Q_1}{2 \cdot p \cdot m_1} = \frac{36}{2 \cdot 2 \cdot 3} = 3, \quad (3.2)$$

kde  $m_1$  je počet fází statorového vinutí.

Na základě velikosti jmenovitého výkonu stroje, který činí 11 kW, bude použito jednovrstvého vsypávaného statorového vinutí se dvěma paralelními větvemi, jak plyne z doporučení [1]. Pro zjištění počtu vodičů v drážce je nutné nejprve vyjádřit velikost jmenovitého proudu statorovým vinutím

$$I_{1N} = \frac{P_2}{m_1 \cdot U_{1Nf} \cdot \eta \cdot \cos \varphi} = \frac{11 \cdot 10^3}{3 \cdot 230 \cdot 0,89 \cdot 0,88} = 20,35 \text{ A} \quad (3.3)$$

Nyní lze stanovit předběžný počet vodičů v drážce pro jednu paralelní větev, jehož hodnota se zaokrouhlí na celé číslo

$$V_d' = \frac{\pi \cdot D_{1i} \cdot A}{I_{1N} \cdot Q_1} = \frac{\pi \cdot 0,155 \cdot 27,09 \cdot 10^3}{20,35 \cdot 36} \doteq 18. \quad (3.4)$$

Následuje výpočet skutečného počtu vodičů v drážce, který pro dvě paralelní větve činí

$$V_d = a \cdot V_d' = 2 \cdot 18 = 36 \quad (3.5)$$

a počtu závitů jedné fáze vinutí

$$N_1 = \frac{V_d \cdot Q_1}{2 \cdot a \cdot m_1} = \frac{36 \cdot 36}{2 \cdot 2 \cdot 3} = 108. \quad (3.6)$$

Vypočtená lineární proudová hustota

$$A = \frac{2 \cdot m_1 \cdot N_1 \cdot I_{1N}}{\pi \cdot D_{1i}} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 108 \cdot 20,35}{\pi \cdot 0,155} = 27\,087 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1} \quad (3.7)$$

se od zvolené hodnoty liší pouze o  $3 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$ , což je velice příznivý výsledek, který potvrzuje správnost výpočtu.

Velikost proudové hustoty ovlivňuje nejenom pracovní teplotu vinutí, ale také i celkovou účinnost stroje, proto se její velikost volí pomocí vztahu (3.8):

$$J = \frac{AJ}{A} = \frac{194 \cdot 10^9}{27087} = 7,16 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}, \quad (3.8)$$

kde kritérium  $AJ$  určuje vhodný poměr mezi těmito dvěma veličinami, aby chování vinutí bylo efektivní, a volí se pro dané rozměry stroje z grafu na obrázku č. 3.2 v příloze [1]. Získaná velikost proudové hustoty je pro měď při trvalém zatížení nevhodná [6]. To lze napravit volbou většího průřezu vodiče oproti velikosti, která vychází z právě získané proudové hustoty

$$S_{ef1} = \frac{I_{1N}}{(a \cdot J)} = \frac{20,35}{2 \cdot 7,16 \cdot 10^6} = 1,42 \text{ mm}^2. \quad (3.9)$$

Na základě získané hodnoty je z tabulky na obrázku č. 3.3 v příloze zvolen průřez vodiče  $S_v = 1,767 \text{ mm}^2$ , který patří mezi sériově vyráběné měděné vodiče pro vinutí [1]. V dané tabulce je uveden i průměr tohoto vodiče, který je  $D_v = 1,5 \text{ mm}$ .

Skutečná proudová hustota v takovém vodiči bude činit

$$J_1 = \frac{I_{1N}}{a \cdot S_v} = \frac{20,35}{2 \cdot 1,767 \cdot 10^{-6}} = 5,76 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}, \quad (3.10)$$

což je hodnota, která odpovídá dovolené proudové hustotě pro měď ( $6 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$  [6]), ale jelikož je blízká této mezi, bude vhodné zvolit zesílenou izolaci vodiče tereftalátovým lakem, který spadá do teplotní třídy B. Tabulka na obrázku č. 3.3 v příloze ukazuje, že po přidání tereftalátového laku, v tabulce označeného jako 2T, se průměr vodiče zvýší na velikost  $D_{vi} = 1,64 \text{ mm}$ .

Pro použité jednovrstvé vinutí platí, že činitel kroku  $k_y$  je rovný jedné, protože vinutí nemá zkrácený krok. Z tabulky na obrázku č. 3.4 v příloze je podle počtu drážek na pól a fázi vinutí zvolen činitel rozlohy pro první harmonickou  $k_r = 0,96$  [1].

Činitel statorového vinutí je poté dán jako

$$k_{v1} = k_y \cdot k_r = 1 \cdot 0,96 = 0,96. \quad (3.11)$$

### 3.1 Návrh provedení statorového vinutí

Pro jednovrstvé statorové vinutí je počet cívek

$$K = \frac{Q_1}{2} = \frac{36}{2} = 18, \quad (3.12)$$

což splňuje podmínku, že poměr daný vztahem (3.13) musí být celé číslo [2, 5]:

$$\frac{K}{m_1} = \frac{18}{3} = 6. \quad (3.13)$$

Kvůli lepšímu elektromagnetickému využití statorového vinutí se jeho základní struktura obrazně tzv. rozstříhá [2, 5], což se ve skutečnosti zrealizuje rozdělením vinutí do tří fází a opačným směrem navinutí cívek protilehlých pólů. Tím vznikne  $m_1' = 6$  matematických fází, které společně s počtem paralelních větví vinutí určí počet fázových svazků vinutí pro jednu fázi jako

$$S_c = m_1' \cdot a = 6 \cdot 2 = 12 \quad (3.14)$$

a počet fázových svazků pro jednu fázi statorového vinutí

$$S_f = \frac{m_1' \cdot a}{m_1} = \frac{6 \cdot 2}{3} = 4, \quad (3.15)$$

kdy počet cívek náležících pod jeden fázový svazek bude

$$K_1 = \frac{K}{S_c} = \frac{18}{12} = 1,5, \quad (3.16)$$

což vede na vinutí s proměnným počtem cívek ve svazku, který bude střídavě nabývat hodnot jedna nebo dvě cívky, jelikož počet cívek nemůže být jiné než celé číslo.

Bude použito smyčkového vinutí, které bude navinuto dle následujících rozměrů. Cívkové kroky v počtu cívek i v počtu drážek jsou pro jednovrstvé vinutí totožné a platí pro ně

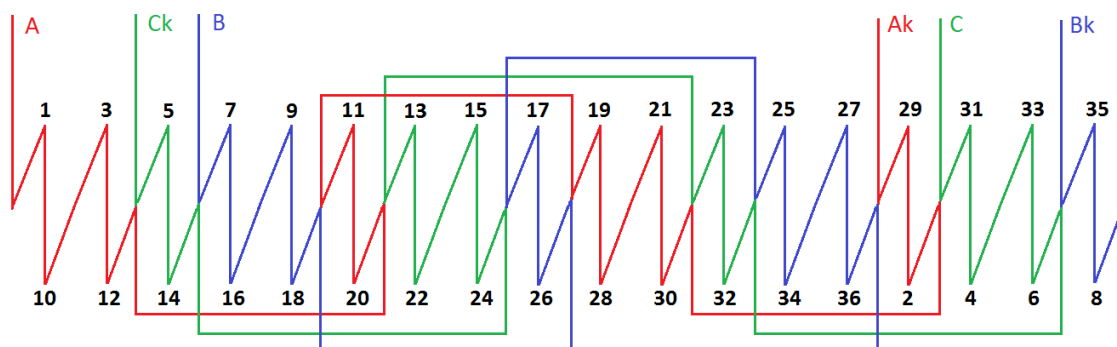
$$y_{1a} = y_1 = \frac{Q_1}{2 \cdot p} = \frac{36}{2 \cdot 2} = 9. \quad (3.17)$$

Pokud pomyslný krok na komutátoru je

$$y_k = \frac{a}{p} = \frac{2}{2} = 1, \quad (3.18)$$

pak spojkový krok v počtu cívkových stran je

$$y_2 = 2 \cdot y_k - y_1 = 2 \cdot 1 - 9 = -7. \quad (3.19)$$



Obr. 3.5 Pilové schéma zapojení satorového vinutí

## 4 Návrh rozměrů drážek a zubů satoru

Před zahájením vlastního výpočtu rozměrů satoru je třeba stanovit skutečný magnetický indukční tok, který musí projít skrze vzduchovou mezeru, a magnetickou indukci jím vyvolanou. Obě hodnoty jsou důležité pro dimenzování zubů a jha satoru, resp. později i rotoru.

Magnetický indukční tok se vyjádří jako

$$\Phi = \frac{k_E \cdot U_{1Nf}}{4 \cdot k_B \cdot N_1 \cdot f_1 \cdot k_{v1}} = \frac{0,97 \cdot 230}{4 \cdot \frac{\pi}{2 \cdot \sqrt{2}} \cdot 108 \cdot 50 \cdot 0,96} = 9,69 \text{ mWb} \quad (4.1)$$

a jím vyvolaná magnetická indukce ve vzduchové mezeře

$$B_\delta = \frac{\Phi}{\alpha_\delta \cdot t_p \cdot l_i} = \frac{9,69 \cdot 10^{-3}}{\frac{2}{\pi} \cdot 0,1217 \cdot 0,139} = 0,9 \text{ T}. \quad (4.2)$$

Z dovolených hodnot v tabulce na obrázku č. 4.1 v příloze jsou voleny velikosti magnetických indukci ve jhu a zubech satoru [1]:

$$B_{j1} = 1,5 \text{ T},$$

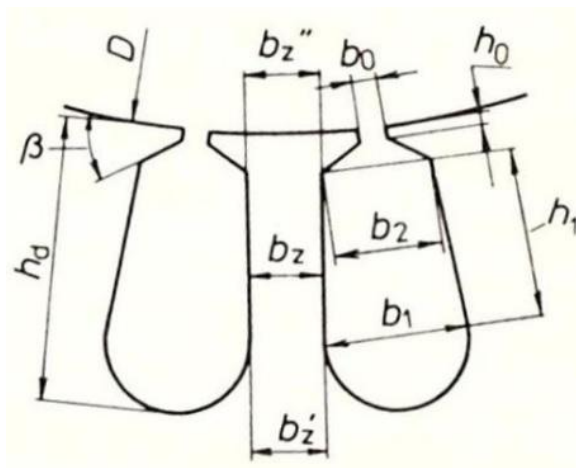
$$B_{z1} = 1,85 \text{ T}.$$

Nyní je možné určit výšku statorového jha

$$h_{j1} = \frac{\Phi}{2 \cdot B_{j1} \cdot l_{Fe1} \cdot k_{Fe}} = \frac{9,69 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 1,5 \cdot 0,139 \cdot 0,95} = 24,45 \text{ mm}, \quad (4.3)$$

kde  $k_{Fe}$  je činitel plnění železa určený z tabulky na obrázku č. 4.2 v příloze dle způsobu izolace jednotlivých statorových i rotorových plechů, k čemuž je použito izolačního laku.

Jako tvar statorových drážek je zvolen typ S. Jedná se o lichoběžníkovou polouzavřenou drážku, která nabízí hned několik technologických výhod. Lichoběžníkový tvar drážky umožňuje vytvoření zubu s rovnoběžnými bočními stěnami, což je velice výhodné z hlediska konstantního rozložení magnetické indukce v celé jeho výšce. Díky polouzavřenému charakteru drážky je možné použití vsypávaného vinutí.



Obr. 4.3 Drážka typu S – převzato z [1]

Následuje vyjádření minimální dovolené šířky zubu, pro kterou magnetická indukce dosahuje zvolené hodnoty

$$b_{z1} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{d1} \cdot l_i}{B_{z1} \cdot l_{Fe1} \cdot k_{Fe}} = \frac{0,9 \cdot 13,53 \cdot 10^{-3} \cdot 0,139}{1,85 \cdot 0,139 \cdot 0,95} = 6,92 \text{ mm}. \quad (4.4)$$

Úhel zkosení paty zubu byl zvolen  $\beta = 45^\circ$ . Na základě toho lze pro výpočet rozměrů statorových drážek využít následující vzorce.

Výška drážky je

$$h_{d1} = \frac{D_{1e} - D_{1i}}{2} - h_{j1} = \frac{0,246 - 0,155}{2} - 24,45 \cdot 10^{-6} = 21,05 \text{ mm} \quad (4.5)$$

a její šířka v části u jha

$$b_1 = \frac{\pi \cdot (D_{1i} + 2 \cdot h_{d1})}{Q_1} - b_{z1} =$$

$$= \frac{\pi \cdot (0,155 + 2 \cdot 21,05 \cdot 10^{-3})}{36} - 6,92 \cdot 10^{-3} = 10,28 \text{ mm.} \quad (4.6)$$

V tomto okamžiku je nutné vypočítat přibližnou šířku drážky u paty zubu

$$b_2 = \frac{\pi \cdot D_{1i}}{Q_1} - b_{z1} = \frac{\pi \cdot 0,155}{36} - 6,92 \cdot 10^{-3} = 6,69 \text{ mm.} \quad (4.7)$$

Dle její velikosti se poté zvolí předběžné hodnoty výšky  $h_{01}$  a šířky  $b_{01}$  otevření drážky z tabulky na obrázku č. 4.4 v příloze [1]. Následnou iterační metodou výpočtu, kdy jsou tyto hodnoty dosazovány do vzorce (4.8), se upravují tak, aby platila podmínka, že součet šířky  $b_2$  a šířky zubu  $b_{z1}$  je v dané výšce drážky roven drážkové rozteči.

Konečné hodnoty výšky a šířky otevření drážky jsou  $h_{01} = 0,5 \text{ mm}$  a  $b_{01} = 3,2 \text{ mm}$  a z nich vypočtená šířka drážky u paty zubu

$$b_2 = \frac{\pi \cdot (D_{1i} + 2 \cdot h_{01} - b_{01}) - Q_1 \cdot b_{z1}}{Q_1 - \pi} =$$

$$= \frac{\pi \cdot (155 + 2 \cdot 0,5 - 3,2) \cdot 10^{-3} - 36 \cdot 6,92 \cdot 10^{-3}}{36 - \pi} =$$

$$= 7,03 \text{ mm.} \quad (4.8)$$

Nyní lze stanovit výšku statorového zubu

$$h_{z1} = h_{d1} - 0,1 \cdot b_1 = (21,05 - 0,1 \cdot 10,28) \cdot 10^{-3} = 20,02 \text{ mm.} \quad (4.8)$$

Aby bylo možné určit aktivní část drážky, ve které je uloženo vinutí, je potřeba znát velikost drážkového klínu. Jeho vypočtená výška je

$$h_k = \frac{b_2 - b_{01}}{2} = \frac{(7 - 3,2) \cdot 10^{-3}}{2} = 1,91 \text{ mm.} \quad (4.9)$$

Na základě této hodnoty byla z tabulky na obrázku č. 4.5 v příloze vybrána nejmenší možná velikost klínu typu D o výšce 2,5 mm.

Ze získaných rozměrů drážky lze určit její aktivní hloubku

$$\begin{aligned}
 h_1 &= h_{d1} - \left( h_{01} + h_k + \frac{b_1}{2} \right) = \\
 &= \left[ 21,05 - \left( 0,5 + 2,5 + \frac{10,28}{2} \right) \right] \cdot 10^{-3} = 12,91 \text{ mm},
 \end{aligned} \tag{4.10}$$

v níž je uloženo vinutí, ale také drážková izolace. Aby bylo možné stanovit plochu drážky pro uložení vinutí je nutné od doposud stanovených rozměrů odečíst úbytky dané velikostí drážkové izolace. Kromě toho je také důležité vzít v úvahu rozměrové nepřesnosti vznikající při skládání statorových plechů, k čemuž slouží tzv. přídavky na skládání uvedené v tabulce na obrázku č. 4.6 v příloze [1].

Přídavky na skládání pro tento stroj jsou  $\Delta b_d = 0,2 \text{ mm}$  a  $\Delta h_d = 0,2 \text{ mm}$  [1].

Rozměry drážky ponížené o přídavky na skládání budou činit

$$b'_1 = b_1 - \Delta b_d = (10,28 - 0,2) \cdot 10^{-3} = 10,08 \text{ mm}, \tag{4.11}$$

$$b'_2 = b_2 - \Delta b_d = (7,03 - 0,2) \cdot 10^{-3} = 6,83 \text{ mm}, \tag{4.12}$$

$$h'_1 = h_1 - \Delta h_d = (12,91 - 0,2) \cdot 10^{-3} = 12,71 \text{ mm}. \tag{4.13}$$

Drážková izolace zabírá plochu

$$\begin{aligned}
 S_i &= b_i \cdot (2 \cdot h_{d1} + b_1 + b_2) = \\
 &= 0,3 \cdot (2 \cdot 21,05 + 10,28 + 7,03) \cdot 10^{-6} = 17,82 \text{ mm}^2,
 \end{aligned} \tag{4.14}$$

kde  $b_i$  je jednostranná tloušťka izolace tepelné třídy B převzatá z tabulky na obrázku č. 4.7 v příloze.

Nyní již lze určit aktivní plochu drážky, do které je možné umístit vinutí

$$\begin{aligned}
 S'_d &= \frac{b'_1 + b'_2}{2} \cdot h'_1 - S_i = \\
 &= \left( \frac{10,08 + 6,83}{2} \cdot 12,71 - 17,82 \right) \cdot 10^{-6} = 89,61 \text{ mm}^2.
 \end{aligned} \tag{4.15}$$

Pro ověření správného výpočtu slouží činitel plnění drážky

$$k_T = \frac{\pi \cdot D_{vi}^2 \cdot V_d}{4 \cdot S'_d} = \frac{\pi \cdot (1,64 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 36}{4 \cdot 89,61 \cdot 10^{-6}} = 0,71, \quad (4.16)$$

který by měl pro stroj tohoto provedení vycházet v rozmezí  $k_T = 0,70 \div 0,72$  [1].

## 5 Návrh rozměrů rotoru

Prvním a velmi důležitým krokem při návrhu rotoru nakrátko je volba počtu drážek. Špatný poměr mezi statorovými a rotorovými drážkami způsobuje hluk a vibrace, které jsou následkem působení parazitních elektromagnetických momentů vzniklých indukovaním proudů vyšších harmonických složek do rotorových tyčí [2]. Proto se používají tabulky, kde jsou zapsány ověřené správné kombinace počtu rotorových drážek příslušících daným počtům statorových drážek a pólů stroje. Jednou z vhodných hodnot pro čtyřpólový stroj s počtem statorových drážek  $Q_1 = 36$  je  $Q_2 = 26$  [7], která bude i použita.

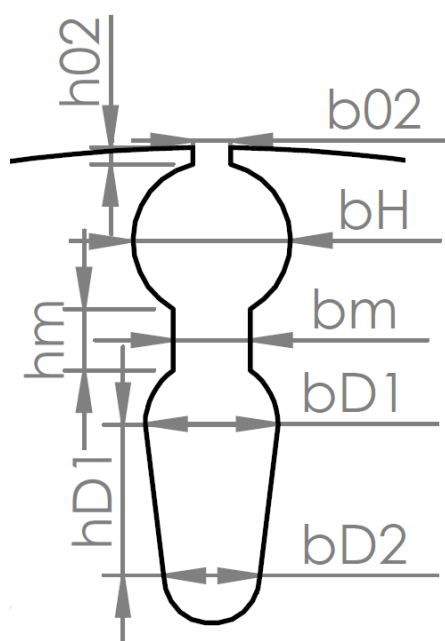
Na základě zadaného požadavku na rotor s dvojitou (Boucherotovou) klecí nakrátko bude drážka tvořena dvěma dílčími drážkami, přičemž horní z nich se nazývá rozběhová a dolní pracovní. Dále budou pro rotorové drážky používána označení pouze horní a dolní pro snazší prostorovou orientaci.

Jednotlivé dílčí drážky obsahují vlastní klec nakrátko tvořenou rotorovým tyčovým vinutím spojeným dvěma kruhy nakrátko. Spojovací kruhy horní i dolní klece jsou, stejně jako jejich tyče, od sebe odděleny. Klec nakrátko horní drážky se zhotovuje z odporového materiálu pro zajištění velkého záběrného točivého momentu a její význam se uplatní především při velkých skluzech, kdy vlivem působení skin efektu protéká proud převážně touto klecí [3]. Dolní klec je v tomto stavu prakticky neaktivní, čímž se značně zvýší celkový rotorový odpor [3]. Oproti tomu při jmenovitých otáčkách se paralelně k horní kleci zařadí i dolní, která díky svému malému elektrickému odporu přebere většinu rotorového proudu, což vede na zmenšení točivého momentu ke jmenovité hodnotě [3]. Jako materiál pro dolní klec nakrátko bude použita měď a pro dolní mosaz typ MS 68, jejíž mechanické a elektrické vlastnosti z ní dělají vhodný a snadno obrobitelný materiál pro tvarovanou rotorovou tyč [8, 9]. Tvar příčného průřezu horní drážkou je kruhový pro efektivní využití prostoru malé drážky při co největším poloměru zaoblení. Oproti tomu pro dolní klec je z důvodu menší drážkové rozteče nutno využít



lichoběžníkového tvaru, který zajistí konstantní magnetickou indukci v průřezu zubu, ale také dostatečnou mechanickou pevnost v tahu potřebnou pro překonání odstředivých sil působících na zuby rotoru při vysokých otáčkách.

Mezi dílčími drážkami je vzduchová mezera, tzv. můstek, který se výrazně projevuje v rozběhových charakteristikách díky svému silnému vlivu na celkový skin efekt v rotorové drážce. Tvar zvoleného typu drážky ukazuje obrázek č. 5.1. Veličiny náležící horní kleci budou označovány indexem H a pro dolní klec bude použito indexu D.



Obr. 5.1 Rotorová dvojitá drážka

Před samotným výpočtem rozměrů rotoru je třeba stanovit velikost vzduchové mezery mezi rotorem a statorem. Volba vzduchové mezery je velmi důležitá, protože její velikost silně ovlivňuje vlastnosti stroje jako jsou celkový magnetický odpor, na kterém závisí velikost magnetizačního proudu a účinníku, ztráty ve vinutí statoru a ztráty pulsační a povrchové, jejichž velikost se projeví na celkové účinnosti stroje [1].

Pro čtyřpólový stroj o jmenovitém výkonu do 20 kW se velikost vzduchové mezery určuje dle vztahu (5.1):

$$\delta \approx (0,25 + D_{1i}) \cdot 10^{-3} = (0,25 + 0,155) \cdot 10^{-3} \approx 0,4 \text{ mm}, \quad (5.1)$$

kde se výsledná hodnota zaokrouhluje na 0,05 mm [1].

Pro tuto hodnotu se při výpočtu magnetického obvodu objevil magnetizační proud větší než doporučený. Proto byla velikost vzduchové mezery zmenšena na  $\delta = 0,3$  mm.

Proud tekoucí rotorovými tyčemi při jmenovitém chodu se určí jako

$$I_{2N} = k_i \cdot p_i \cdot I_{1N} = 0,85 \cdot 23,93 \cdot 20,35 = 414 \text{ A}, \quad (5.2)$$

kde činitel vlivu magnetizačních proudů a odporů vinutí  $k_i$  se určuje z tabulky na obrázku č. 5.2 v příloze pro zvolený účinník a činitel přepočtu proudu  $p_i$  je dán vzorcem (5.3):

$$p_i = \frac{2 \cdot m_1 \cdot N_1 \cdot k_{v1}}{Q_2} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 108 \cdot 0,96}{26} = 23,93. \quad (5.3)$$

Proudová hustota tyčí klecí nakrátko tvořených mědí se volí  $4 \div 6 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$  [1]. Pro dolní klec bude proudová hustota činit  $J_{2D} = 6 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$ , z čehož lze díky podmínce, že při jmenovitém chodu stroje teče většina proudu skrze dolní klec, určit průřez jejich tyčí

$$S_{tD} = \frac{I_{2N}}{J_{2D}} = \frac{414}{6 \cdot 10^{-6}} = 68,99 \text{ mm}^2. \quad (5.4)$$

Jelikož se jedná o tyče vkládané do rotoru, což platí i pro horní klec, je třeba, aby průřez drážkou byl o 10 % větší než průřez tyče [1]. Dolní drážka bude zaujímat plochu

$$S_{dD} = S_{tD} \cdot 1,1 = 75,89 \text{ mm}^2. \quad (5.5)$$

Vnější průměr rotoru je

$$D_{2e} = D_{1i} - 2 \cdot \delta = 0,155 - 2 \cdot 0,3 \cdot 10^{-3} = 154,4 \text{ mm} \quad (5.6)$$

a vyplývá z něj velikost drážkové rozteče v oblasti horní drážky

$$t_{dH} = \frac{\pi \cdot D_{2e}}{Q_2} = \frac{\pi \cdot 0,1544}{26} = 18,66 \text{ mm}. \quad (5.7)$$

Průměr hřídele se počítá dle vzorce (5.8), kde činitel  $k_h$  je volen z tabulky na obrázku č. 5.3 v příloze [1]. Rotor je nasazen přímo na hřídeli, proto pro vnitřní průměr rotoru platí

$$D_{2i} = D_h = k_h \cdot D_{2e} = 0,23 \cdot 0,1544 = 35,51 \text{ mm}. \quad (5.8)$$

Výška a šířka otevření rotorové drážky by se pro tento stroj měly rovnat  $h_{02} = 0,75$  mm a  $b_{02} = 1,5$  mm [1]. Při regulaci rozptylové reaktance této drážky bylo zjištěno, že výhodnější bude zvolit šířku otevření drážky  $b_{02} = 2$  mm.

Z mezi uvedených v tabulce č. 4.1 v příloze se zvolí magnetické indukce v zubech a jhu rotoru:

$$B_{j2} = 1,05 \text{ T}, \quad B_{z2} = 1,7 \text{ T}.$$

Výška rotorového jha poté bude

$$h_{j2} = \frac{\Phi}{2 \cdot B_{j2} \cdot l_{Fe2} \cdot k_{Fe}} = \frac{9,69 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 1,05 \cdot 0,139 \cdot 0,95} = 34,93 \text{ mm}. \quad (5.9)$$

z čehož plyne, že na výšku celé rotorové drážky zbývá

$$h_{d2} = \frac{D_{2e} - D_{2i}}{2} - h_{j2} = \frac{(154,4 - 35,5) \cdot 10^{-3}}{2} - 34,93 \cdot 10^{-3} = 24,51 \text{ mm}. \quad (5.10)$$

Nejmenší možná šířka příčného průřezu rotorovým zubem je

$$b_{z2min} = b_{zD} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{dD} \cdot l_i}{B_{z2} \cdot l_{Fe2} \cdot k_{Fe}} = \frac{0,9 \cdot 12,73 \cdot 10^{-3} \cdot 0,139}{1,7 \cdot 0,139 \cdot 0,95} = 7,09 \text{ mm}, \quad (5.11)$$

což odpovídá šířce zubu v oblasti dolní drážky, a proto je nutné zde použít drážkovou rozteč této oblasti příslušící

$$t_{dD} = \frac{\pi \cdot (D_{2e} - 2 \cdot h_{d2})}{Q_2} = \frac{\pi \cdot (154,4 - 2 \cdot 24,51) \cdot 10^{-3}}{26} = 12,73 \text{ mm}. \quad (5.12)$$

Z doposud získaných hodnot lze stanovit rozměry dolní drážky

$$b_{D2} = \frac{\pi \cdot (D_{2i} + 2 \cdot h_{j2}) - Q_2 \cdot b_{zD}}{\pi + Q_2} = \frac{\pi \cdot (35,5 + 2 \cdot 34,93) \cdot 10^{-3} - 26 \cdot 7,09 \cdot 10^{-3}}{\pi + 26} = 5,03 \text{ mm}, \quad (5.13)$$

$$b_{D1} = \sqrt{\frac{b_{D2}^2 \cdot \left(\frac{Q_2}{\pi} - \frac{\pi}{2}\right) + 4 \cdot S_{dD}}{\frac{Q_2}{\pi} + \frac{\pi}{2}}} = \sqrt{\frac{(5,03 \cdot 10^{-3})^2 \cdot \left(\frac{26}{\pi} - \frac{\pi}{2}\right) + 4 \cdot 75,89 \cdot 10^{-6}}{\frac{26}{\pi} + \frac{\pi}{2}}} = 6,93 \text{ mm} \quad (5.14)$$

a vzdálenost mezi středy zaoblení drážky, které jsou dány průměry  $b_{D1}$  a  $b_{D2}$

$$\begin{aligned} h_{aD} &= 2 \cdot \frac{S_{aD} - \frac{\pi}{8} \cdot (b_{D1}^2 + b_{D2}^2)}{b_{D1} + b_{D2}} = \\ &= 2 \cdot \frac{75,89 \cdot 10^{-6} - \frac{\pi}{8} \cdot [(6,93 \cdot 10^{-3})^2 + (5,03 \cdot 10^{-3})^2]}{6,93 \cdot 10^{-3} + 5,03 \cdot 10^{-3}} = \\ &= 7,86 \text{ mm.} \end{aligned} \quad (5.15)$$

Průměr horní drážky byl, stejně jako šířka můstku, předběžně stanoven dle dovolené magnetické indukce a dále doladěn na základě rozběhových charakteristik stroje, které jsou těmito dvěma parametry silně ovlivněny. Jeho velikost činí

$$b_H = 8,19 \text{ mm.} \quad (5.16)$$

Tomu odpovídá šířka můstku  $b_m = 4 \text{ mm}$ .

Průměrná šířka zubu v oblasti horní drážky je

$$\begin{aligned} b_{zHav} &= \frac{D_{2i} - 2 \cdot \left( h_{02} + \frac{b_H}{3} \right)}{Q_2} - 0,94 \cdot b_H = \\ &= \frac{\left[ 35,5 - 2 \cdot \left( 0,75 + \frac{8,19}{3} \right) \right] \cdot 10^{-3}}{26} - 0,94 \cdot 8,19 \cdot 10^{-3} = \\ &= 10,12 \text{ mm,} \end{aligned} \quad (5.17)$$

a jeho výška činí

$$h_{zH} = h'_H - 0,1 \cdot b_H = (8,94 - 0,1 \cdot 8,19) \cdot 10^{-3} = 8,12 \text{ mm,} \quad (5.18)$$

kde

$$h'_H = h_{02} + b_H = (0,75 + 8,19) \cdot 10^{-3} = 8,94 \text{ mm.} \quad (5.19)$$

Nyní lze vypočítat výšku můstku, který spojuje drážky dolní a horní klece,

$$\begin{aligned} h_m &= h_{d2} - h'_H - h_{aD} - \frac{b_{D1} + b_{D2}}{2} = \\ &= \left( 24,51 - 8,94 - 7,86 - \frac{6,93 + 5,03}{2} \right) \cdot 10^{-3} = 1,73 \text{ mm.} \end{aligned} \quad (5.20)$$

Výška zubu v oblasti dolní drážky je

$$h_{zD} = h'_D - 0,1 \cdot b_{D2} = (15,57 - 0,1 \cdot 5,03) \cdot 10^{-3} = 15,07 \text{ mm}, \quad (5.20)$$

kde součet drážkových částí příslušících této oblasti činí

$$\begin{aligned} h'_D &= h_{aD} + \frac{b_{D1} + b_{D2}}{2} + h_m = \\ &= \left( 7,86 + \frac{6,93 + 5,03}{2} + 1,73 \right) \cdot 10^{-3} = 15,57 \text{ mm}. \end{aligned} \quad (5.21)$$

## 5.1 Návrh kruhů nakrátko

Výpočet rozměrů kruhů nakrátko je nutné provést jednotlivě pro horní i dolní klec, jelikož každá z nich má svůj pár spojovacích kruhů nakrátko. U tyčí vsunutých do rotoru se jejich propojení s kruhy provádí pájením, při kterém je vyvíjeno značné množství tepla, které by mohlo poškodit lakovou izolaci mezi rotorovými plechy, proto se zvyšuje vzdálenost mezi oblastí pájení a rotorovým paketem pomocí prodloužení rotorových tyčí [1]. Délka rotorových tyčí poté bude

$$l_t = l_{Fe2} + 15 \cdot 10^{-3} = (139 + 15) \cdot 10^{-3} = 154 \text{ mm}. \quad (5.22)$$

Proudová hustota v kruhu nakrátko by měla být o 15 ÷ 20 % menší než v tyčích, ke kterým přísluší [1]. Důvodem je požadavek na rozdíl velikostí Jouleových ztrát, jelikož na nich závisí teplota v dané části, která musí na kruhu být menší než v tyčích pro správný odvod tepla ze stroje do okolního prostředí [1]. Proudovou hustotu lze zmenšit zvětšením plochy průřezu kruhu, který poté bude

$$S_{knH} = \frac{1,2 \cdot S_{tH}}{\Delta} = \frac{1,2 \cdot 47,88 \cdot 10^{-6}}{0,479} = 120,03 \text{ mm}^2, \quad (5.23)$$

kde  $S_{tH}$  je plocha průřezu tyče horní klece, která musí být, stejně jako tomu bylo i u dolní klece, o 10 % menší než drážka, v níž je uložena. Výpočet její velikosti je

$$S_{tH} = \frac{S_{dH}}{1,1} = \frac{\frac{\pi}{4} \cdot b_H^2}{1,1} = \frac{\frac{\pi}{4} \cdot (8,19 \cdot 10^{-3})^2}{1,1} = 47,88 \text{ mm}^2. \quad (5.24)$$

Dále byl ve vztahu (5.23) použit činitel  $\Delta$  respektující fakt, že proud v kruhu nakrátko je fázorovým součtem proudů jednotlivých rotorových tyčí, které jsou vůči sobě prostorově a tedy i fázově posunuty. Jeho velikost byla stanovena jako

$$\Delta = 2 \cdot \sin \frac{\pi \cdot p}{Q_2} = 2 \cdot \sin \frac{\pi \cdot 2}{26} = 0,479. \quad (5.25)$$

Pokud bude výška tohoto kruhu nakrátko stejná jako výška, resp. průměr, drážky horní klece

$$a_{knH} = b_H = 8,19 \text{ mm}, \quad (5.26)$$

potom jeho šířka bude činit

$$b_{knH} = \frac{S_{knH}}{a_{knH}} = \frac{120,03 \cdot 10^{-6}}{8,19 \cdot 10^{-3}} = 14,66 \text{ mm}. \quad (5.27)$$

Na základě zmíněné podmínky o stanovení velikosti proudové hustoty v kruhu nakrátko bude pro dolní klec platit

$$J_{knD} = J_{2D} - J_{2D} \cdot 0,15 = (6 - 6 \cdot 0,15) \cdot 10^6 = 5,1 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}. \quad (5.28)$$

Z toho plyne, že plocha průřezu kruhu nakrátko dolní klece bude

$$S_{knD} = \frac{I_{kn}}{J_{knD}} = \frac{\frac{I_{2N}}{\Delta}}{J_{knD}} = \frac{\frac{414}{0,479}}{5,1 \cdot 10^6} = 169,59 \text{ mm}^2 \quad (5.29)$$

a pokud je výška tohoto kruhu stejná jako výška dolní drážky

$$a_{knD} = h_{dD} + \frac{b_{D1} + b_{D2}}{2} = \left( 7,86 + \frac{6,93 + 5,03}{2} \right) \cdot 10^{-3} = 13,85 \text{ mm}, \quad (5.30)$$

pak jeho šířka bude činit

$$b_{knD} = \frac{S_{knD}}{a_{knD}} = \frac{169,59 \cdot 10^{-6}}{13,85 \cdot 10^{-3}} = 12,25 \text{ mm}. \quad (5.31)$$

## 6 Výpočet magnetického obvodu

Výpočet magnetického obvodu stroje se provádí při chodu naprázdno, tj. při plném nasycení zubů statoru a rotoru, což vede ke snížení střední hodnoty magnetické indukce ve vzduchové mezeře, a proto se při výpočtu nepoužívají hodnoty amplitudy magnetické indukce, ale hodnoty nižší, jejichž velikost je dána vztahem (6.1) [1]:

$$B_{výp} = 0,82 \cdot B_{max}. \quad (6.1)$$

Z hodnot Carterova činitele pro stator a rotor,

$$k_{c1} = \frac{t_{d1}}{t_{d1} - \frac{\left(\frac{b_{01}}{\delta}\right)^2}{5 \cdot \delta + b_{01}}} = \frac{13,53 \cdot 10^{-3}}{13,53 \cdot 10^{-3} - \frac{(3,2)^2}{5 \cdot (0,3 + 3,2) \cdot 10^{-3}}} = 1,19 \quad (6.2)$$

a

$$k_{c2} = \frac{t_{dH}}{t_{d2} - \frac{\left(\frac{b_{02}}{\delta}\right)^2}{5 \cdot \delta + b_{02}}} = \frac{18,66 \cdot 10^{-3}}{18,66 \cdot 10^{-3} - \frac{\left(\frac{2}{0,3}\right)^2}{5 \cdot (0,3 + 2) \cdot 10^{-3}}} = 1,07, \quad (6.3)$$

lze vyjádřit celkový Carterův činitel

$$k_c = k_{c1} \cdot k_{c2} = 1,19 \cdot 1,07 = 1,27. \quad (6.4)$$

Pro magnetické napětí vzduchové mezery poté platí

$$U_\delta = \frac{2}{\mu_0} \cdot B_\delta \cdot \delta \cdot k_c = \frac{2}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot 0,9 \cdot 0,3 \cdot 10^{-3} \cdot 1,27 = 545,16 \text{ A}, \quad (6.5)$$

kde  $\mu_0$  je permeabilita vakua, resp. vzduchu.

Výpočtové magnetické indukce statorových zubů a jha činí

$$B_{z1výp} = \frac{B_\delta \cdot t_{d1} \cdot l_i}{b_{z1} \cdot l_{Fe1} \cdot k_{Fe}} \cdot 0,82 = \frac{0,9 \cdot 13,53 \cdot 139 \cdot 10^{-6}}{6,92 \cdot 139 \cdot 10^{-6} \cdot 0,95} \cdot 0,82 = 1,52 \text{ T}, \quad (6.6)$$

$$B_{j1výp} = \frac{\Phi}{2 \cdot h_{j1} \cdot l_{Fe1} \cdot k_{Fe}} \cdot 0,82 = \frac{9,69 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 24,45 \cdot 139 \cdot 10^{-6} \cdot 0,95} \cdot 0,82 = 1,23 \text{ T}. \quad (6.7)$$

Z důvodu proměnné šířky rotorových zubů se jejich magnetické napětí vyjádří jako součet velikostí magnetických napětí v částech zubů u horní a dolní klece.

Výpočtové magnetické indukce dolní a horní části zubů se vypočítají jako

$$B_{z2Dv\acute{y}p} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{dD} \cdot l_i}{b_{zD} \cdot l_{Fe2} \cdot k_{Fe}} \cdot 0,82 = \frac{0,9 \cdot 12,73 \cdot 139 \cdot 10^{-6}}{7,09 \cdot 139 \cdot 10^{-6} \cdot 0,95} \cdot 0,82 = 1,39 \text{ T} \quad (6.8)$$

a

$$B_{z2Hv\acute{y}p} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{dH} \cdot l_i}{b_{zHav} \cdot l_{Fe2} \cdot k_{Fe}} \cdot 0,82 = \frac{0,9 \cdot 17,82 \cdot 139 \cdot 10^{-6}}{10,12 \cdot 139 \cdot 10^{-6} \cdot 0,95} \cdot 0,82 = 1,37 \text{ T}, \quad (6.9)$$

přičemž drážková rozteč ve střední výšce horní drážky je

$$t_{dH} = \pi \cdot \frac{D_{2e} - 2 \cdot h_{02} - b_H}{Q_2} = \pi \cdot \frac{(154,4 - 2 \cdot 0,75 - 8,19) \cdot 10^{-3}}{Q_2} = 17,82 \text{ mm}. \quad (6.10)$$

Výpočtová magnetická indukce jha rotoru činí

$$B_{j2v\acute{y}p} = \frac{\Phi}{2 \cdot h'_{j2} \cdot l_{Fe2} \cdot k_{Fe}} \cdot 0,82 = \frac{9,69 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 32,93 \cdot 139 \cdot 10^{-6} \cdot 0,95} \cdot 0,82 = 0,91 \text{ T}, \quad (6.11)$$

kde výpočtová výška jha rotoru  $h'_{j2}$  se počítá dle vztahu (6.12). Důvodem pro tento postup výpočtu je fakt, že magnetické indukční čáry se budou částečně uzavírat i přes hřídel stroje, jelikož rotorový paket je na ni přímo nasazen [1].

$$h'_{j2} = \frac{2 + p}{3,2 \cdot p} \cdot \left( \frac{D_{2i}}{2} - h_{d2} \right) = \frac{2 + 2}{3,2 \cdot 2} \cdot \left( \frac{35,5}{2} - 24,51 \right) \cdot 10^{-3} = 32,93 \text{ mm} \quad (6.12)$$

Nyní je třeba přiřadit magnetickým indukcím odpovídající magnetické intenzity z magnetizačních charakteristik pro zvolený materiál plechů statorového a rotorového paketu [1]. Ty lze nalézt v tabulkách na obrázcích č. 6.1 a 6.2 v příloze. Zmíněným materiálem je elektrotechnická ocel 2211. Z důvodu úpravy velikostí magnetických



indukcí v předešlém kroku, kdy se zohlednilo zploštění křivky magnetické indukce vlivem nasycení, je nyní nutné hodnoty magnetické intenzity vrátit zpět mezi skutečné hodnoty tím, že budou poděleny konstantou 0,82 [1].

Magnetická napětí zubů a jha statoru jsou

$$U_{z1} = 2 \cdot h_{z1} \cdot \frac{H_{z1}}{0,82} = 2 \cdot 20 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1170}{0,82} = 57,13 \text{ A}, \quad (6.13)$$

kde výška statorového zubu činí

$$h_{z1} = h_{d1} - 0,1 \cdot b_1 = 21,05 - 0,1 \cdot 10,28 = 20 \text{ mm}, \quad (6.14)$$

a

$$U_{j1} = \frac{H_{j1}}{0,82} \cdot l_{j1} = \frac{435}{0,82} \cdot 0,174 = 92,31 \text{ A}, \quad (6.15)$$

kde  $l_{j1}$  je střední délka magnetické indukční čáry ve jhu statoru

$$l_{j1} = \pi \cdot \frac{D_{1e} - h_{j1}}{2 \cdot p} = \pi \cdot \frac{(155 - 24,45) \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 2} = 174 \text{ mm}. \quad (6.16)$$

Magnetická napětí jednotlivých částí zubů rotoru se vypočítají jako

$$U_{z2H} = 2 \cdot h_{zH} \cdot \frac{H_{zH}}{0,82} = 2 \cdot 8,12 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{840}{0,82} = 16,64 \text{ A}, \quad (6.17)$$

$$U_{z2D} = 2 \cdot h_{zD} \cdot \frac{H_{zD}}{0,82} = 2 \cdot 15,07 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{879}{0,82} = 32,31 \text{ A}. \quad (6.18)$$

Výsledná magnetická napětí zubů a jha rotoru poté jsou

$$U_{z2} = U_{z2H} + U_{z2D} = 16,64 + 32,31 = 48,95 \text{ A} \quad (6.19)$$

a

$$U_{j2} = \frac{H_{j2}}{0,82} \cdot l_{j2} = \frac{235}{0,82} \cdot 55,33 \cdot 10^{-3} = 15,86 \text{ A}, \quad (6.20)$$

kde  $l_{j2}$  je střední délka magnetické indukční čáry ve jhu rotoru počítaná jako

$$l_{j2} = \pi \cdot \frac{D_h + h_{j2}}{2 \cdot p} = \pi \cdot \frac{(35,5 + 34,93) \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 2} = 55,33 \text{ mm}. \quad (6.21)$$

Kontrolou správnosti návrhu je činitel nasycení zubů

$$k_z = 1 + \frac{U_{z1} + U_{z2}}{U_\delta} = 1 + \frac{57,13 + 48,95}{545,16} = 1,2, \quad (6.22)$$

kteř by se měl pohybovat v intervalu  $k_z = 1,2 \div 1,5$  [1], což pro tento stroj platí.

Celkové magnetické napětí magnetického obvodu stroje je

$$\begin{aligned} F_m &= U_\delta + U_{z1} + U_{z2} + U_{j1} + U_{j2} = \\ &= 545,16 + 57,13 + 48,95 + 92,31 + 15,86 = 759,4 \text{ A.} \end{aligned} \quad (6.23)$$

Ze získaných hodnot lze vypočítat velikost magnetizačního proudu

$$I_\mu = \frac{p \cdot F_m}{0,9 \cdot m \cdot N_1 \cdot k_{v1}} = \frac{2 \cdot 759,4}{0,9 \cdot 3 \cdot 108 \cdot 0,96} = 5,43 \text{ A,} \quad (6.24)$$

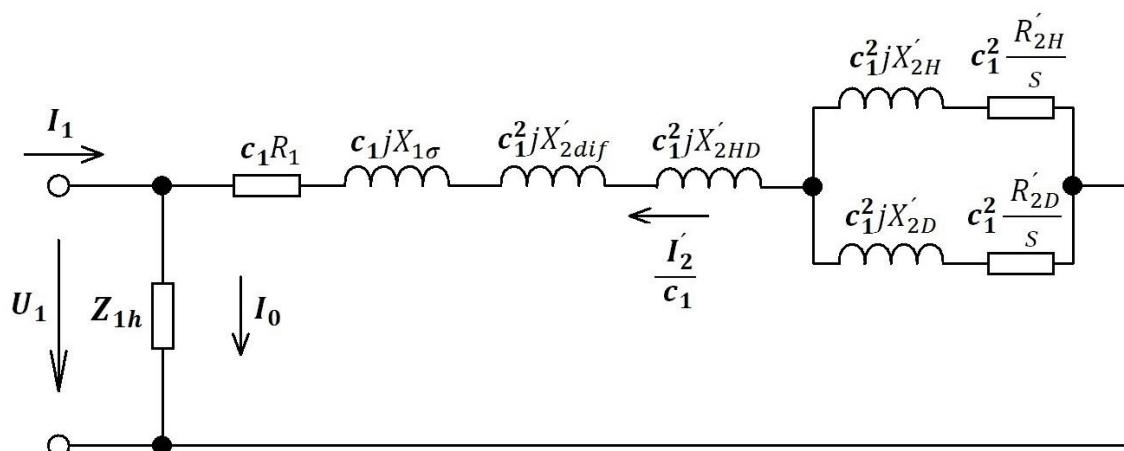
jehož poměrná hodnota je dalším faktorem potvrzujícím správnost návrhu

$$i_\mu = \frac{I_\mu}{I_{1N}} = \frac{5,43}{20,35} = 0,27, \quad (6.25)$$

protože se nachází v doporučených mezích  $i_\mu = 0,2 \div 0,3$  [1].

## 7 Parametry náhradního schématu stroje

Tato kapitola je zaměřena na výpočet odporů a reaktancí náhradního schématu stroje, které je zobrazeno na obrázku č. 7.1. Výpočty jsou provedeny pro chod naprázdno až jmenovitý, kdy lze zanedbat vliv skin efektu a nasycení cest rozptylových toků [1].



Obr. 7.1 Náhradní schéma stroje ve tvaru  $\Gamma$ -článku s rozdělenými prvky rotoru

## 7.1 Odpor statoru

Nejprve se stanoví délka vodiče jedné fáze statorového vinutí, která je dána součtem středních délek jeho částí uložených v drážkách  $l_d$  a částí tvořících čela vinutí  $l_\zeta$ .

Délka drážkové části je totožná s délkou statorového paketu  $l_d = l_{Fe1} = 139$  mm.

Délka čela se vyjádří jako

$$l_\zeta = K_\zeta \cdot b_c + 2 \cdot B = 1,55 \cdot 138,27 + 2 \cdot 0,01 = 234,32 \text{ mm}, \quad (7.1)$$

kde je použit činitel  $K_\zeta$  získaný z tabulky na obrázku č. 7.2 v příloze. Ten tvoří součin se střední šířkou cívky

$$b_c = \pi \cdot \frac{D_{1i} + h_{d1}}{2 \cdot p} = \pi \cdot \frac{(155 + 21,05) \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 2} = 138,27 \text{ mm}. \quad (7.2)$$

Délka přímé části cívky mezi koncem statorového paketu a začátkem ohybu čela  $B$  byla pro vsypávaná vinutí zvolena na základě doporučení dle [1].

Pro konstrukci statorového vinutí je vhodné stanovit i délku vyložení čel

$$l_v = K_v \cdot b_c + B = 0,5 \cdot 138,27 + 0,01 = 79,13 \text{ mm}, \quad (7.3)$$

činitel  $K_v$  je získán též z tabulky na obrázku č. 7.2 v příloze.

Střední délka závitu cívky statorového vinutí je

$$l_{av} = 2 \cdot (l_d + l_\zeta) = 2 \cdot (139 + 234,32) \cdot 10^{-3} = 746,63 \text{ mm} \quad (7.4)$$

a z její velikosti lze stanovit délku vodiče jedné fáze statorového vinutí

$$L_1 = l_{av} \cdot N_1 = 746,63 \cdot 108 = 80,64 \text{ m}. \quad (7.5)$$

Ze získaných hodnot lze vyjádřit velikost odporu statorového vinutí

$$R_1 = \rho_{Cu} \cdot \frac{L_1}{S_v \cdot a} = \frac{1}{47} \cdot 10^{-6} \cdot \frac{80,64}{1,767 \cdot 10^{-6} \cdot 2} = 0,49 \Omega, \quad (7.6)$$

kde  $\rho_{Cu}$  je rezistivita mědi při teplotě 75 °C [1].

## 7.2 Rozptylová reaktance statoru

K výpočtu rozptylové reaktance je nejprve nutné vyjádřit činitele magnetických vodivostí rozptylů v drážkách, čelech a vzduchové mezeře. Činitel magnetické vodivosti drážkového rozptylu se pro drážku typu S s jednovrstvým vinutím počítá jako

$$\begin{aligned}\lambda_d &= \frac{h_3}{3 \cdot b_2} + \frac{h_2}{b_2} + \frac{3 \cdot h_1}{b_2 + 2 \cdot b_{01}} + \frac{h_{01}}{b_{01}} = \\ &= \frac{12,11}{3 \cdot 7,03} + \frac{0,3}{7,03} + \frac{3 \cdot 2,5}{7,03 + 2 \cdot 3,2} + \frac{0,5}{3,2} = 1,33,\end{aligned}\quad (7.7)$$

kde  $h_1$  je úbytek výšky drážky daný velikostí drážkového klínu,  $h_2$  je úbytek výšky drážky daný velikostí drážkové izolace a  $h_3$  je aktivní výška drážky, v níž je uloženo vinutí [1].

Činitel magnetické vodivosti rozptylu čel činí

$$\begin{aligned}\lambda_{\xi} &= 0,34 \cdot \frac{q}{l_1} \cdot (l_{\xi} - 0,64 \cdot t_p) = \\ &= 0,34 \cdot \frac{3}{139} \cdot (234,32 - 0,64 \cdot 121,74) = 1,16.\end{aligned}\quad (7.8)$$

A činitel magnetické vodivosti tzv. diferenčního rozptylu, který se uzavírá přes vzduchovou mezeru, je roven

$$\lambda_{dif1} = \frac{t_{d1}}{12 \cdot \delta \cdot k_c} \cdot \xi_1 = \frac{13,53}{12 \cdot 0,3 \cdot 1,27} \cdot 1,17 = 3,45,\quad (7.9)$$

kde činitel  $\xi$  byl získán ze vztahu

$$\begin{aligned}\xi_1 &= 2 + 0,022 \cdot q^2 - k_{v1}^2 \cdot (1 + \Delta_z) = \\ &= 2 + 0,022 \cdot 3^2 - 0,96^2 \cdot (1 + 0,1) = 1,17,\end{aligned}\quad (7.10)$$

kde činitel  $\Delta_z$  byl odečten z grafu na obrázku č. 7.3 v příloze, přičemž pro tento stroj platí

$$\frac{b_{01}}{t_{d1}} = 0,24 \quad \text{a} \quad \frac{b_{01}}{\delta} = 10,67.$$

Rozptylová reaktance statorového vinutí poté bude

$$\begin{aligned}X_{1\sigma} &= 15,8 \cdot \frac{f_1}{100} \cdot \left(\frac{N_1}{100}\right)^2 \cdot \frac{l_1}{p \cdot q} \cdot (\lambda_d + \lambda_{\xi} + \lambda_{dif1}) = \\ &= 15,8 \cdot \frac{50}{100} \cdot \left(\frac{108}{100}\right)^2 \cdot \frac{139 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 3} \cdot (1,33 + 1,16 + 3,45) = 1,28 \Omega.\end{aligned}\quad (7.11)$$

### 7.3 Odpor rotoru

Odpor tyče horní klece nakrátko je

$$R_{tH} = \rho_{MS} \cdot \frac{l_t}{S_{tH}} = 7,1 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{154 \cdot 10^{-3}}{47,88 \cdot 10^{-6}} = 228,39 \mu\Omega, \quad (7.12)$$

kde  $\rho_{MS}$  je rezistivita elektrotechnické mosazi MS 68 [9].

Odpor kruhu nakrátko horní klece se vypočte jako

$$R_{knH} = \rho_{MS} \cdot \frac{\pi \cdot D_{knH}}{Q_2 \cdot S_{kn}} = 7,1 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{\pi \cdot 144,71 \cdot 10^{-3}}{26 \cdot 120,03 \cdot 10^{-6}} = 10,34 \mu\Omega, \quad (7.13)$$

kde střední průměr horního kruhu nakrátko je

$$\begin{aligned} D_{knH} &= D_{2e} - a_{knH} - 2 \cdot h_{02} = \\ &= (154,4 - 8,19 - 2 \cdot 0,75) \cdot 10^{-3} = 144,71 \text{ mm}. \end{aligned} \quad (7.14)$$

Jedna fáze rotorové klece je obecně tvořena jednou tyčí a dvěma výsečemi, jednou od každého, kruhů nakrátko, které přiléhají k této tyči. Celkový odpor jedné fáze horní klece poté činí

$$R_{2H} = R_{tH} + 2 \cdot \frac{R_{knH}}{\Delta^2} = \left( 228,39 + 2 \cdot \frac{10,34}{0,4792} \right) \cdot 10^{-6} = 318,68 \mu\Omega. \quad (7.15)$$

Odpor jedné tyče dolní klece nakrátko je

$$R_{tD} = \rho_{Cu} \cdot \frac{l_t}{S_{tD}} = \frac{1}{47} \cdot 10^{-6} \cdot \frac{154 \cdot 10^{-3}}{68,99 \cdot 10^{-6}} = 47,49 \mu\Omega \quad (7.16)$$

a pro její kruh nakrátko platí

$$R_{knD} = \rho_{Cu} \cdot \frac{\pi \cdot D_{knD}}{Q_2 \cdot S_{knD}} = \frac{1}{47} \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\pi \cdot 119,22 \cdot 10^{-3}}{26 \cdot 169,59 \cdot 10^{-6}} = 1,81 \mu\Omega, \quad (7.17)$$

kde střední průměr tohoto kruhu nakrátko činí

$$\begin{aligned} D_{knD} &= D_{2e} - 2 \cdot (h'_H + h_m) - a_{knD} = \\ &= (154,4 - 2 \cdot (8,3 + 2,37) - 13,85) \cdot 10^{-3} = 119,22 \text{ mm}. \end{aligned} \quad (7.18)$$

Potom výsledný odpor jedné fáze dolní klece nakrátko vychází

$$R_{2D} = R_{tD} + 2 \cdot \frac{R_{knD}}{\Delta^2} = \left( 47,49 + 2 \cdot \frac{1,81}{0,479^2} \right) \cdot 10^{-6} = 63,27 \mu\Omega. \quad (7.19)$$

Obvody horní a dolní klece jsou vůči sobě řazeny paralelně, z čehož plyne i výpočet celkového odporu rotoru při chodu naprázdno až jmenovitém, který je

$$R_2 \approx \frac{R_{2H} \cdot R_{2D}}{R_{2H} + R_{2D}} = \frac{318,68 \cdot 63,27 \cdot 10^{-12}}{(318,68 + 63,27) \cdot 10^{-6}} = 52,79 \mu\Omega \quad (7.20)$$

a po přepočtení na stranu statoru

$$R_2' = p_Z \cdot R_2 = 4,96 \cdot 10^3 \cdot 52,79 \cdot 10^{-6} = 0,26 \Omega, \quad (7.21)$$

kde převod impedancí je vyjádřen že vztahu (7.22):

$$p_Z = 4 \cdot m \cdot \frac{(N_1 \cdot k_{v1})^2}{Q_2} = 4 \cdot 3 \cdot \frac{(108 \cdot 0,96)^2}{26} = 4,96 \cdot 10^3. \quad (7.22)$$

Pro následující výpočty vlastností stroje při jmenovitém chodu je třeba nyní stanovit jeho jmenovitý skluz

$$s_N = R_2' \cdot \frac{I_{1N}}{U_f} = 0,26 \cdot \frac{20,35}{230} = 0,023. \quad (7.23)$$

## 7.4 Reaktance rotoru

Výpočet je opět nutné provést nejdříve jednotlivě pro horní a dolní klec nakrátko, dále se zjistí parametry společné pro obě klece a výsledná rozptylová reaktance rotoru bude vyjádřena z náhradního schématu v podkapitole 7.5.

Rozptylová reaktance horní klece nakrátko je stanovena jako

$$\begin{aligned} X_{2H} &= 7,9 \cdot l_i \cdot (\lambda_{dH} + \lambda_{knH}) \cdot 10^{-6} = \\ &= 7,9 \cdot 139 \cdot (1,28 + 0,54) \cdot 10^{-9} = 99,99 \mu\Omega, \end{aligned} \quad (7.24)$$

kde byl použit činitel magnetické vodivosti rozptylu horní drážky

$$\lambda_{dH} = 0,785 - \frac{b_{02}}{2 \cdot b_H} + \frac{h_{02}}{b_{02}} = 0,785 - \frac{2}{2 \cdot 8,19} + \frac{0,75}{2} = 1,28 \quad (7.25)$$

a čísel magnetické vodivosti rozptylu kruhu nakrátko horní klece

$$\begin{aligned}\lambda_{knH} &= 2,3 \cdot \frac{D_{knH}}{Q_2 \cdot l_i \cdot \Delta^2} \cdot \log \left( 4,7 \cdot \frac{D_{knH}}{2 \cdot a_{knH} + b_{knH}} \right) = \\ &= 2,3 \cdot \frac{144,71}{26 \cdot 139 \cdot 0,479^2} \cdot \log \left( 4,7 \cdot \frac{144,71}{2 \cdot 8,19 + 14,66} \right) = 0,54.\end{aligned}\quad (7.26)$$

Rozptylová reaktance dolní klece nakrátko je

$$\begin{aligned}X_{2D} &= 7,9 \cdot l_i \cdot (\lambda_{dD} + \lambda_{knD}) \cdot 10^{-6} = \\ &= 7,9 \cdot 139 \cdot (1,48 + 0,38) \cdot 10^{-9} = 102,35 \mu\Omega,\end{aligned}\quad (7.27)$$

kde čísel magnetické vodivosti rozptylu dolní drážky činí

$$\begin{aligned}\lambda_{dD} &= \frac{h_{dD} + 0,4 \cdot b_{D2}}{3 \cdot b_{D1}} \cdot \left( 1 - \frac{\pi \cdot b_{D1}^2}{8 \cdot S_{tD}} \right)^2 + 0,66 - \frac{b_m}{2 \cdot b_{D1}} + \frac{h_m}{b_m} = \\ &= \frac{7,86 + 0,4 \cdot 5,03}{3 \cdot 6,93} \cdot \left( 1 - \frac{\pi \cdot 6,93^2}{8 \cdot 68,99} \right)^2 + 0,66 - \frac{4}{2 \cdot 6,93} + \frac{1,73}{4} = 1,48\end{aligned}\quad (7.28)$$

a čísel magnetické vodivosti kruhu nakrátko dolní klece je

$$\begin{aligned}\lambda_{knD} &= 2,3 \cdot \frac{D_{knD}}{Q_2 \cdot l_i \cdot \Delta^2} \cdot \log \left( 4,7 \cdot \frac{D_{knD}}{2 \cdot a_{knD} + b_{knD}} \right) = \\ &= 2,3 \cdot \frac{119,22}{26 \cdot 139 \cdot 0,479^2} \cdot \log \left( 4,7 \cdot \frac{119,22}{2 \cdot 13,85 + 12,25} \right) = 0,38.\end{aligned}\quad (7.29)$$

Jedním ze dvou společných parametrů pro obě klece je diferenční rozptylová reaktance

$$\begin{aligned}X_{2dif} &= 7,9 \cdot l_i \cdot \lambda_{dif2} \cdot 10^{-6} = 7,9 \cdot 139 \cdot 3,96 \cdot 10^{-9} = \\ &= 217,68 \mu\Omega,\end{aligned}\quad (7.30)$$

kde čísel magnetické vodivosti diferenčního rozptylu je

$$\lambda_{dif2} = \frac{t_{dH}}{12 \cdot k_c \cdot \delta} \cdot \xi_2 = \frac{18,66}{12 \cdot 1,27 \cdot 0,3} \cdot 0,97 = 3,96.\quad (7.31)$$

Čísel  $\xi_2$  použitý ve vztahu (7.31) byl vyjádřen jako

$$\xi_2 = 1 + \frac{\left( \pi \cdot \frac{p}{Q_2} \right)^2}{5} - \frac{\Delta_z}{\left( 1 - \frac{p}{Q_2} \right)^2} = 1 + \frac{\left( \pi \cdot \frac{2}{26} \right)^2}{5} - \frac{0,04}{\left( 1 - \frac{2}{26} \right)^2} = 0,97,\quad (7.32)$$

kde  $\Delta_z$  je určen z grafu na obrázku č. 7.2 v příloze pro hodnoty  $\frac{b_{0z}}{t_{dH}} = 0,11$  a  $\frac{b_{0z}}{\delta} = 6,7$  [1].

Druhým společným parametrem pro obě rotorové klece je vzájemná rozptylová reaktance daná jako

$$\begin{aligned} X_{2HD} = X_{2dH} &= 7,9 \cdot l_i \cdot \lambda_{dH} \cdot 10^{-6} = 7,9 \cdot 139 \cdot 1,28 \cdot 10^{-9} \\ &= 70,39 \mu\Omega, \end{aligned} \quad (7.33)$$

jelikož celkový rozptylový magnetický indukční tok rotorové drážky je dán převážně magnetickou vodivostí horní drážky [1].

## 7.5 Náhradní schéma stroje a účinník naprázdno

Velikost rotorového odporu s respektováním okamžité velikosti skluzu se zjistí pomocí výpočtu sérioparalelní kombinace rotorových prvků náhradního schématu.

Celková impedance rotoru dle náhradního schématu na obrázku č. 7.1 má tvar

$$\mathbf{Z}_{2(s)} = j(X_{2dif} + X_{2HD}) + \frac{\left(\frac{R_{2D}}{s} + jX_{2D}\right) \cdot \left(\frac{R_{2H}}{s} + jX_{2H}\right)}{\frac{R_{2D}}{s} + \frac{R_{2H}}{s} + jX_{2D} + jX_{2H}} \quad (\Omega). \quad (7.34)$$

Jejím rozkladem se získají vztahy pro odpor rotoru a jeho rozptylovou reaktanci, které budou respektovat okamžitou velikost skluzu. Pro odpor poté platí

$$\frac{R_{2(s)}}{s} = \frac{R_{2D}^2 \cdot R_{2H} + R_{2H}^2 \cdot R_{2D} + (R_{2D}^2 \cdot X_{2H} + R_{2H}^2 \cdot X_{2D}) \cdot s^2}{s \cdot (R_{2D} + R_{2H})^2 + (X_{2D} + X_{2H}) \cdot s^3} \quad (\Omega) \quad (7.35)$$

a rozptylová reaktance rotoru je vyjádřena vztahem

$$\begin{aligned} X_{2\sigma(s)} &= X_{2dif} + X_{2HD} + \\ &+ \frac{R_{2D}^2 \cdot X_{2H} + R_{2H}^2 \cdot X_{2D} + (X_{2D}^2 \cdot X_{2H} + X_{2H}^2 \cdot X_{2D}) \cdot s^2}{R_{2D} + R_{2H} + (X_{2D} + X_{2H}) \cdot s^2} \quad (\Omega). \end{aligned} \quad (7.36)$$

Po přepočtení na stranu statoru bude pro oba získané prvky platit

$$\frac{R_{2(s)'}}{s} = p_z \cdot \frac{R_{2(s)}}{s} \quad (\Omega), \quad (7.37)$$

$$X_{2\sigma(s)'} = p_z \cdot X_{2\sigma(s)} \quad (\Omega). \quad (7.38)$$



Nyní již lze vyjádřit rozptylovou reaktanci rotoru pro jmenovitý chod

$$\begin{aligned}
 X_{2\sigma} &= X_{2dif} + X_{2HD} + \\
 &+ \frac{R_{2D}^2 \cdot X_{2H} + R_{2H}^2 \cdot X_{2D} + (X_{2D}^2 \cdot X_{2H} + X_{2H}^2 \cdot X_{2D}) \cdot s_N^2}{R_{2D} + R_{2H} + (X_{2D} + X_{2H}) \cdot s_N^2} = (217,68 + 70,39) \cdot 10^{-6} + \\
 &+ \frac{[63,3^2 \cdot 99,99 + 375,8^2 \cdot 102,4 + (102,4^2 \cdot 99,99 + 99,99^2 \cdot 102,4) \cdot 0,023^2] \cdot 10^{-18}}{[63,3 + 375,8 + (102,4 + 99,99) \cdot 0,023^2] \cdot 10^{-6}} = \\
 &= 345,62 \mu\Omega,
 \end{aligned} \tag{7.39}$$

jejíž hodnota po přepočtení na stranu statoru je

$$X'_{2\sigma} = p_z \cdot X_{2\sigma} = 4,96 \cdot 10^3 \cdot 345,62 \cdot 10^{-6} = 1,71 \Omega. \tag{7.40}$$

Aby bylo náhradní schéma kompletní je zapotřebí ještě určit prvky jeho příčné větve. Příčná impedance  $Z_{1h}$  je tvořena paralelní kombinací magnetizační reaktance a odporu, který respektuje ztráty v železe. Zmíněný odpor je vyjádřen jako

$$R_{Fe} = \frac{\Delta P_{Fe}}{m_1 \cdot I_{0\check{c}}} = \frac{310,91}{3 \cdot 0,62} = 265,8 \Omega, \tag{7.41}$$

kde  $I_{0\check{c}}$  je činná složka proudu naprázdno daná jako

$$\begin{aligned}
 I_{0\check{c}} &= \frac{\Delta P_{Fe} + \Delta P_{mech} + m_1 \cdot R_1 \cdot I_{\mu}^2}{m_1 \cdot U_f} = \\
 &= \frac{310,91 + 77,07 + 3 \cdot 0,49 \cdot 5,43^2}{3 \cdot 230} = 0,62 \text{ A.}
 \end{aligned} \tag{7.42}$$

Velikosti ztrát použité ve vzorcích (7.41) a (7.42) budou stanoveny v kapitole 8.

Celkový proud naprázdno je dán činnou složkou  $I_{0\check{c}}$  a jalovou, kterou je dříve vypočtený magnetizační proud  $I_{\mu}$ .

$$I_0 = \sqrt{I_{0\check{c}}^2 + I_{\mu}^2} = \sqrt{0,62^2 + 5,43^2} = 5,46 \text{ A.} \tag{7.43}$$

Ze získaných hodnot proudu naprázdno lze nyní stanovit účinnost naprázdno

$$\cos \varphi_0 = \frac{I_{0\check{c}}}{I_0} = \frac{0,62}{5,46} = 0,11. \tag{7.44}$$

Velikost magnetizační reaktance činí

$$X_{\mu} = \frac{U_f}{I_{\mu}} - X_{1\sigma} = \frac{230}{5,43} - 1,27 = 41,13 \Omega. \quad (7.45)$$

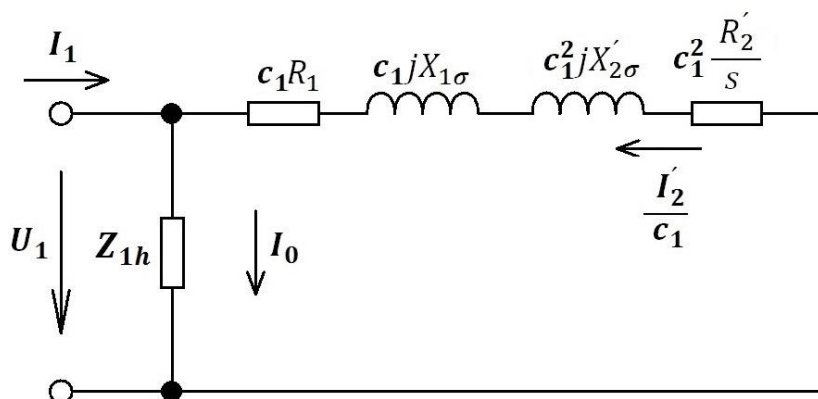
Příčná impedance poté je

$$Z_{1h} = \frac{jX_{\mu} \cdot R_{Fe}}{jX_{\mu} + R_{Fe}} = \frac{j41,13 \cdot 265,8}{j41,13 + 265,8} = 40,64 \cdot e^{j81,2} \Omega. \quad (7.46)$$

Vzhledem k použití náhradního schématu ve tvaru  $\Gamma$ -článku je nutné zjistit Hopkinsonův komplexní činitel

$$c_1 = 1 + \frac{R_1 + jX_{1\sigma}}{Z_{1h}} = 1 + \frac{0,49 + j1,27}{40,64 \cdot e^{j81,2}} = 1,03 \cdot e^{-j0,4}. \quad (7.47)$$

Zjednodušené náhradní schéma jedné fáze bude mít podobu zachycenou na obrázku č. 7.4.



Obr. 7.4 Náhradní schéma stroje ve tvaru  $\Gamma$ -článku

V tomto bodě jsou známy všechny prvky náhradního schématu a je tedy možné vyjádřit celkovou impedanci stroje pro chod naprázdno až jmenovitý

$$\begin{aligned} Z_N &= \frac{Z_{1h} \cdot [c_1 \cdot (R_1 + jX_{1\sigma}) + c_1^2 \cdot (R'_2 + jX'_{2\sigma})]}{Z_{1h} + c_1 \cdot (R_1 + jX_{1\sigma}) + c_1^2 \cdot (R'_2 + jX'_{2\sigma})} = \\ &= \frac{40,64 \cdot e^{j81,2} \cdot [1,03 \cdot e^{-j0,4} \cdot (0,49 + 1,27) + (1,03 \cdot e^{-j0,4})^2 \cdot (0,26 + 1,71)]}{40,64 \cdot e^{j81,2} + 1,03 \cdot e^{-j0,4} \cdot (0,49 + 1,27) + (1,03 \cdot e^{-j0,4})^2 \cdot (0,26 + 1,71)} = \\ &= 11,17 \cdot e^{j28} \Omega. \end{aligned} \quad (7.48)$$

Jmenovitá impedance nyní poslouží ke zjištění jmenovitého účinníku

$$\cos \varphi_N = \frac{\operatorname{Re}\{Z_N\}}{|Z_N|} = \frac{9,86}{11,17} = 0,88. \quad (7.49)$$

## 8 Jmenovité ztráty stroje

Velikosti ztrát vypočtené v této kapitole budou opět platit pouze pro jmenovitý chod stroje. V tomto stavu lze díky velmi malé rotorové frekvenci zanedbat ztráty v železe rotoru, a proto hlavní ztráty v železe budou vypočteny pouze pro stator jako

$$\begin{aligned} \Delta P_{Feh} &= \Delta p_{1,0} \cdot \left(\frac{f_1}{50}\right)^\beta \cdot (k_{dj} \cdot B_{j1}^2 \cdot m_{j1} + k_{dz} \cdot B_{z1}^2 \cdot m_{z1}) = \\ &= 2,6 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1,5} \cdot (1,5 \cdot 1,5^2 \cdot 17,53 + 1,8 \cdot 1,85^2 \cdot 5,14) = 246,36 \text{ W}, \end{aligned} \quad (8.1)$$

přičemž měrné ztráty  $\Delta p_{1,0}$  a exponent zohledňující druh použité oceli  $\beta$  pocházejí z tabulky na obrázku č. 8.1 v příloze, hmotnosti jha a zubů statoru jsou vypočteny ve vztazích (8.2) a (8.3) a konečně činitelé nerovnoměrného rozložení toku  $k_{dj}$  a  $k_{dz}$  jsou doporučeny dle [1].

Hmotnosti jha a zubů statoru činí

$$\begin{aligned} m_{j1} &= \frac{\pi}{4} \cdot [D_{1e}^2 - (D_{1i} + 2 \cdot h_{d1})^2] \cdot l_{Fe1} \cdot k_{Fe} \cdot \rho_{Fe} = \\ &= \frac{\pi}{4} \cdot [246^2 - (155^2 + 2 \cdot 21,05)^2] \cdot 10^{-6} \cdot 139 \cdot 10^{-3} \cdot 0,95 \cdot 7800 = \\ &= 17,53 \text{ kg} \end{aligned} \quad (8.2)$$

a

$$\begin{aligned} m_{z1} &= h_{z1} \cdot b_{z1} \cdot Q_1 \cdot l_{Fe1} \cdot k_{Fe} \cdot \rho_{Fe} = \\ &= 20 \cdot 6,92 \cdot 10^{-6} \cdot 36 \cdot 139 \cdot 10^{-3} \cdot 0,95 \cdot 7800 = 5,14 \text{ kg}, \end{aligned} \quad (8.3)$$

kde  $\rho_{Fe}$  je výpočtová hustota železa doporučená dle [1].

Ztráty v železe jsou z převážné části tvořeny hlavními ztrátami v železe, avšak kromě nich se ve stroji projevují i nezanedbatelné dodatečné ztráty v zubech statoru i rotoru tzv. povrchové a pulsní [1].

Povrchové ztráty v zubech statoru

$$\begin{aligned}\Delta P_{\delta p1} &= p_{\delta p1} \cdot (t_{d1} - b_{01}) \cdot Q_1 \cdot l_{Fe1} = \\ &= 330,64 \cdot (13,53 - 3,2) \cdot 10^{-3} \cdot 36 \cdot 139 \cdot 10^{-3} = 17,09 \text{ W}\end{aligned}\quad (8.4)$$

závisí na hustotě povrchových ztrát

$$\begin{aligned}p_{\delta p1} &= 0,5 \cdot k_{01} \left( \frac{Q_2 \cdot n_N}{10000} \right)^{1,5} \cdot (B_{01} \cdot t_{d2} \cdot 10^3)^2 = \\ &= 0,5 \cdot 1,6 \left( \frac{26 \cdot 1465}{10000} \right)^{1,5} \cdot (0,4 \cdot 18,66 \cdot 10^{-3} \cdot 10^3)^2 = \\ &= 330,64 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2},\end{aligned}\quad (8.5)$$

kde činitel kvality opracování povrchu hlav zubů statoru a rotoru  $k_{0x}$  je zvolen z rozmezí 1,4 až 1,8 [1], jmenovité otáčky hřídele činí

$$n_N = n_s \cdot (1 - s_n) = 1500 \cdot (1 - 0,023) = 1465 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1} \quad (8.6)$$

a amplituda pulsací je dána jako

$$B_{01} = \beta_{01} \cdot k_c \cdot B_\delta = 0,35 \cdot 1,27 \cdot 0,9 = 0,4 \text{ T}, \quad (8.7)$$

kde  $\beta_{01}$  se volí z grafické závislosti na obrázku č. 8.2 v příloze dle otevření drážek rotoru vůči vzduchové mezeře  $\frac{b_{02}}{\delta} = 6,7$ .

Stejným postupem se dojde i k velikosti povrchových ztrát v rotorových zubech, kdy bude naopak využit poměr otevření statorových drážek vůči vzduchové mezeře  $\frac{b_{01}}{\delta} = 10,7$ . Výpočet je poté následovný

$$B_{02} = \beta_{02} \cdot k_c \cdot B_\delta = 0,4 \cdot 1,27 \cdot 0,9 = 0,46 \text{ T}, \quad (8.8)$$

$$\begin{aligned}p_{\delta p2} &= 0,5 \cdot k_{02} \left( \frac{Q_1 \cdot n_N}{10000} \right)^{1,5} \cdot (B_{02} \cdot t_{d1} \cdot 10^3)^2 = \\ &= 0,5 \cdot 1,6 \left( \frac{36 \cdot 1465}{10000} \right)^{1,5} \cdot (0,46 \cdot 13,53 \cdot 10^{-3} \cdot 10^3)^2 = \\ &= 369,87 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2},\end{aligned}\quad (8.9)$$

$$\begin{aligned}\Delta P_{\delta p2} &= p_{\delta p2} \cdot (t_{d2} - b_{02}) \cdot Q_2 \cdot l_{Fe2} = \\ &= 369,87 \cdot (18,66 - 3) \cdot 10^{-3} \cdot 26 \cdot 139 \cdot 10^{-3} = 22,26 \text{ W}.\end{aligned}\quad (8.10)$$

Aby bylo možné stanovit velikost pulsních ztrát v zubech statoru, je třeba znát hodnotu amplitudy pulsů indukce ve středu těchto zubů

$$B_{p1} \approx \frac{\gamma_2 \cdot \delta}{2 \cdot t_{d1}} \cdot B_{z1} = \frac{3,8 \cdot 0,3}{2 \cdot 13,53} \cdot 1,85 = 78,15 \text{ mT}, \quad (8.11)$$

přičemž činitel respektující otevření rotorových drážek činí

$$\gamma_2 = \frac{\left(\frac{b_{02}}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{b_{02}}{\delta}} = \frac{\left(\frac{2}{0,3}\right)^2}{5 + \frac{2}{0,3}} = 3,8. \quad (8.12)$$

Pulsní ztráty v zubech statoru při jmenovitém chodu stroje jsou poté dány jako

$$\begin{aligned} \Delta P_{p1} &\approx 0,11 \cdot \left(\frac{Q_2 \cdot n_N}{1000} \cdot B_{p1}\right)^2 \cdot m_{z1} = \\ &= 0,11 \cdot \left(\frac{26 \cdot 1465}{1000} \cdot 78,15 \cdot 10^{-3}\right)^2 \cdot 5,14 = 5 \text{ W}. \end{aligned} \quad (8.13)$$

Stejně, jako tomu bylo při výpočtu povrchových ztrát, je i postup výpočtu pulsních ztrát ve statoru a rotoru totožný. Postup výpočtu pulsních ztrát v rotoru je následovný:

průměrná velikost magnetické indukce v zubech rotoru

$$B_{2av} = \frac{\frac{B_{z2Dvyp}}{0,82} + \frac{B_{z2Hvyp}}{0,82}}{2} = \frac{1,39 + 1,37}{2} = 1,68 \text{ T}, \quad (8.14)$$

činitel respektující otevření statorových drážek

$$\gamma_1 = \frac{\left(\frac{b_{01}}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{b_{01}}{\delta}} = \frac{\left(\frac{3,2}{0,3}\right)^2}{5 + \frac{3,2}{0,3}} = 7,26, \quad (8.15)$$

amplituda pulsní magnetické indukce v zubech rotoru

$$B_{p2} \approx \frac{\gamma_1 \cdot \delta}{2 \cdot t_{d2}} \cdot B_{z2} = \frac{7,26 \cdot 0,3}{2 \cdot 18,66} \cdot 1,68 = 98,29 \text{ mT}, \quad (8.16)$$

celková hmotnost všech rotorových zubů

$$\begin{aligned} m_{z2} &= (h_{zD} \cdot b_{zD} + h_{zH} \cdot b_{zHav}) \cdot Q_2 \cdot l_{Fe2} \cdot k_{Fe} \cdot \rho_{Fe} = \\ &= (13,34 \cdot 7,09 + 8,12 \cdot 10,12) \cdot 26 \cdot 139 \cdot 10^{-6} \cdot 0,95 \cdot 7800 = \\ &= 5,06 \text{ kg} \end{aligned} \quad (8.17)$$

a nakonec výsledná velikost pulsních ztrát v rotorových zubech

$$\begin{aligned} \Delta P_{p2} &\approx 0,11 \cdot \left( \frac{Q_1 \cdot n_N}{1000} \cdot B_{p2} \right)^2 \cdot m_{z2} = \\ &= 0,11 \cdot \left( \frac{36 \cdot 1465}{1000} \cdot 98,29 \cdot 10^{-3} \right)^2 \cdot 5,06 = 14,97 \text{ W}. \end{aligned} \quad (8.18)$$

Součet všech elementů dodatečných ztrát v železe pro tento stroj činí

$$\begin{aligned} \Delta P_{Fed} &= \Delta P_{\delta p1} + \Delta P_{\delta p2} + \Delta P_{p1} + \Delta P_{p2} = \\ &= 17,09 + 22,26 + 5 + 14,97 = 59,32 \text{ W}. \end{aligned} \quad (8.19)$$

Poté je možné stanovit celkovou velikost ztrát v železe

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_{Feh} + \Delta P_{Fed} = 246,36 + 59,32 = 305,68 \text{ W}. \quad (8.20)$$

Ačkoli ztráty v železe nejsou ani zdaleka zanedbatelné, hlavním činitelem na oteplení stroje jsou Jouleovy ztráty ve vinutích, které je značně převyšují. Velikost jmenovitých Jouleových ztrát ve satorovém vinutí je

$$\Delta P_{j1} = m_1 \cdot R_1 \cdot I_{1N}^2 = 3 \cdot 0,49 \cdot 20,35^2 = 603,43 \text{ W} \quad (8.21)$$

a ve vinutí rotorovém

$$\Delta P_{j2} = Q_2 \cdot R_2 \cdot I_{2N}^2 = 26 \cdot 52,79 \cdot 10^{-6} \cdot 413,96^2 = 235,2 \text{ W}. \quad (8.22)$$

Kromě elektromagnetických ztrát se v asynchronních strojích projeví i ztráty mechanické dané třením v ložiskách a odporem vzduchu působícím proti pohybu ventilátoru na hřídeli, které jsou pro tento stroj definovány jako

$$\Delta P_{mech} = K_T \cdot \left( \frac{n_N}{10} \right)^2 \cdot D_{1e}^4 = 0,98 \cdot \left( \frac{1465}{10} \right)^2 \cdot 0,246^4 = 77,07 \text{ W}, \quad (8.23)$$

kde hodnota činitele

$$K_T = 1,3 \cdot (1 - D_{1e}) = 1,3 \cdot (1 - 0,246) = 0,98 \quad (8.24)$$

respektuje způsob chlazení, kterým je ofukování vnějším ventilátorem umístěným na hřídeli stroje [1].

Nyní je možné vyjádřit hlavní ztráty stroje při jmenovitém chodu

$$\begin{aligned} \Delta P_N &= P_{Fe} + P_{j1} + P_{j2} + P_{mech} = \\ &= 305,68 + 603,43 + 235,2 + 77,07 = \\ &= 1\,221,39 \text{ W.} \end{aligned} \quad (8.25)$$

Vlivem pulsací indukce ve vzduchové mezeře, neharmonickým průběhem magnetického napětí, ale také i existencí rozptylových toků dochází v asynchronních strojích obecně k tvorbě přídavných ztrát, přičemž u strojů s kotvou nakrátko se mohou dokonce objevit i příčné proudy mezi tyčemi jejich klecí [1]. Pro tento stroj bude velikost přídavných ztrát činit

$$\begin{aligned} \Delta P_{př} &= P_{1N} - \Delta P_N - P_2 = 12359,55 - 1221,39 - 11 \cdot 10^3 = \\ &= 138,16 \text{ W,} \end{aligned} \quad (8.26)$$

kde jmenovitý příkon stroje byl vyjádřen jako

$$P_{1N} = m_1 \cdot U_f \cdot I_{1N} \cdot \cos\varphi_N = 3 \cdot 230 \cdot 20,35 \cdot 0,88 = 12\,359,55 \text{ W.} \quad (8.27)$$

Celková velikost ztrát vznikajících při jmenovitém zatížení poté je

$$\Delta P_C = \Delta P_N + \Delta P_{př} = 1221,39 + 138,16 = 1\,359,55 \text{ W.} \quad (8.28)$$

Na základě již známé velikosti ztrát lze stanovit účinnost stroje při jmenovitém chodu

$$\eta = 1 - \frac{\Delta P_C}{P_{1N}} = 1 - \frac{1359,55}{12359,55} = 89 \%. \quad (8.29)$$

## 9 Kontrola oteplení stroje

Při kontrole oteplení se využije znalosti jmenovitých ztrát v různých částech stroje. Na umístění daného ztrátotvorného činitele, který se chová jako zdroj tepla, závisí kvalita odvodu tohoto tepla vně stroje. Proto budou výpočty oteplení provedeny jednotlivě pro určité sektory.

Ztráty v izolovaných vodičích jsou ve skutečnosti vyšší, než kolik udávají jejich velikosti vypočtené v předchozí kapitole [1]. Proto se pro následující výpočty zjistí jejich hodnoty i s přírůstkem beroucím v úvahu zmíněný fakt.

Velikosti ztrát vzniklých ve satorovém vinutí lze rozdělit dle umístění oblasti vzniku na ztráty v drážkové části

$$\Delta P'_{jd1} = k_{\rho} \cdot \Delta P_{j1} \cdot \frac{2 \cdot l_d}{l_{av}} = 1,15 \cdot 603,43 \cdot \frac{2 \cdot 139}{746,63} = 258,39 \text{ W} \quad (9.1)$$

a v čelech vinutí

$$\Delta P'_{j\check{c}1} = k_{\rho} \cdot \Delta P_{j1} \cdot \frac{2 \cdot l_{\check{c}}}{l_{av}} = 1,15 \cdot 603,43 \cdot \frac{2 \cdot 234,32}{746,63} = 435,56 \text{ W.} \quad (9.2)$$

kde byl použit činitel zvýšení ztrát  $k_{\rho}$  pro izolaci teplotní třídy B dle [1].

Oteplení vnitřního povrchu satorového svazku bude činit

$$\Delta \vartheta_{pov1} = K \cdot \frac{\Delta P'_{jd1} + \Delta P_{Feh}}{\pi \cdot D_{1i} \cdot l_d \cdot \alpha_1} = 0,2 \cdot \frac{258,39 + 246,36}{\pi \cdot 0,155 \cdot 0,139 \cdot 108} = 13,81 \text{ }^{\circ}\text{C}, \quad (9.3)$$

přičemž činitel  $K$  respektující přímý odvod části tepla ze satoru skrze kostru vně stroje byl určen na základě doporučených hodnot pro stroj s krytím IP 44 z tabulky na obrázku č. 9.1 v příloze, kde lze též nálezt obrázek č. 9.2, ze kterého byl zvolen součinitel přestupu tepla  $\alpha_1$  dle velikosti vnějšího průměru stroje.

Teplotní spád v izolaci drážkové části satorového vinutí je dán jako

$$\begin{aligned} \Delta \vartheta_{id1} &= \frac{\Delta P'_{jd1}}{Q_1 \cdot O_{d1} \cdot l_d} \cdot \left( \frac{b_i}{\lambda_{ekv}} + \frac{b_1 + b_2}{16 \cdot \lambda'_{ekv}} \right) = \\ &= \frac{258,39}{36 \cdot 59,4 \cdot 139 \cdot 10^{-3}} \cdot \left( \frac{0,3}{0,16} + \frac{10,28 + 7,03}{16 \cdot 1} \right) = 2,57 \text{ }^{\circ}\text{C}, \end{aligned} \quad (9.4)$$



kde výpočtový obvod statorové drážky činí

$$\begin{aligned} O_{d1} &= 2 \cdot h_{d1} + b_1 + b_2 = (2 \cdot 21,05 + 10,28 + 7,03) \cdot 10^{-3} = \\ &= 59,4 \text{ mm}, \end{aligned} \quad (9.5)$$

střední tepelná vodivost lakové izolace  $\lambda'_{ekv}$  byla zvolena z grafické závislosti na obrázku č. 9.3 v příloze pro  $\frac{d_v}{d_{vi}} = 0,91$  a velikost střední ekvivalentní tepelné vodivosti drážkové izolace  $\lambda_{ekv}$  byla pro použitou tepelnou třídu doporučena dle [1].

Pokud platí podmínka pro obvod chladícího povrchu čel  $O_{\check{c}1} \approx O_{d1}$ , pak teplotní spád v izolaci čel bude činit

$$\begin{aligned} \Delta\vartheta_{i\check{c}1} &= \frac{\Delta P'_{jd1}}{Q_1 \cdot O_{\check{c}1} \cdot l_{\check{c}}} \cdot \left( \frac{b_i}{\lambda_{ekv}} + \frac{h_{d1}}{16 \cdot \lambda'_{ekv}} \right) = \\ &= \frac{258,39}{36 \cdot 59,4 \cdot 234,32 \cdot 10^{-3}} \cdot \left( \frac{0,3}{0,16} + \frac{21,05}{12 \cdot 1} \right) = 1,58 \text{ }^\circ\text{C}. \end{aligned} \quad (9.6)$$

Oteplení vnějšího povrchu čel nad teplotu vzduchu uvnitř stroje je

$$\begin{aligned} \Delta\vartheta_{pov\check{c}1} &= \frac{K \cdot \Delta P'_{j\check{c}1}}{2 \cdot \pi \cdot D_{1i} \cdot l_v \cdot \alpha_1} = \frac{0,2 \cdot 435,56}{2 \cdot \pi \cdot 155 \cdot 79,13 \cdot 10^{-6} \cdot 108} = \\ &= 10,47 \text{ }^\circ\text{C}. \end{aligned} \quad (9.7)$$

Střední oteplení statorového vinutí nad teplotu vzduchu uvnitř stroje

$$\begin{aligned} \Delta\vartheta'_1 &= \frac{(\Delta\vartheta_{pov1} + \Delta\vartheta_{id1}) \cdot 2 \cdot l_d + (\Delta\vartheta_{pov\check{c}1} + \Delta\vartheta_{i\check{c}1}) \cdot 2 \cdot l_{\check{c}}}{l_{av}} = \\ &= \frac{(13,81 + 2,57) \cdot 2 \cdot 139 + (10,47 + 1,58) \cdot 2 \cdot 234,32}{746,63} = 13,66 \text{ }^\circ\text{C}. \end{aligned} \quad (9.8)$$

Součet ztrát odváděných do vnitřního vzduchu stroje je dán jako

$$\begin{aligned} \Delta P'_v &= \Delta P_v \cdot (1 - K) \cdot (\Delta P'_{jd1} + \Delta P_{Feh}) - 0,9 \cdot \Delta P_{mech} = \\ &= 1486,26 \cdot (1 - 0,2) \cdot (258,39 + 246,36) - 0,9 \cdot 76,97 = \\ &= 1013,19 \text{ W}, \end{aligned} \quad (9.9)$$

kde

$$\begin{aligned} \Delta P_v &= \Delta P_c + (k_\rho - 1) \cdot (\Delta P_{j1} + \Delta P_{j2}) = \\ &= 1359,55 + (1,15 - 1) \cdot (603,43 + 241,28) = 1486,36 \text{ W}. \end{aligned} \quad (9.10)$$

Chladicí povrch kostry činí

$$\begin{aligned} S_{t\check{e}l} &= (\pi \cdot D_{1e} + 8 \cdot O_z) \cdot (l_d + 2 \cdot l_v) = \\ &= (\pi \cdot 246 + 8 \cdot 200) \cdot (139 + 2 \cdot 79,13) \cdot 10^{-6} = 0,705 \text{ m}^2, \end{aligned} \quad (9.11)$$

kde  $O_z$  je obvod příčného řezu chladících žebor kostry stanovený na základě potřebného a dodávaného chladicího vzduchu (vztahy (9.14) a (9.16)) tak, aby rozdíl těchto hodnot nebyl příliš malý.

Oteplení vnitřního vzduchu stroje oproti okolnímu prostředí je

$$\Delta\vartheta_v = \frac{\Delta P'_v}{S_{t\check{e}l} \cdot \alpha_v} = \frac{1013,19}{0,705 \cdot 27} = 53,1 \text{ }^\circ\text{C}, \quad (9.12)$$

kde součinitel přestupu tepla vnějšího povrchu stroje  $\alpha_v$  se určí opět dle charakteristiky na obrázku č. 9.2 v příloze.

Střední oteplení vinutí činí

$$\Delta\vartheta_1 = \Delta\vartheta_v + \Delta\vartheta'_1 = 53,1 + 13,66 = 66,81 \text{ }^\circ\text{C}, \quad (9.13)$$

což odpovídá povoleným teplotám pro použitou izolaci. Izolaci teplotní třídy B je dovoleno provozovat při teplotách nižších než  $130 \text{ }^\circ\text{C}$ , avšak pro trvalý provoz se doporučuje, aby tato hodnota byla minimálně o 10 % nižší než provozní doporučená teplota izolace, která činí  $75 \text{ }^\circ\text{C}$  [1].

Aby bylo chlazení efektivní, je potřeba průtok vzduchu žebry stroje o velikosti

$$Q_v = \frac{k_m \cdot \Delta P'_v}{1100 \cdot \Delta\vartheta_v} = \frac{4,93 \cdot 1013,19}{1100 \cdot 53,1} = 85,46 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}, \quad (9.14)$$

kde byl použit činitel  $k_m$  daný vztahem (9.15), který respektuje rozdílnost kvality chlazení v bodech s různými vzdálenostmi od vnějšího ventilátoru [1]. Pro jeho výpočet je třeba stanovit činitel velikosti stroje, který pro takovýto stroj činí  $m = 2,6$ .

$$k_m = m \cdot \sqrt{\frac{n_N}{100} \cdot D_{1e}} = 2,6 \cdot \sqrt{\frac{1465}{100} \cdot 0,246} = 4,94 \quad (9.15)$$

Průtok vzduchu dodávaný vnějším ventilátorem

$$Q'_v = 0,6 \cdot D_{1e}^3 \cdot \frac{n_N}{100} = 0,6 \cdot 0,246^3 \cdot \frac{1465}{100} = 130,871 \cdot s^{-1} \quad (9.16)$$

je větší než potřebný, proto lze konstatovat, že bylo pro tento stroj dosaženo efektivního chlazení a lze jej z hlediska přípustného oteplení provozovat jak při jmenovitém chodu, tak i ve vhodné míře při otáčkách nižších než jmenovitých.

## 10 Vliv skin efektu a nasycení zubů

Výpočty v této a následující kapitole byly provedeny pomocí výpočetního programu Matlab, kdy bylo využito vektorových a maticových počtů. Tento postup byl zvolen proto, aby byly rozběhové charakteristiky vyjádřeny s vyšší přesností a hlavně spojitostí výsledků v závislosti na velikosti skluzu. Veškeré následující vztahy byly definovány pro vektor skluzu, který sestává z přibližně  $10^4$  hodnot jdoucích od nuly do jedné. Z tohoto důvodu budou následující výpočty podány jen pomocí nedosažených předpisů, na jejichž základě byly počítány. Velikosti hlavních provozních veličin v určitých hodnotách skluzu jsou zapsány v tabulce č. 11.1.

### 10.1 Skin efekt

V závislosti na skluzu se do rotorového tyčového vinutí indukují napětí, která vyvolají proudy o frekvenci, jejíž velikost je dána vztahem (10.1):

$$f_2 = s \cdot f_1 \text{ (Hz)}. \quad (10.1)$$

Při rozběhu stroje, kdy je skluz rovný jedné, je její velikost totožná s napájecí frekvencí. Elektromagnetické pole o takové frekvenci vytvoří v rotorových tyčích vířivé proudy, které způsobí vytlačení proudové hustoty ve směru kolmém k indukčním čarám [1, 10]. V tomto případě bude platit, že rozptylový drážkový tok, jehož směr je kolmý k výšce rotorové drážky, bude indukovat v drážce vířivé proudy. Ty svým působením vytlačí hlavní proudovou hustotu směrem ke vzduchové mezeře, čímž se sníží aktivní hloubka tyčí a zvýší se jejich odpor jak elektrický, tak i magnetický. V závislosti na tom se zmenší také průřez cesty rozptylového toku, což bude mít za následek snížení rozptylové reaktance. Skin efekt se projeví i v kruzích nakrátko.

Tento jev způsobí již dříve zmíněný princip dvojitě klece nakrátko a to, že při rozběhu stroje bude rotorový proud protékat převážně rozběhovou klecí s velkým odporem, čímž se značně zvýší záběrný moment a sníží rozběhový proud.

Aby bylo dosaženo co nejvyšší přesnosti výpočtu je nutné rotorovou drážku ve směru její výšky rozdělit na  $n$ -vrstev, přičemž jejich minimální potřebný počet je vyjádřen jako

$$\begin{aligned} n_{vr} &= 4 \cdot 96,32 \cdot h_{d2} \cdot \sqrt{s} \cdot \sqrt{\frac{b_t}{b_d}} = \\ &= 4 \cdot 96,32 \cdot 24,51 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{1} \cdot \sqrt{0,9} \doteq 9, \end{aligned} \quad (10.2)$$

kde poměr šířky tyče a šířky drážky pro vložené tyče činí  $\frac{b_t}{b_d} = 0,9$  [1].

K výpočtu skin efektu bylo na základě značně proměnné šířky této drážky zvoleno rozdělení na 16 vrstev. Na posledních dvou stranách příloh je umístěn předpis výpočtu pro program. Velikost konduktivity vzduchu, ve výpočtu označená jako  $\gamma_{AIR}$ , činí přibližně  $\gamma_{AIR} = 5,14 \cdot 10^{-16} \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$  [11].

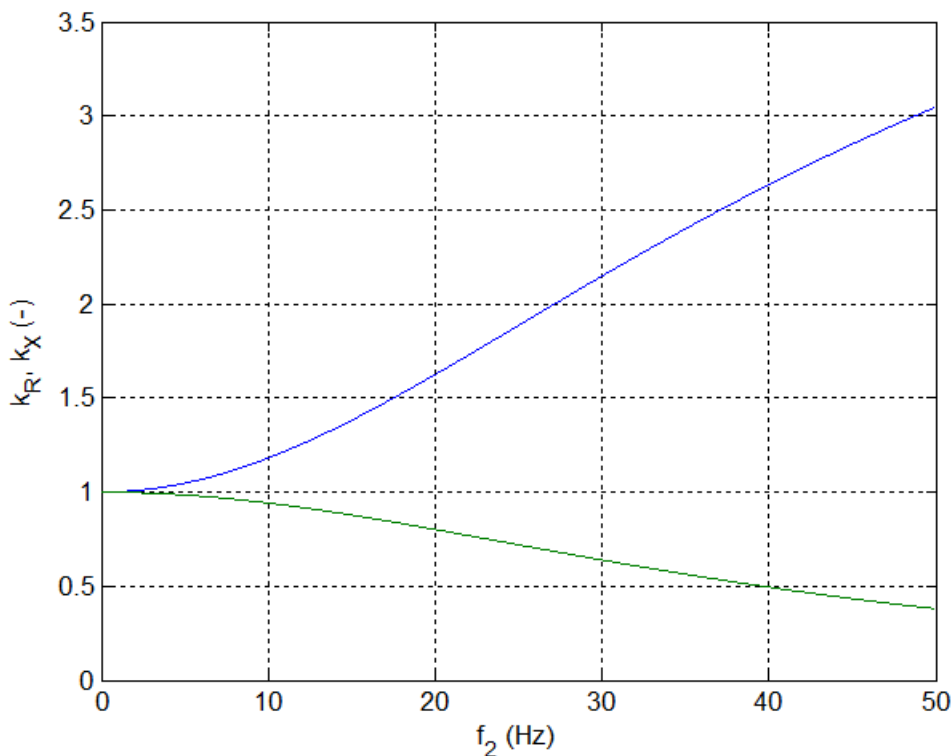
Výpočtem byly získány velikosti hodnot činitelů změny odporu a magnetické vodivosti drážky vlivem skin efektu při daných velikostech skluzu. Tito činitelé jsou definováni jako

$$k_{R(s)} = \frac{R_{t\xi(s)}}{R_t} (-) \quad (10.3)$$

a

$$k_{X(s)} = \frac{\lambda_{d\xi(s)}}{\lambda_d} (-), \quad (10.4)$$

kde hodnoty nacházející se v čitateli odpovídají stavu při působení skin efektu a hodnoty ve jmenovateli platí pro stav naprázdno nebo jmenovitý, kdy rotorová frekvence je nulová či nule blízká. Na obrázku č. 10.1 je znázorněn průběh získaných velikostí těchto činitelů v závislosti na velikosti rotorové frekvence, přičemž modrá křivka odpovídá činiteli  $k_R$  a zelená  $k_X$ .



Obr. 10.1 Závislosti činitelů skin efektu na rotorové frekvenci

## 10.2 Nasycení zubů statoru a rotoru

Při skluzech vyšších než skluz zvratu tečou v obou vinutích proudy větší než jmenovité, což vede k vyvolání značných rozptylových magnetických indukčních toků, které způsobí přesycení zubů jak ve statoru, tak i v rotoru [1]. Obecně při rozběhu asynchronního stroje může jím odebíraný proud nabývat až osminásobku jmenovitého proudu [12]. Následkem toho je snížena rozptylová reaktance v drážkách, ale i tzv. diferenční rozptylová reaktance ve vzduchové mezeře, přes kterou se částečně uzavírá rozptylový magnetický indukční tok.

Velikost statorového proudu bez uvažování nasycení rozptylových cest je vyjádřena jako

$$I_{1(s)} = \frac{U_f}{|Z_{(s)}|} \text{ (A)}, \quad (10.5)$$

kde impedance náhradního schématu je

$$\mathbf{Z}_{(s)} = \frac{\mathbf{Z}_{1h} \cdot \left[ \mathbf{c}_1 \cdot (R_1 + jX_{1\sigma}) + \mathbf{c}_1^2 \cdot \left( \frac{R_{2(s)'}}{s} + jX'_{2\sigma(s)} \right) \right]}{\mathbf{Z}_{1h} + \mathbf{c}_1 \cdot (R_1 + jX_{1\sigma}) + \mathbf{c}_1^2 \cdot \left( \frac{R_{2(s)'}}{s} + jX'_{2\sigma(s)} \right)} \quad (\Omega). \quad (10.6)$$

Výpočetní poměr poudu při nasycení a bez tohoto jevu činí  $k_{nas} = 1,25$  [1].

Proud při nasycení se poté bude rovnat

$$I_{nas(s)} = k_{nas} \cdot I_{1(s)} = 1,25 \cdot I_{1(s)} \quad (\text{A}). \quad (10.7)$$

Z celkového středního magnetického napětí statorového vinutí při nasycení

$$F_{dav(s)} = 0,7 \cdot \frac{I_{nas(s)} \cdot V_d}{a} \cdot \left( k_{v1} \cdot \frac{Q_1}{Q_2} \right) \quad (\text{A}) \quad (10.8)$$

se stanoví velikost fiktivní magnetické indukce rozptylového toku ve vzduchové mezeře

$$B_{f\delta(s)} = \frac{F_{dav(s)}}{1,6 \cdot \delta \cdot C_{nas}} \cdot 10^{-6} \quad (\text{T}), \quad (10.9)$$

kde činitel nasycení rozptylových cest  $C_{nas}$  je dán vztahem (10.10):

$$C_{nas} = 0,64 + 2,5 \cdot \sqrt{\frac{\delta}{t_{d1} + t_{d2}}}. \quad (10.10)$$

Dle hodnoty  $B_{f\delta(s)}$  se pro konkrétní velikost skluzu určí činitel  $\chi_{\delta(s)}$  ze závislosti zobrazené na obrázku č. 10.2 v příloze. Tento činitel se poté využije ke stanovení velikostí rozšíření otevření statorových a rotorových drážek při nasycení rozptylových cest, které budou

$$\Delta b_{01(s)} = (t_{d1} - b_{01}) \cdot (1 - \chi_{\delta(s)}) \quad (\text{m}), \quad (10.11)$$

$$\Delta b_{02(s)} = (t_{d2} - b_{02}) \cdot (1 - \chi_{\delta(s)}) \quad (\text{m}). \quad (10.12)$$

Zvětšením těchto rozměrů se zvýší magnetický odpor rozptylových drážkových cest, což povede ke snížení jejich magnetické vodivosti o úbytky, které budou činit

$$\Delta\lambda_{d1nas(s)} = \frac{h_{01} + 0,58 \cdot h_k}{b_{01}} \cdot \frac{\Delta b_{01(s)}}{\Delta b_{01(s)} + 1,5 \cdot b_{01}}, \quad (10.13)$$

$$\Delta\lambda_{d2nas(s)} = \frac{h_{02}}{b_{02}} \cdot \frac{\Delta b_{02(s)}}{\Delta b_{02(s)} + b_{02}}. \quad (10.14)$$

Dopad nasycení rozptylových cest se projeví i na velikosti diferenčních rozptylových magnetických vodivostí, které poté budou

$$\lambda_{dif1nas(s)} = \lambda_{dif1} \cdot \chi\delta(s), \quad (10.15)$$

$$\lambda_{dif2nas(s)} = \lambda_{dif2} \cdot \chi\delta(s). \quad (10.16)$$

### 10.3 Impedance stroje s vlivem skinefektu a nasycení zubů

Velikost odporu statorového vinutí je stále dána vztahem (7.6), avšak velikost odporu rotorových klecí nakrátko je třeba při uvažování skinefektu přepočítat. Spojením vztahů (7.20) a (10.3) lze stanovit vztahy pro odpory dolní a horní klece nakrátko při působení skinefektu jako

$$R_{2H\xi(s)} = k_{R(s)} \cdot \frac{R_2 \cdot R_{2D}}{R_2 - R_{2D}} (\Omega), \quad (10.17)$$

$$R_{2D\xi(s)} = k_{R(s)} \cdot \frac{R_2 \cdot R_{2H}}{R_2 - R_{2H}} (\Omega). \quad (10.18)$$

Statorová rozptylová reaktance bude v závislosti na skluzu proměnná dle vztahu (10.19):

$$X_{1\sigma\xi(s)} = X_{1\sigma} \cdot \frac{\lambda_{d1nas(s)} + \lambda_{dif1nas(s)}}{\lambda_{d1} + \lambda_{dif1}} (\Omega), \quad (10.19)$$

kde magnetická vodivost drážkového rozptylu je z důvodu nasycení snížena

$$\lambda_{d1nas(s)} = \lambda_{d1} - \Delta\lambda_{d1nas(s)}. \quad (10.20)$$

Situace se stanovením rotorové rozptylové reaktance je poněkud složitější. Nejprve je třeba stanovit rozptylové reaktance dílčích klecí nakrátko v závislosti na míře skinefektu. K tomu se opět využije syntéza dvou rovnic, a to (7.39) a (10.4), čímž se získají jejich velikosti, zatím bez uvažování nasycení rozptylových cest

$$X'_{2H\xi(s)} = k_{X(s)} \cdot \left[ \frac{(R_{2D} + R_{2H})^2}{R_{2D}^2} \cdot (X_{2\sigma} - X_{2dif} - X_{2HD}) - X_{2D} \cdot \frac{R_{2H}^2}{R_{2D}^2} \right] (\Omega), \quad (10.21)$$

$$X'_{2D\xi(s)} = k_{X(s)} \cdot \left[ \frac{(R_{2D} + R_{2H})^2}{R_{2H}^2} \cdot (X_{2\sigma} - X_{2dif} - X_{2HD}) - X_{2H} \cdot \frac{R_{2D}^2}{R_{2H}^2} \right] (\Omega). \quad (10.22)$$

Bude-li se brát v úvahu i vliv nasycení rozptylových cest, budou velikosti těchto reaktancí

$$X_{2H\xi(s)} = X'_{2H\xi(s)} \cdot \frac{\lambda_{dH} - \Delta\lambda_{d2nas(s)}}{\lambda_{dH}} (\Omega) \quad (10.23)$$

$$X_{2D\xi(s)} = X'_{2D\xi(s)} \cdot \frac{\lambda_{dD} - \Delta\lambda_{d2nas(s)}}{\lambda_{dD}} (\Omega) \quad (10.24)$$

Za použití vztahu (7.35) lze vyjádřit skutečný odpor rotorového vinutí závislý na skluzu  $R_{2\xi(s)}$ , který bude platit i pro skluzu vyšší než skluz zvratu. Do tohoto vztahu se namísto jmenovitých hodnot dosadí velikosti odporů a reaktancí vyjádřené v této kapitole. Výsledný odpor rotorového vinutí přepočtený na stranu statoru poté bude

$$R'_{2\xi(s)} = p_z \cdot R_{2\xi(s)} (\Omega). \quad (10.25)$$

Analogickým způsobem se vyjádří i rotorová rozptylová reaktance. Pro dosažení bude nyní použit vztah (7.39). Namísto reaktance diferenčního rozptylu je třeba dosadit:  $X_{2dif} \cdot \chi_{\delta(s)}$ . Pro společnou rozptylovou reaktanci obou drážek bude na základě podmínky (7.33) platit:  $X_{2HD(s)} = X_{2H\xi(s)}$ . Výsledná rozptylová reaktance rotorového vinutí bude po přepočtení na stranu statoru dána jako

$$X'_{2\sigma\xi(s)} = p_z \cdot X_{2\sigma\xi(s)}. \quad (10.26)$$

Před stanovením celkové impedance náhradního schématu je třeba upřesnit Hopkinsonův komplexní činitel, který závisí na statorového rozptylového reaktanci, jenž byla v této kapitole, oproti dříve použité jmenovité hodnotě, pozměněna.

$$c_{1(s)} = 1 + \frac{R_1 + jX_{1\sigma\xi(s)}}{Z_{1h}} \quad (10.27)$$

Celková impedance náhradního schématu daného obrázkem č. 7.2, která bude platit i pro skluzu jiné než jmenovitý, je

$$Z_{(s)} = \frac{Z_{1h} \cdot [c_{1(s)} \cdot (R_1 + jX_{1\sigma\xi(s)}) + c_{1(s)}^2 \cdot (R'_{2\xi(s)} + jX'_{2\sigma\xi(s)})]}{Z_{1h} + c_{1(s)} \cdot (R_1 + jX_{1\sigma\xi(s)}) + c_{1(s)}^2 \cdot (R'_{2\xi(s)} + jX'_{2\sigma\xi(s)})} (\Omega). \quad (10.28)$$



## 11 Provozní charakteristiky

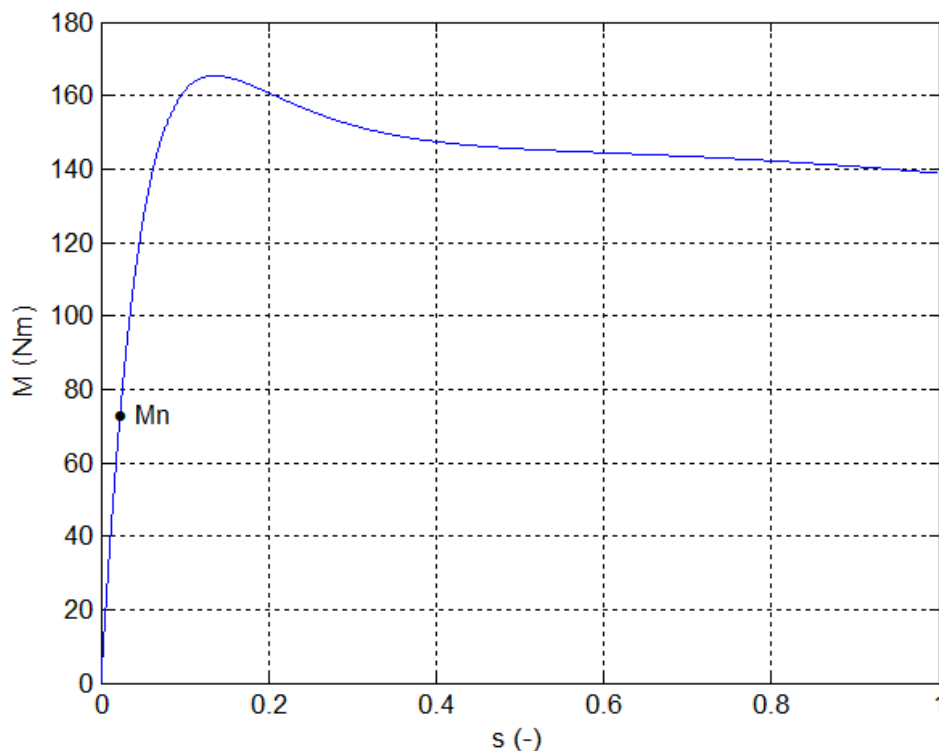
Když jsou známy velikosti prvků náhradního schématu pro určité hodnoty skluzu, je možné stanovit průběhy točivého momentu

$$M_{(s)} = \frac{p \cdot m_1}{2 \cdot \pi \cdot f_1} \cdot \frac{U_f^2 \cdot \frac{R'_{2\xi(s)}}{s}}{\left(R_1 + c_{1(s)} \cdot \frac{R'_{2\xi(s)}}{s}\right)^2 + (X_{1\sigma\xi(s)} + c_{1(s)} \cdot X'_{2\sigma\xi(s)})^2} \quad (\text{N} \cdot \text{m}), \quad (11.1)$$

kde  $c_{1(s)}$  je velikost vektoru  $\mathbf{c}_{1(s)}$ .

Dosažením jmenovitého skluzu a složek impedance do vztahu (11.1) se získá jmenovitá hodnota točivého momentu

$$\begin{aligned} M_{(s)} &= \frac{p \cdot m_1}{2 \cdot \pi \cdot f_1} \cdot \frac{U_f^2 \cdot \frac{R'_2}{s}}{\left(R_1 + c_1 \cdot \frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_{1\sigma} + c_1 \cdot X'_{2\sigma})^2} = \\ &= \frac{2 \cdot 3}{2 \cdot \pi \cdot 50} \cdot \frac{230^2 \cdot \frac{0,26}{0,023}}{\left(0,49 + 1,03 \cdot \frac{0,26}{0,023}\right)^2 + (1,28 + 1,03 \cdot 1,71)^2} = 72,7 \text{ N} \cdot \text{m}. \end{aligned} \quad (11.2)$$



Obr. 11.1 Momentová charakteristika stroje

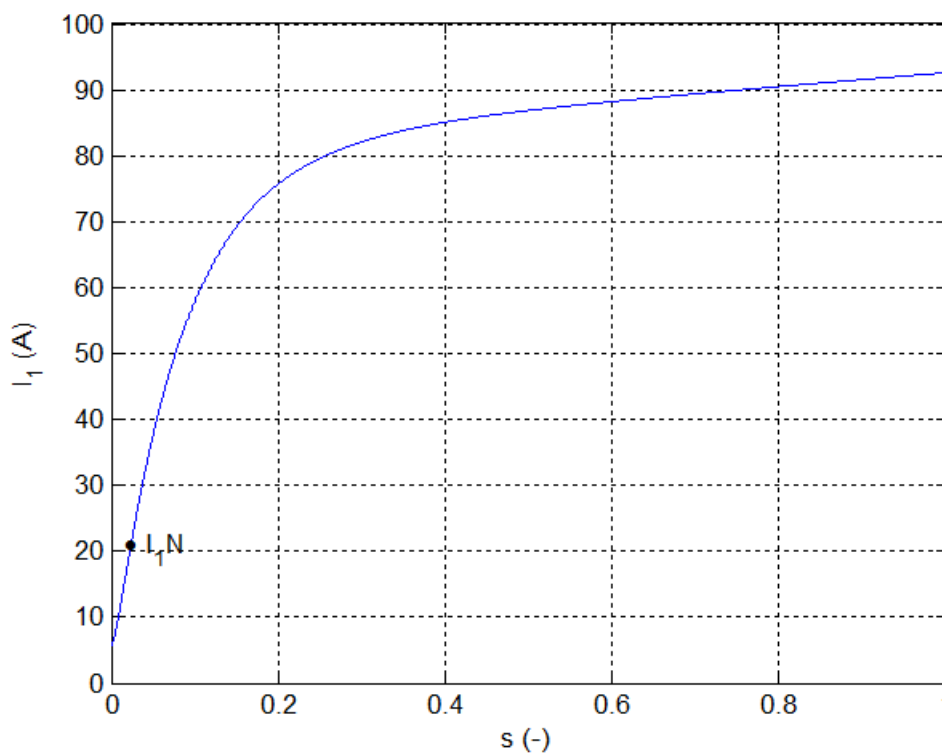
Ze získané celkové impedance náhradního schématu lze stanovit jak velikost proudu statorovým vinutím

$$I_{1(s)} = \frac{U_f}{|Z_{(s)}|} \text{ (A)}, \quad (11.3)$$

tak i jeho fázor

$$\mathbf{I}_{1(s)} = \frac{\mathbf{U}_f}{\mathbf{Z}_{(s)}} \text{ (A)}, \quad (11.4)$$

který bude v následující kapitole potřebný pro tvorbu kružnicového diagramu stroje.



Obr. 11.2 Proudová charakteristika stroje

Pro získání elektrického příkonu, mechanického výkonu, účinníku a účinnosti stroje v závislosti na skluzu lze využít výpočtů z kapitoly č. 8, avšak s několika obměnami. Zprvė namísto jmenovitých otáček budou dosazeny otáčky proměnné se skluzem

$$n = n_s \cdot (1 - s) \text{ (ot} \cdot \text{min}^{-1}\text{)}. \quad (11.5)$$

Dále je nutné upravit výpočty Jouleových ztrát ve statoru a rotoru na tvary:

$$\Delta P_{j1(s)} = m_1 \cdot R_1 \cdot I_{1(s)}^2 \text{ (W)}, \quad (11.6)$$

$$\Delta P_{j2(s)} = Q_2 \cdot R_{2\xi(s)} \cdot I_{2(s)}^2 \text{ (W)}, \quad (11.7)$$

kde rotorový proud je dán jako

$$I_{2(s)} = k_i \cdot p_i \cdot I_{1(s)} \text{ (A)}. \quad (11.8)$$

Poslední prvek, který zbývá vyjádřit, je účinník

$$\cos\varphi_{(s)} = \frac{\operatorname{Re}\{\mathbf{Z}_{(s)}\}}{|\mathbf{Z}_{(s)}|} \text{ (-)}, \quad (11.9)$$

pomocí něhož lze stanovit elektrický příkon

$$P_{1(s)} = m_1 \cdot U_f \cdot I_{1(s)} \cdot \cos\varphi_{(s)} \text{ (W)} \quad (11.10)$$

a dále pak mechanický výkon bude

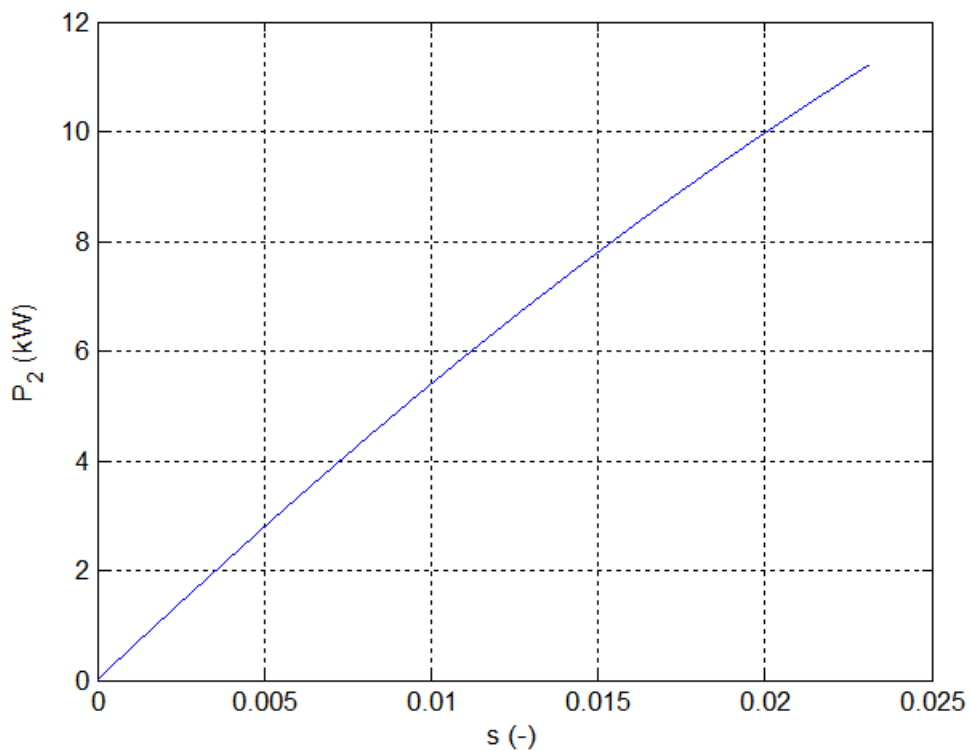
$$P_{2(s)} = P_{1(s)} - \Delta P_{c(s)} \text{ (W)}. \quad (11.11)$$

Výsledné hodnoty zátěžových charakteristik jsou shrnuty v tabulce č. 11.1.

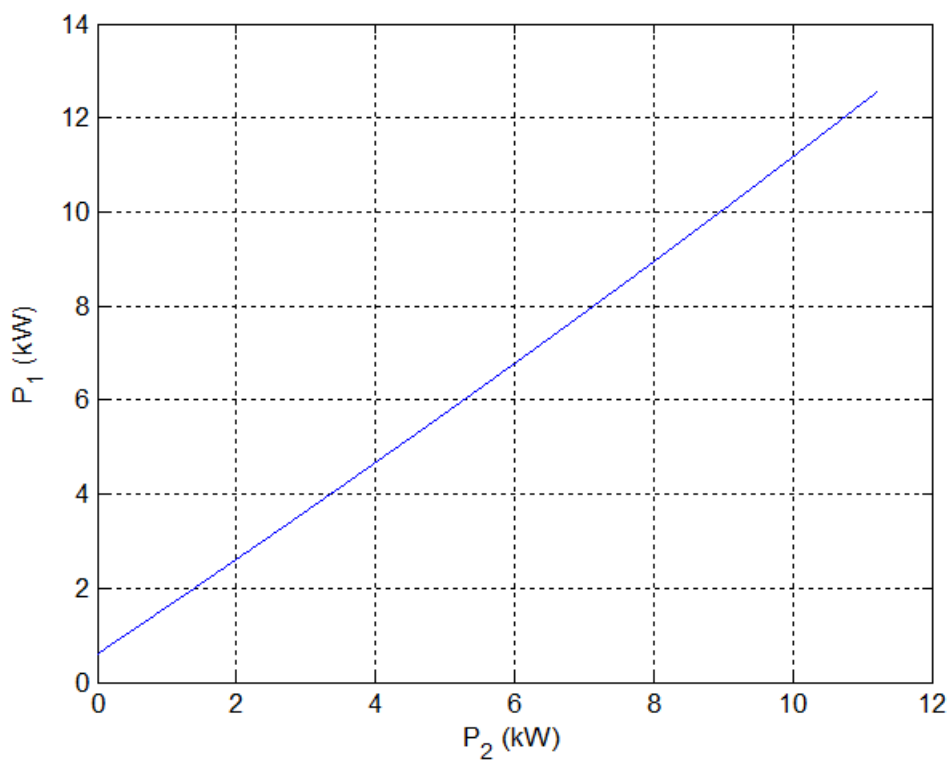
Tab. 11.1 Zátěžovací charakteristika

	$s = 0,25 \cdot s_n$	$s = 0,5 \cdot s_n$	$s = 0,75 \cdot s_n$	$s = s_n$	$s = 1,5 \cdot s_n$
$M \text{ (N} \cdot \text{m)}$	20,39	39,5	57	72,7	98,77
$I_1 \text{ (A)}$	8,03	12	16,25	20,43	28,23
$P_1 \text{ (kW)}$	3,82	6,92	9,82	12,49	1,71
$P_2 \text{ (kW)}$	3,1	6,05	8,72	11,08	14,9
$\cos\varphi \text{ (-)}$	0,69	0,84	0,88	0,88	0,88

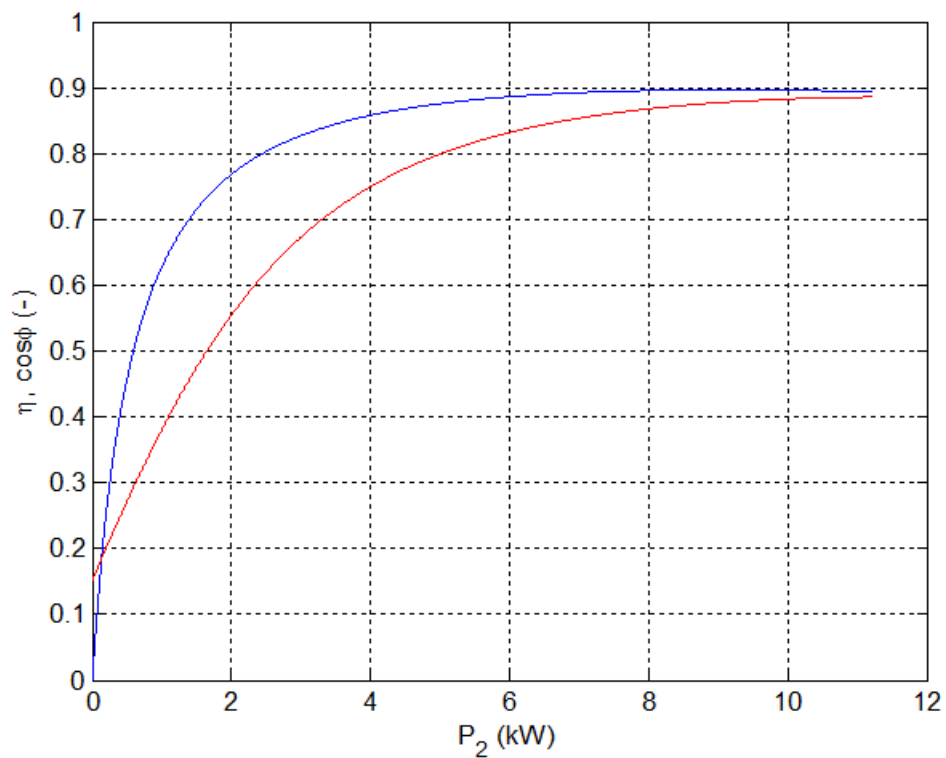
Charakteristiky pro hodnoty skluzu běžného provozu jsou uvedeny v následujících grafických závislostech.



Obr. 11.3 Závislost mechanického výkonu na skluzu



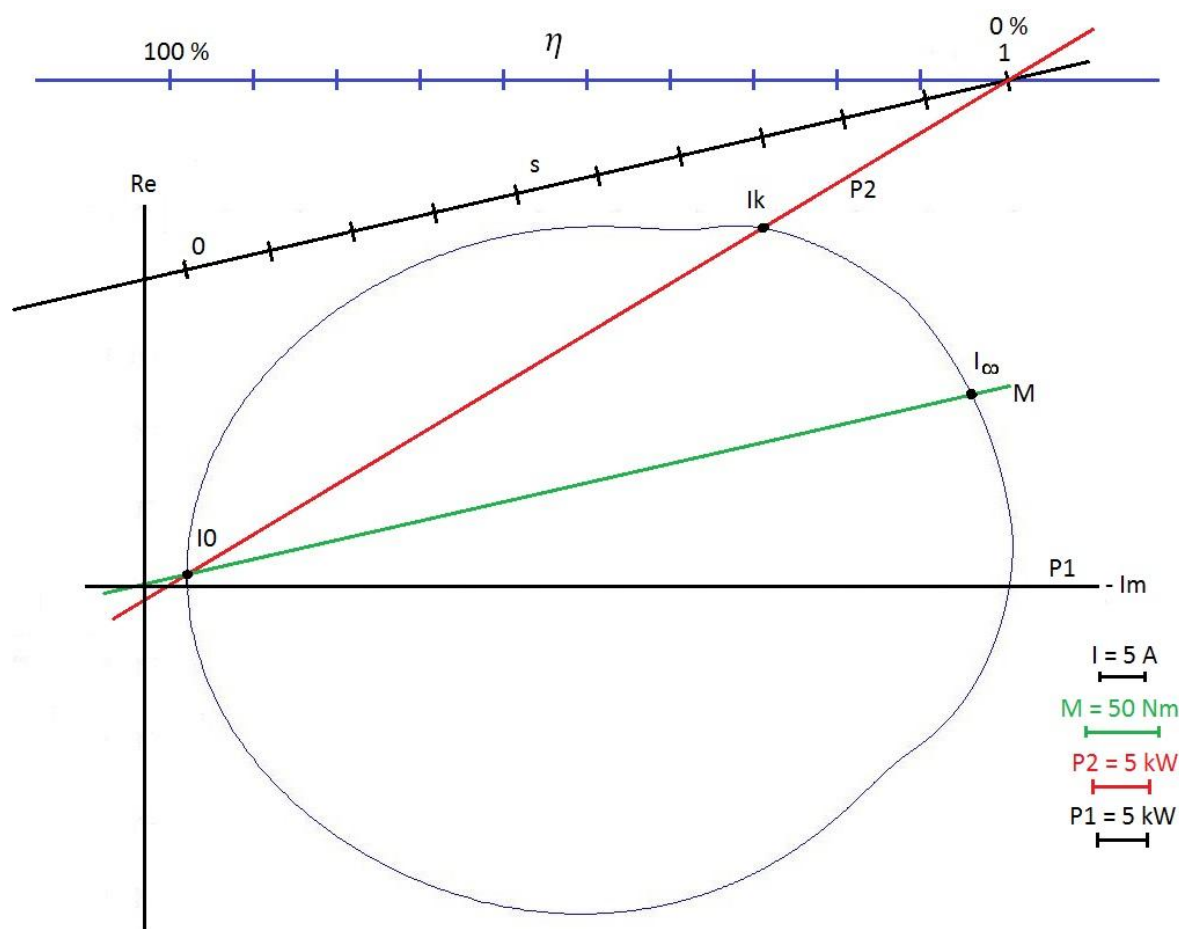
Obr. 11.4 Závislost elektrického příkonu na mechanickém výkonu



Obr. 11.5 Závislosti účinnosti (modrá) a účiníku (červená) na velikosti mechanického výkonu

## 11.1 Kružnicový diagram

Získání důležitých provozních veličin asynchronního stroje je kromě výpočetní metody možné také cestou grafickou. K tomuto účelu slouží kružnicové diagramy, které jsou obvykle konstruovány na základě znalostí zaprvé proudů a účinnků při měřeních naprázdno a nakrátko. Dále pak je pro jejich konstrukci třeba zjistit velikosti odporů statorového a rotorového vinutí. Jelikož tento návrh je pouze teoretický, byly namísto naměřených hodnot použity hodnoty vypočítané. Na obrázku č. 11.6 je zobrazen vzniklý kružnicový diagram.



Obr. 11.6 Kružnicový diagram stroje

Pro přehlednost byly z diagramu odstraněny konstrukční čáry. Dle pravidel odečítání z kružnicových diagramů lze z tohoto vyčíst velikosti následujících veličin: statorový proud, účinník, točivý moment (zelená), výkon (červená), příkon (vodorovná černá, záporná část imaginární osy), skluz (černá rovnoběžná s přímkou momentu) a účinnost (vodorovná modrá). V pravém dolním okraji kružnicového diagramu jsou uvedena měřítka ke zmíněným veličinám, jejichž osy neobsahují stupnici.

## Závěr

Vypracováním této bakalářské práce byl proveden návrh asynchronního stroje s dvojitou (Boucherotovou) klecí nakrátko. Na obrázcích č. 1.1 až 1.3 v příloze je možné vidět tvarové provedení tohoto stroje vykreslené na základě jeho rozměrů, které byly navrženy v kapitolách 1 až 6. Podle těchto rozměrů byly poté dopočítány prvky náhradního schématu stroje. Z obou získaných souborů hodnot lze stanovit vlastnosti stroje, ze kterých je možné zhodnotit a částečně predikovat jeho chování.

Celkové ztráty vznikající ve stroji při jmenovitém chodu vedou na 89% účinnost, což v souvislosti s výkonem stroje znamená, že spadá do třídy IE2 pro asynchronní stroje se zvýšenou účinností. Výpočet oteplení vycházející z velikosti těchto ztrát potvrzuje, že stroj má dostatečnou rezervu chladícího vzduchu dodávaného vnějším ventilátorem na to, aby dokázal pracovat po delší dobu i při vyšším zatížení, resp. v celé lineární části momentové charakteristiky.

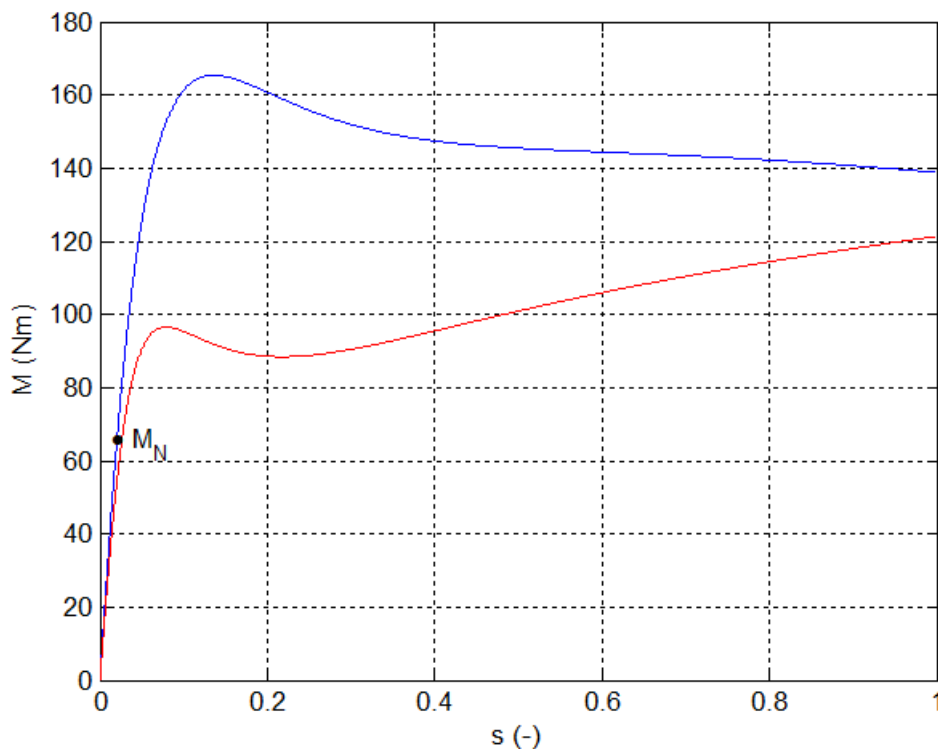
Další skupinou vlastností, které lze ze získaných hodnot vyjádřit, jsou provozní charakteristiky, v nichž je možné sledovat výhody dvojitě (Boucherotovy) klece nakrátko oproti běžným strojům s jednoklecovým vinutím v rotoru. Momentová charakteristika, obrázek č. 11.1, nabízí rozběh s přibližně dvojnásobným točivým momentem oproti jmenovitému, a přesto si stroj zachová poměrně vysokou odolnost proti přetížení v pracovní oblasti momentové charakteristiky. Dalším přínosem je snížení záběrného proudu na přibližně 4,5-násobek jmenovité hodnoty, oproti tomu záběrný proud běžného asynchronního stroje s klecí nakrátko může dosahovat až osminásobku jmenovitého proudu [12].

Jako praktickou přednost tohoto stroje vidím možnost rozběhu s přímo připojenou zátěží požadující jmenovitý točivý moment již při rozběhu. Význam dvojnásobného záběrného točivého momentu by mohl být plně využit například při pohonu zátěží s navíječkovou momentovou charakteristikou.

Při návrhu tohoto stroje bylo zjištěno, že lze poměrně snadným způsobem optimalizovat provozní charakteristiky. Jedná se o změnu rozměrů pouhých dvou částí rotorové drážky, které mají silný vliv na tyto průběhy. Těmito částmi jsou můstek, který spojuje drážky rozběhové a provozní klece nakrátko a má silný vliv na velikost

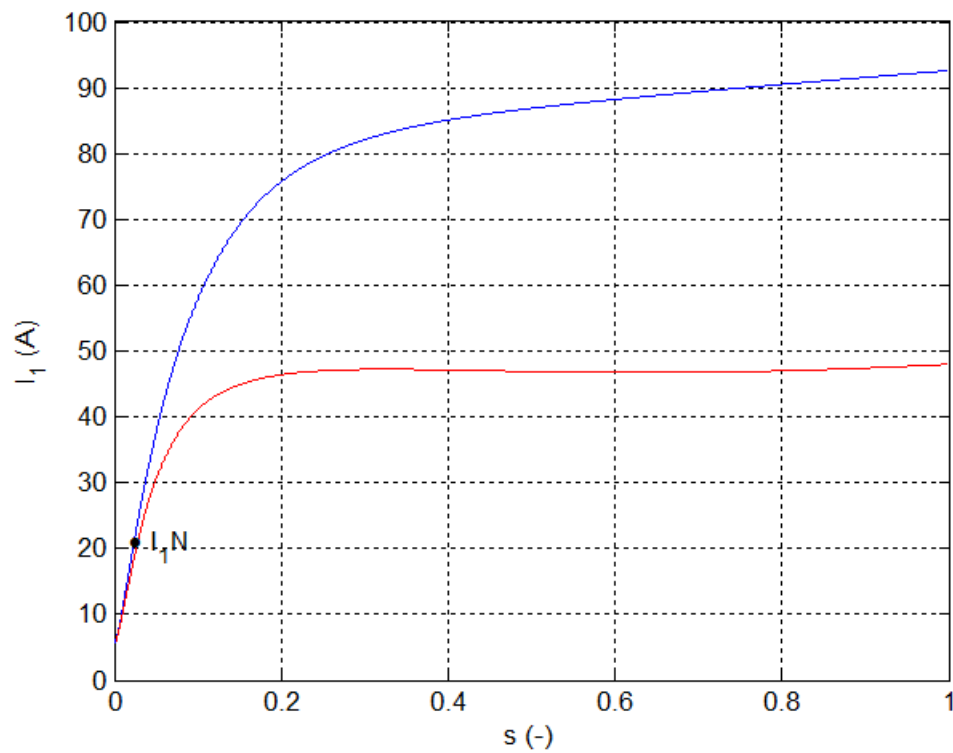
rozptylového magnetického indukčního toku, a průřez rozběhové drážky, resp. její tyče, čímž se změní velikost odporu rozběhové klece nakrátko.

Zmíněným způsobem lze například upravit provozní charakteristiku tak, aby rozběhový proud byl pouze 2,5-násobný oproti jeho jmenovité hodnotě. Šířka a výška můstku se pro tento účel změní na velikosti  $b_m = 1$  mm a  $h_m = 6,65$  mm a průměr rozběhové drážky bude činit  $b_H = 3,27$  mm. Tato modifikace sníží rozběhový proud, avšak za cenu snížení přetížitelnosti stroje v pracovní oblasti a vytvoření sedlového bodu v momentové charakteristice. Při pohonu stálé zátěže, která nepřevyšuje dno sedlového bodu, by však zmíněné nedostatky v momentové charakteristice nemusely být přítěží. V následujících dvou obrázcích, č. 12.1 a 12.2, je zobrazeno porovnání průběhů točivého momentu a proudu po provedení modifikace (červená) a před ní (modrá).



Obr. 12.1 Porovnání momentových charakteristik



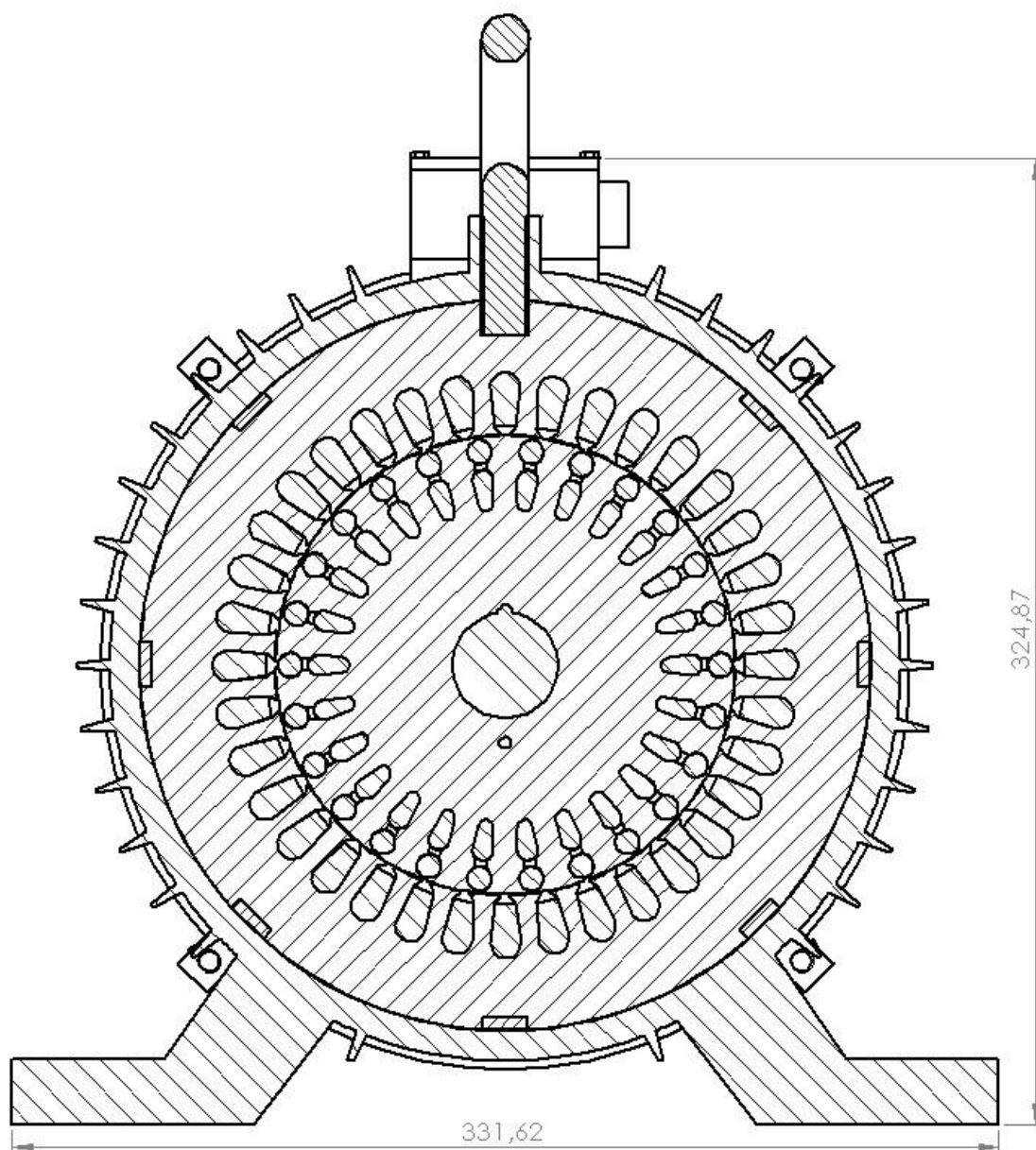


Obr. 12.2 Porovnání statorových proudů

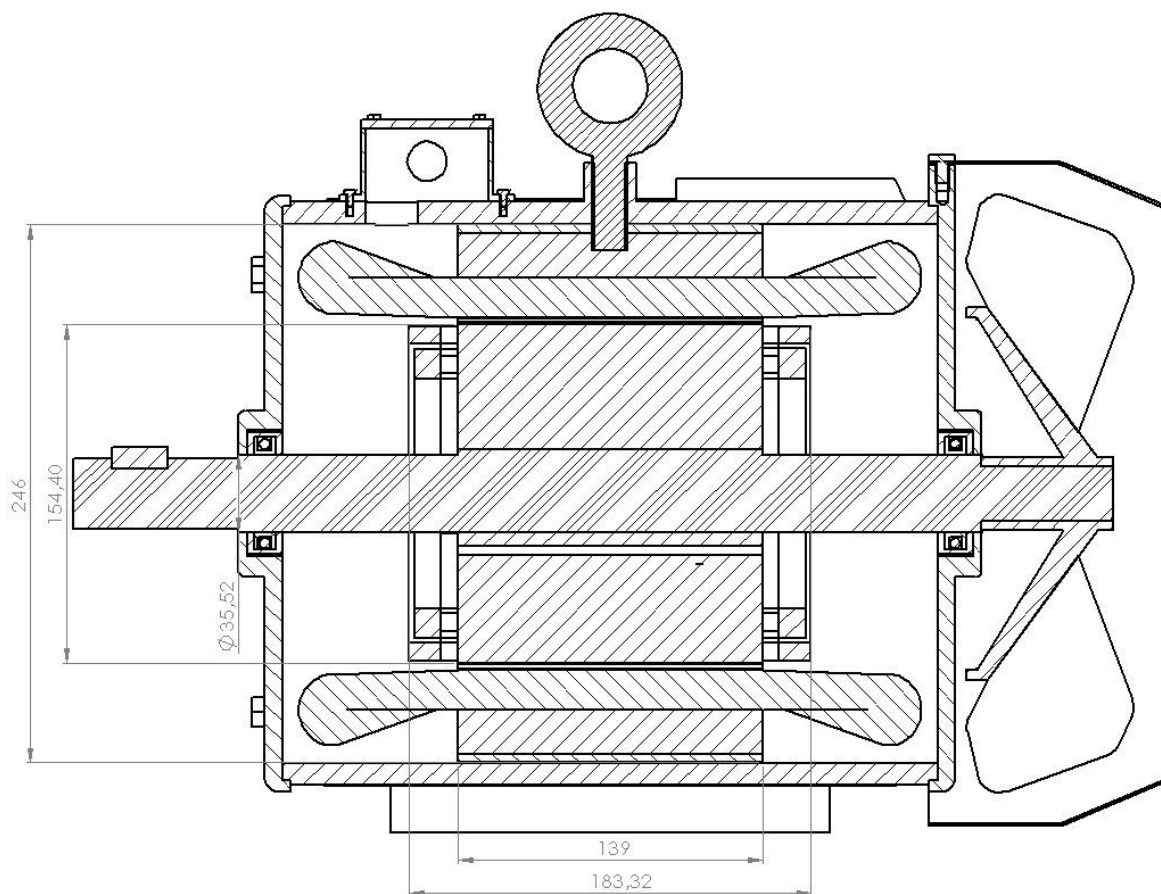
## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] KOPYLOV, Igor Petrovič. *Stavba elektrických strojů*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1988. 688 s.
- [2] BARTOŠ, Václav. *Teorie elektrických strojů*. 1. vyd. Plzeň: ZČU, 2009. 230 s. ISBN 978-80-7043-509-0
- [3] PETROV, Georgij N. *Elektrické stroje 2: asynchronní stroje - synchronní stroje*. 1. vyd. Praha: Academia, 1982. 728 s.
- [4] MIKULČÁK, Jiří aj. *Matematické, fyzikální a chemické tabulky*. 4. vyd. Praha: Prometheus, 2014. ISBN 978-80-7196-345-5
- [5] Studijní materiály z předmětu Projektování elektrických zařízení (2017/2018): PECHÁNEK, Roman. KEV/PEZ. *Courseware ZČU* [online]. Plzeň: ZČU, 2014 [vid. 2017-11-06]. Dostupné z: <https://portal.zcu.cz/portal/studium/courseware/kev/pez/cviceni/index.html>
- [6] JAROLÍM, Karel, LEDR, Zdeněk, RŮŽIČKA, František. *Elektrické přístroje a stroje*. 4. vyd. Praha: SNTL, 1969. 368 s.
- [7] PYRHÖNEN, Juha, JOKINEN, Tapani, HRABOVCOVÁ, Valéria. *Design of rotating electrical machines*. 1st ed. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2008. ISBN 978-0-470-69516-6
- [8] WIEDEMANN, E. a KELLENBERGER, W. *Konstrukce elektrických strojů*. Praha: SNTL, 1973. 652 s.
- [9] HASSDENTEUFEL, Josef, KVĚT, Karel. *Elektrotechnické materiály*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1967. 860 s.
- [10] MAYER, Daniel. *Teorie elektromagnetického pole*. 3. vyd. Plzeň: ZČU, 2001. 355 s. ISBN 80-7082-826-9
- [11] VEVERKA, Antonín. *Technika vysokých napětí*. 2. vyd. Praha: SNTL, 1978.
- [12] BARTOŠ, Václav aj. *Elektrické stroje*. 1. vyd. Plzeň: ZČU, 2011. 140 s. ISBN 978-80-7043-444-4

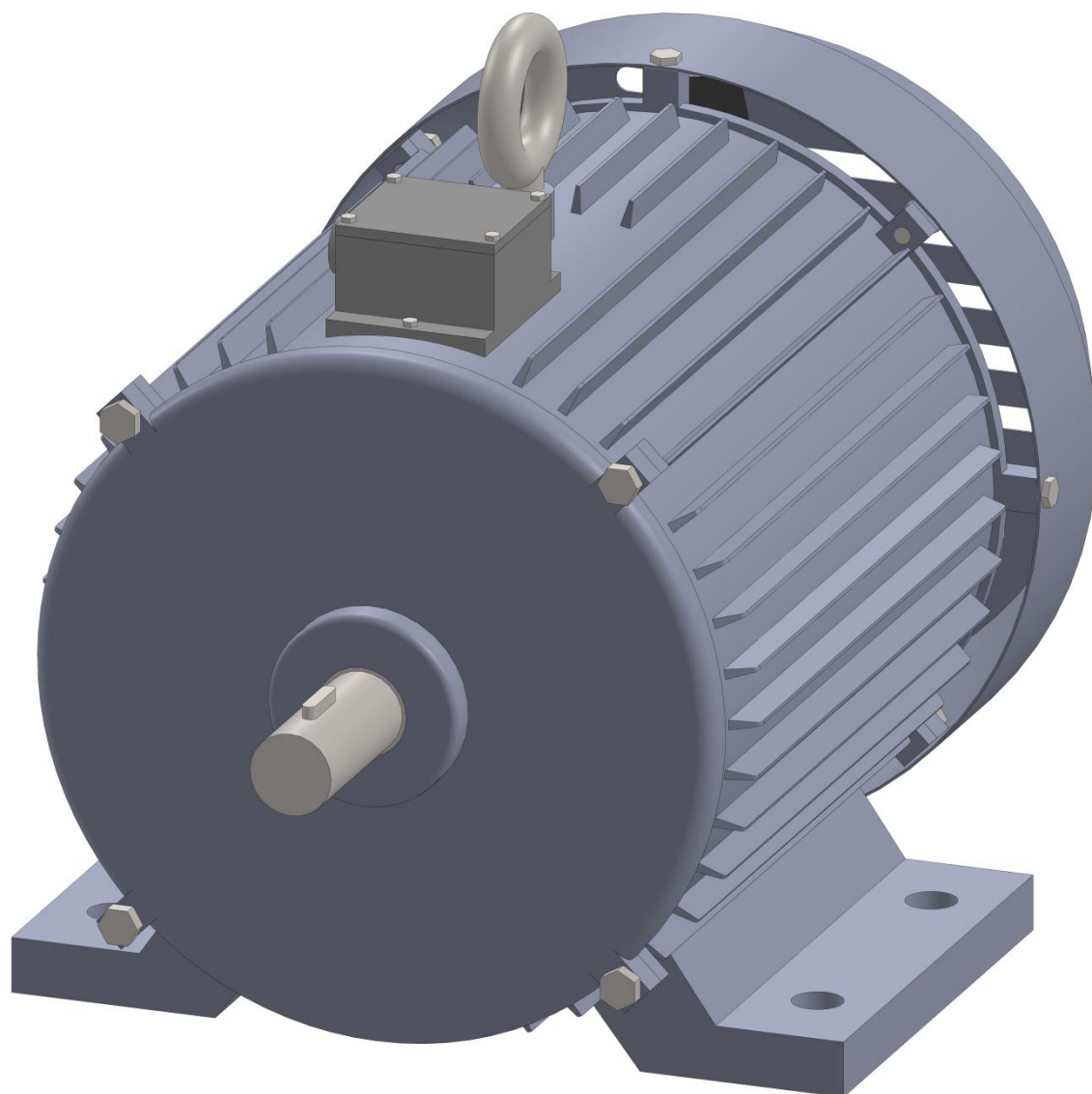
## Přílohy



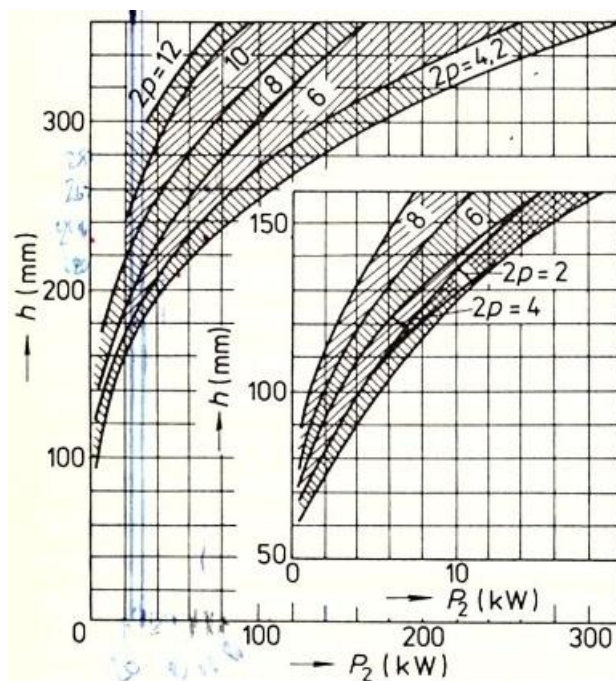
Obr. 1.1 Příčný řez strojem



Obr. 1.2 Podélný řez strojem



Obr. 1.3 Model navrženého stroje



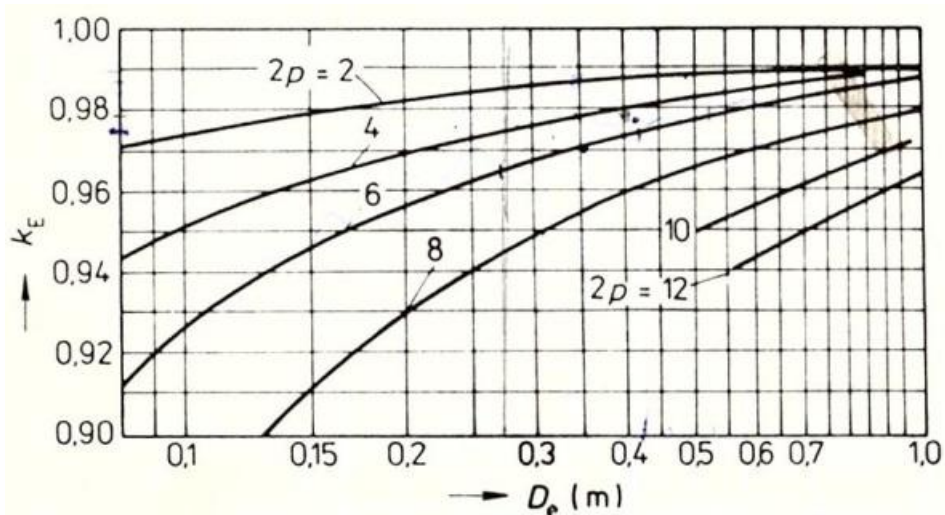
Obr. 2.1 Osová výška stroje v závislosti na jeho výkonu – převzato z [1]

$h$ (mm)	56	63	71	80	90	100	112	132
$D_e$ (m)	0,089	0,1	0,116	0,131	0,149	0,168	0,191	0,225
$h$ (mm)	160	180	200	225	250	280	315	355
$D_e$ (m)	0,272	0,313	0,349	0,392	0,437	0,530	0,590	0,660

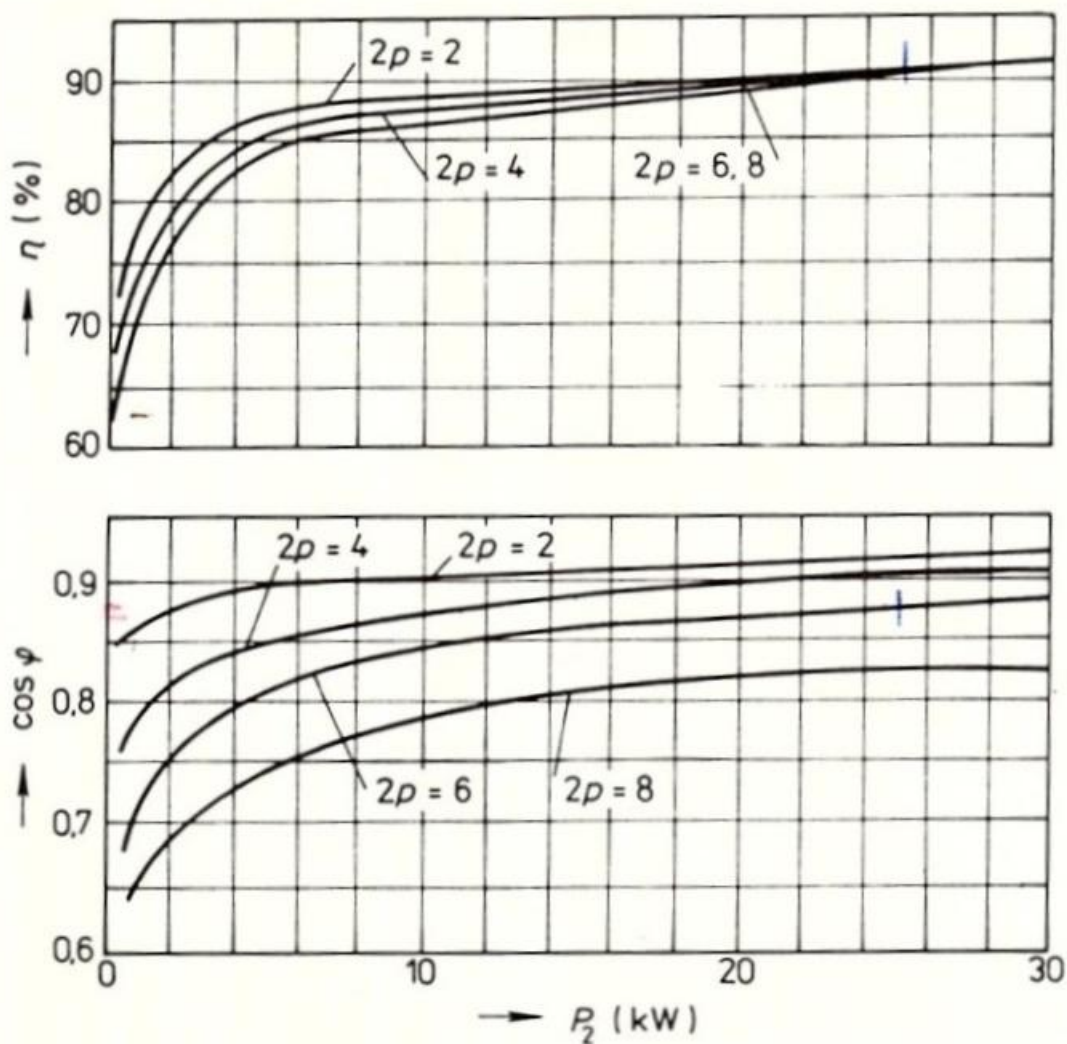
Obr. 2.2 Závislost osové výšky a vnějšího průměru stroje – převzato z [1]

$2p$	2	4	6	8	10 až 12
$K_D$	0,52 až 0,57	0,62 až 0,68	0,70 až 0,72	0,74 až 0,75	0,75 až 0,77

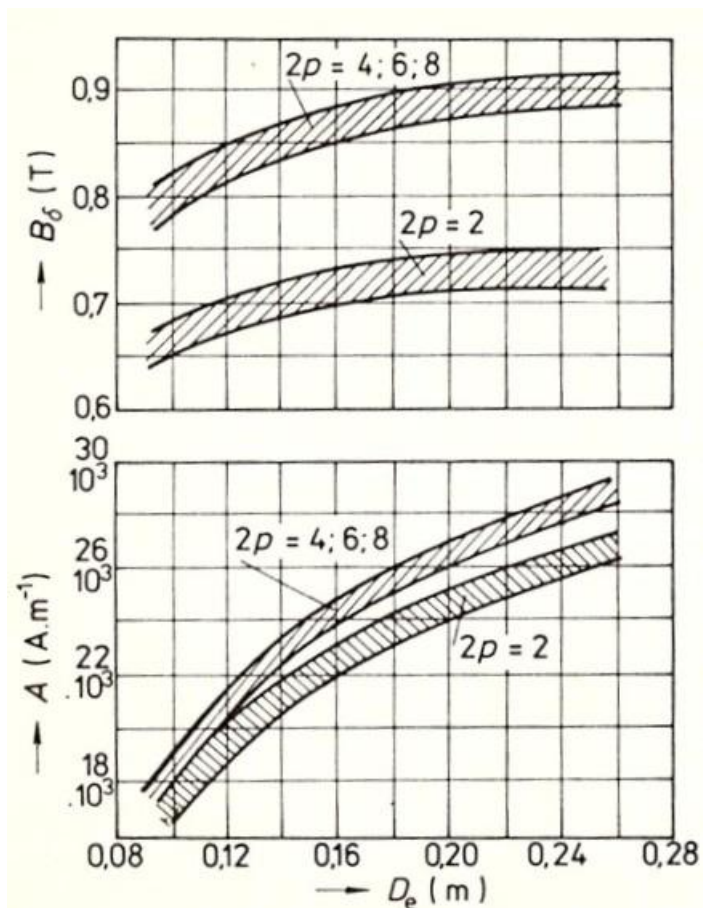
Obr. 2.3 Poměry vnějších a vnitřních průměrů statoru – převzato z [1]



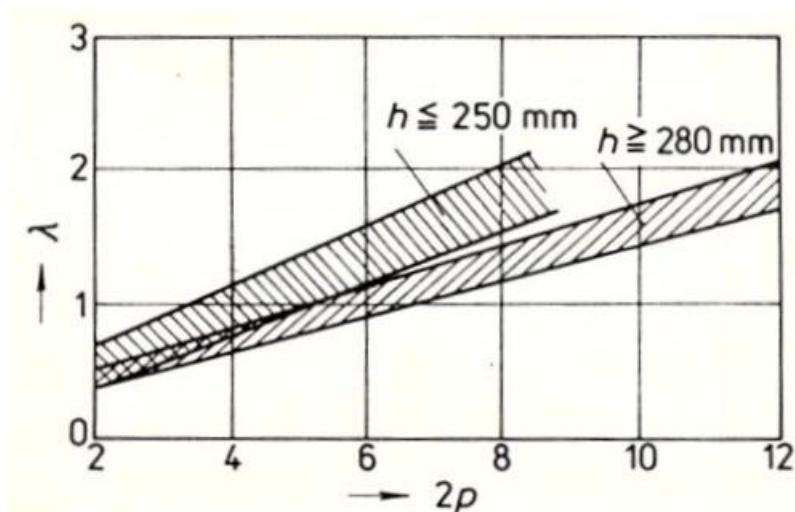
Obr. 2.4 Závislost činitele  $k_E$  na vnějším průměru statoru – převzato z [1]



Obr. 2.5 Závislost účinnosti a účiníku na výkonu stroje – převzato z [1]

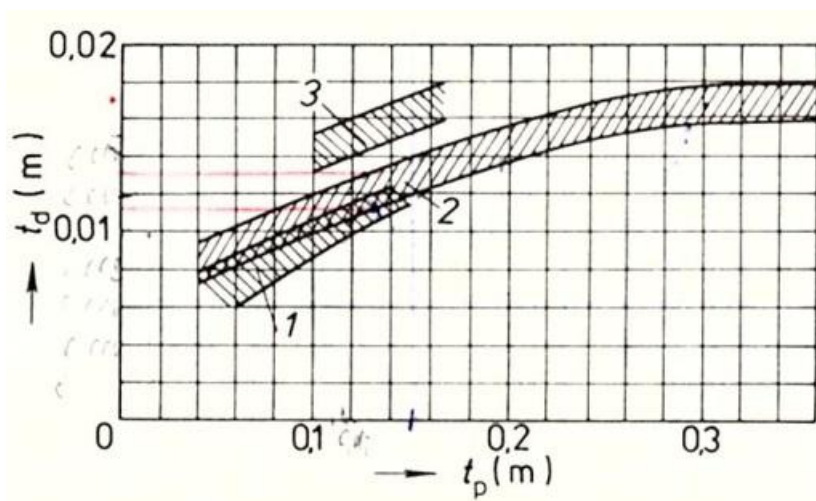


Obr. 2.6 Závislost lineární proudové hustoty a indukce ve vzduchové mezeře na vnějším průměru statoru – převzato z [1]

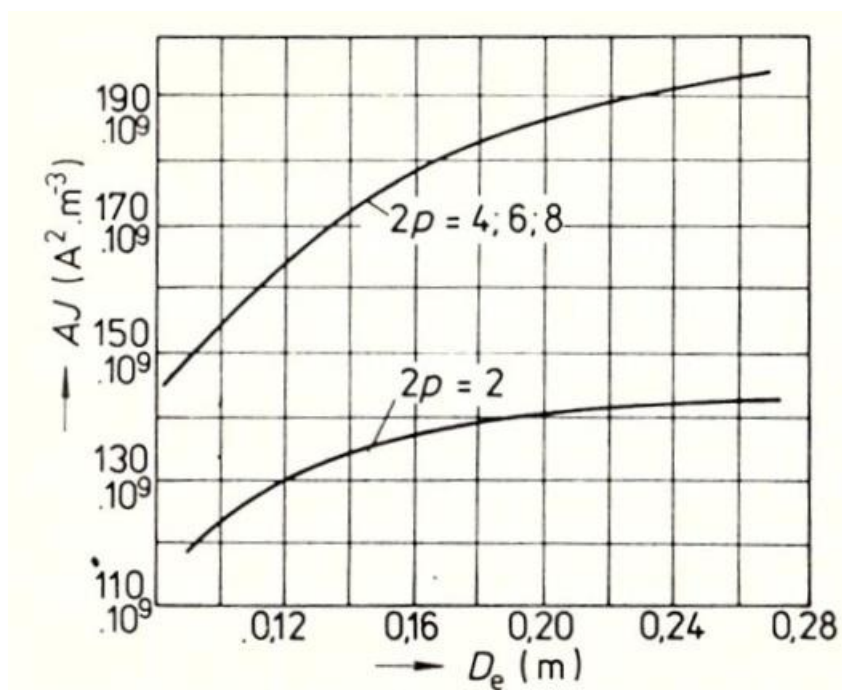


Obr. 2.7 Závislost štíhlostního poměru na počtu pólů stroje – převzato z [1]





Obr. 3.1 Závislost rozteče drážkové na pólové – převzato z [1]



Obr. 3.2 Závislost AJ-kritéria na vnějším průměru statoru – převzato z [1]

Průměr jádra (mm)	Průřez jádra (mm <sup>2</sup> )	Střední odpor při 20 °C (Ω . km <sup>-1</sup> )	Největší oboustranný izolační přírůstek (mm)						
			2B	L2H	2KT	2KS	T	2T	2I
1,06	0,882	19,880							
1,12	0,985	17,807							
1,18	1,094	16,042							
1,25	1,227	14,296	0,27		0,27	0,27	0,095	0,14	0,14
1,32	1,369	12,820							
1,40	1,539	11,397							
1,50	1,767	9,927 8							
1,60	2,011	8,725 6							
1,70	2,270	7,729 1							
1,80	2,545	6,895 0	0,275	—					
1,90	2,835	6,187 6							
2,00	3,142	5,584 3			0,3	0,3	0,12	0,18	—
2,12	3,530	4,969 9							
2,24	3,941	4,451 7							
2,36	4,374	4,010 6							
2,50	4,909	3,574 1							
2,65	5,515	3,180 7							
2,80	6,158	2,849 1	0,325	—					
3,00	7,069	2,481 9							
3,15	7,793	1,962 0							
Tepelná třída izolace			A	A	F	H	B	B	F

Obr. 3.3 Rozměry normovaných měděných vodičů pro vinutí – převzato a upraveno z [1]

$\nu$	$q$	2	3
1		<b>0,966</b>	<b>0,960</b>
5		0,259	0,217
7		-0,259	-0,177
11		- <b>0,966</b>	-0,177
13		- <b>0,966</b>	0,217
17		-0,259	0,960
19		0,259	<b>0,960</b>
23		<b>0,966</b>	0,217
25		<b>0,966</b>	-0,177
29		0,259	-0,177
31		-0,259	0,217
35		- <b>0,966</b>	<b>0,960</b>
37		- <b>0,966</b>	<b>0,960</b>
41		-0,259	0,217
43		0,259	-0,177
47		<b>0,966</b>	-0,177

Obr. 3.4 Činitel rozlohy – převzato z [1]

Část magnetického obvodu	Označení	IP 44				
		2p	2	4	6	8
Jho statoru	$B_{j1}$	1,4 až 1,6			1,15 až 1,35	1,1 až 1,2
Zuby statoru s rovnoběžnými stěnami (vsypávané vinutí, drážky S, L)	$B_{z1}$	1,7 až 1,9				1,6 až 1,8
Zuby statoru v nejužším průřezu drážky polozavřené F	$B_{z1max}$	1,75 až 1,95				
drážky otevřené N, M		1,6 až 1,8				
Jho rotoru nakrátko kroužkového motorů na 6 000 V	$B_{j2}$	$\cong 1,45$ — —	$\cong 1,25$ $\cong 1,25$ $\cong 1,55$	$\cong 1,15$ $\cong 1,05$ $\cong 1,30$	$\cong 0,85$ $\cong 0,75$ $\cong 1,0$	
Zuby rotoru s rovnoběžnými stěnami (drážky V, W)	$B_{z2}$	1,75 až 1,85				
Zuby v nejužším průřezu rotoru nakrátko kroužkového	$B_{z2max}$	— —	1,5 až 1,7 1,85 až 2,05	1,45 až 1,60 1,75 až 1,9		

Obr. 4.1 Dovolené hodnoty magnetických indukcí – převzato z [1]

h (mm)	U(V)	Stator		Rotor nakrátko		Rotor kroužkový	
		způsob izolace	$k_{Fe}$	způsob izolace	$k_{Fe}$	způsob izolace	$k_{Fe}$
50 až 250	$\cong 660$	vrstva oxidu	0,97	vrstva oxidu	0,97	—	—
280 až 355	$\cong 660$	lakování	0,95	vrstva oxidu	0,97	lakování	0,95
400 až 560	6 000	lakování	0,95	lakování	0,95	lakování	0,95

Obr. 4.2 Způsoby izolace plechů a činitel plnění železa – převzato z [1]

$b_1$	Drážka S a L					Drážka V			Drážka K			
	$b_0$	$h_0$	$h_1$	$u$	$\lambda_z$	$b_0$	$h_0$	$\lambda_z$	$d$	$b_0$	$h_0$	$\lambda d$
2,6	—	—	—	—	—	0,8	0,5	1,435	3	0,8	0,5	1,248
2,8								1,460	3,3			
3								1,484	3,5			
3,2								1,505	3,7			
3,4								1,524	4			
3,6								1,542	4,2			
3,8								1,558	4,4			
4								1,573	4,6			
4,2								1,595	5			
4,4								1,610	5,2			
4,6	2,5	0,5	0,90	1,50	0,561	1,0	0,7	1,623	5,5	1,0	0,7	1,323
4,8			0,95	1,55	0,517			1,636	6			
5			1,05	1,45	0,540			1,648	6,5			
5,2			1,15	1,35	0,562			1,659	7			
5,5			1,25	1,25	0,583			1,674	7,5			
5,8			1,35	1,15	0,603			1,689	8			
6			1,35	1,25	0,553			1,697	8,5			
6,2			1,50	1,10	0,580			1,357	9			
6,5			1,50	1,00	0,550			1,372	9,5			
6,8			1,60	0,90	0,567			1,385	10			
7	1,75	0,75	0,590	1,394	10,5							
7,2	3,0	0,5	1,90	0,60	0,613	1,5	0,7	1,402	11	1,5	1,0	1,290
7,5			1,90	0,50	0,585			1,414	11,5			
7,8			2,00	0,40	0,599			1,425	12			
8			1,60	1,40	0,477			1,433	12,5			
8,5			1,72	1,28	0,493			1,449				
			1,80	1,20	0,503							
			1,80	1,20	0,506							

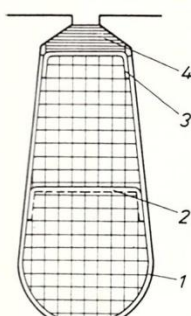
Obr. 4.4 Normované rozměry drážek – převzato a upraveno z [1]

$b_1$	Klín D <sup>1)</sup>			
	$s$	$v$	$b$	$\alpha$ (tg $\alpha$ )
4	3,5	2,5	2	45° (1)
4,2			2,5	
4,4	3			
4,6			4	
4,8	5			
5			6	
5,2	6			
5,5		6		
5,8	6			
6		6		
6,2	6			
6,5		6		
6,8	6			
7		6		
7,2	6			

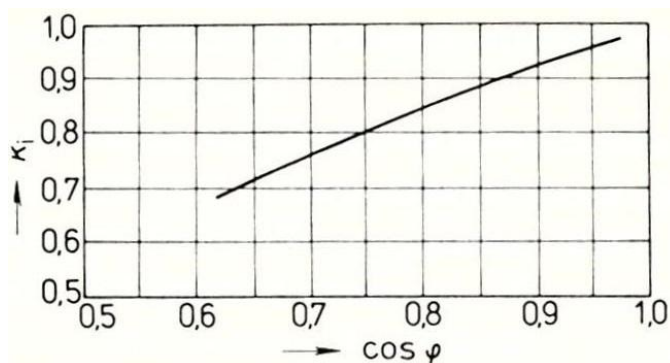
Obr. 4.5 Normované rozměry drážkových klínů – převzato a upraveno z [1]

výška osy $h$ mm	Přidavky (mm)	
	na šířku $\Delta b_d$	na výšku $\Delta h_d$
50 až 132	0,1	0,1
160 až 250	0,2	0,2
280 až 355	0,3	0,3
400 až 560	0,4	0,3

Obr. 4.6 Přidavky na skládání – převzato z [1]

Vinutí	Pozice	Díl	Materiály a tloušťky (mm) pro izolaci třídy B			
			$h = 56$ až $90$ mm	$h = 100$ až $180$ mm	$h = 200$ až $280$ mm	$h = 315$ až $355$ mm
	1	Vyložení drážky	—	—	lakovaná tkanina 0,15	AE 0,20
	2	Izolace drážky	OE 0,20	OEO 0,30	OEO, EAE 0,40	EAE 0,40
	3	Mezivložka <sup>*)</sup>	OE 0,20	OEO 0,30	OEO, EAE 0,40	EAE 0,40
	4	Krycí vložka	OE 0,30	OEO 0,40	OEO 0,40	EAE 0,40
		Drážkový klín <sup>**)</sup>			tvrdý papír	
			Materiály a tloušťky (mm) pro izolaci třídy F			
			$h = 56$ až $90$ mm	$h = 100$ až $180$ mm	$h = 200$ až $280$ mm	$h = 315$ až $355$ mm
	1	Vyložení drážky	—	—	lakovaná tkanina 0,15	NE 0,20
	2	Izolace drážky	NE 0,20	NE, NEN 0,30	NEN 0,30	NEN 0,30
	3	Mezivložka <sup>*)</sup>	NE 0,20	NE, NEN 0,30	NEN 0,30	NEN 0,40
	4	Krycí vložka	NE 0,30	NE, NEN 0,40	NEN 0,40	NEN 0,40
		Drážkový klín <sup>**)</sup>			sklotextit	

Obr. 4.7 Normované rozměry drážek – převzato a upraveno z [1]



Obr. 5.2 Závislost činitele  $k_i$  na účinníku – převzato z [1]

$h$ (mm)	50 až 63	71 až 250	280 až 355		400 až 500		
$2p$	2 až 6	2 až 8	2	4 až 12	4	6	8 až 12
$k_h$	0,19	0,23	0,22	0,23	0,20	0,23	0,25

Obr. 5.3 Činitel  $k_h$  pro výpočet průměru hřídele – převzato z [1]

B (T)	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H (A . m <sup>-1</sup> )									
0,4	89	91	93	94	96	98	100	102	104	106
0,5	108	110	113	115	118	120	122	124	126	128
0,6	131	134	136	139	141	144	147	150	153	156
0,7	159	162	166	169	172	176	180	183	186	190
0,8	194	198	201	204	208	212	216	220	223	227
0,9	231	235	239	243	248	252	255	260	265	269
1,0	274	279	284	289	295	300	305	311	318	323
1,1	332	338	344	351	357	367	374	382	390	398
1,2	410	418	426	435	444	455	466	475	487	498
1,3	509	521	533	546	558	572	585	600	618	635
1,4	656	675	695	717	740	763	789	815	843	870
1,5	905	934	965	1 000	1 040	1 090	1 130	1 190	1 240	1 290
1,6	1 370	1 440	1 520	1 590	1 660	1 720	1 820	1 910	2 010	2 100
1,7	2 180	2 310	2 410	2 550	2 610	2 720	2 840	2 980	3 130	3 290
1,8	3 460	3 630	3 800	3 970	4 140	4 310	4 490	4 670	4 850	5 040
1,9	5 220	5 600	6 000	6 400	6 900	7 400	7 900	8 500	9 100	9 700
2,0	10 400	11 100	11 800	12 500	13 300	14 100	14 900	15 800	16 700	17 600

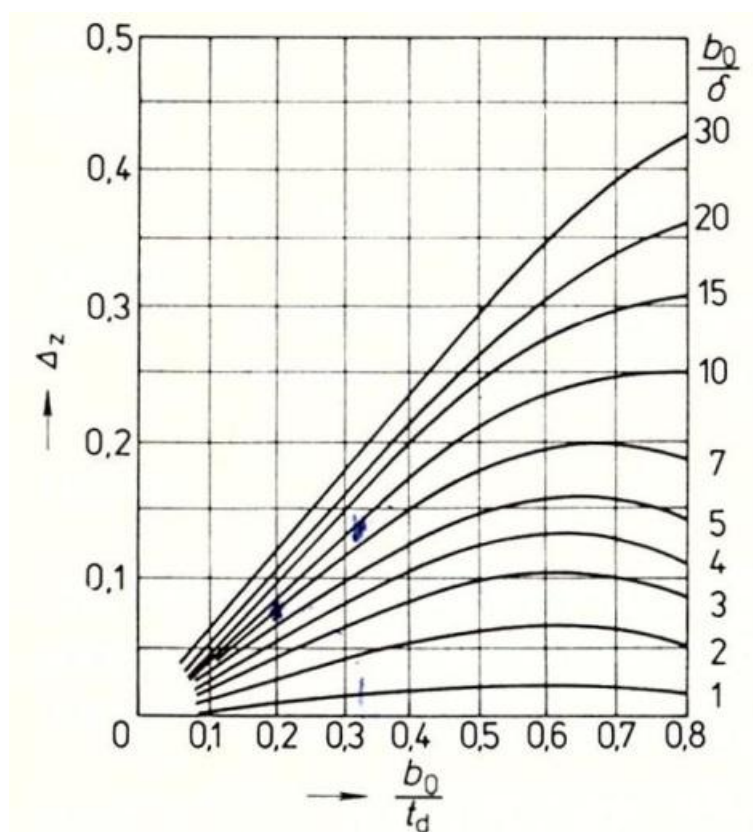
Obr. 6.1 Magnetizační charakteristika oceli 2211 pro jha – převzato z [1]

B(T)	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H (A.m <sup>-1</sup> )									
0,4	140	143	146	149	152	155	158	161	164	171
0,5	174	177	180	184	186	190	192	196	198	202
0,6	204	209	213	216	221	224	229	233	237	241
0,7	245	249	253	257	262	267	272	277	282	287
0,8	292	297	302	306	311	316	322	326	331	337
0,9	342	347	353	360	366	372	379	384	390	396
1,0	403	409	417	425	433	440	450	460	470	477
1,1	488	497	509	517	527	537	547	559	570	582
1,2	593	602	613	626	638	651	663	677	695	710
1,3	724	738	755	770	790	804	820	840	857	879
1,4	897	917	936	955	977	1 000	1 020	1 040	1 060	1 090
1,5	1 120	1 150	1 170	1 210	1 240	1 270	1 310	1 330	1 370	1 410
1,6	1 450	1 490	1 530	1 560	1 610	1 650	1 690	1 750	1 790	1 840
1,7	1 900	1 940	2 000	2 070	2 140	2 220	2 300	2 380	2 500	2 600
1,8	2 700	2 800	2 920	3 050	3 220	3 330	3 490	3 610	3 710	4 000
1,9	4 160	4 350	4 600	4 800	5 030	5 330	5 430	5 790	6 130	6 420
2,0	6 750	7 170	7 400	7 790	8 150	8 520	9 000	9 400	9 750	10 200
2,1	10 600	11 000	11 500	12 100	12 600	13 000	13 500	14 100	14 700	15 400
2,2	15 900	16 500	17 300	17 800	18 500	19 100	19 600	20 300	21 100	22 000
2,3	23 100	24 300	25 500	26 800	28 100	29 500	30 900	32 400	33 900	36 400

Obr. 6.2 Magnetizační charakteristika oceli 2211 pro zuby – převzato z [1]

Počet pólů $2p$	Cívky statoru			
	čela neizolovaná		čela izolovaná páskou	
	$K_{\xi}$	$K_{\nu}$	$K_{\xi}$	$K_{\nu}$
2	1,20	0,26	1,45	0,44
4	1,30	0,40	1,55	0,50
6	1,40	0,50	1,75	0,62
$\geq 8$	1,50	0,50	1,90	0,72

Obr. 7.2 Činitelé pro výpočet rozměrů čel vinutí – převzato z [1]

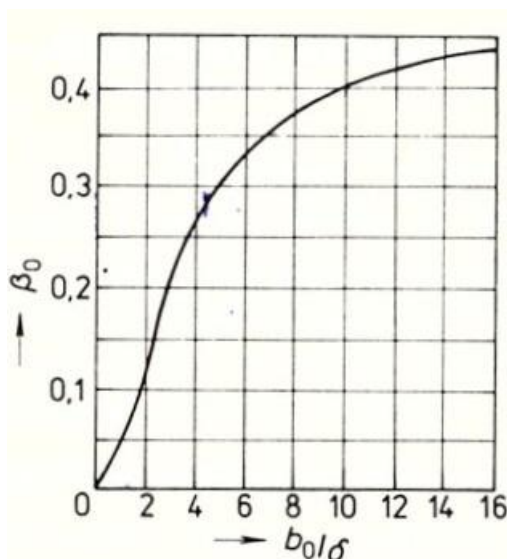


Obr. 7.3 Doporučené hodnoty činitele  $\Delta_z$  – převzato z [1]



Elektrotechnická ocel třídy		Tloušťka plechů (mm)	$\Delta\rho_{1,0/50}$ (W . kg <sup>-1</sup> )	$\beta$
GOST	2013, 2011, 2211	0,5	2,5 až 2,6	1,5
	2312	0,5	1,75	1,4
	2411	0,5	1,6	1,3
ČSN	Ei 45	0,5	2,0	1,5
	Ei 55	0,5	2,6	
	Ei 70	0,5	3,0	
	Et 130	0,35	1,3	

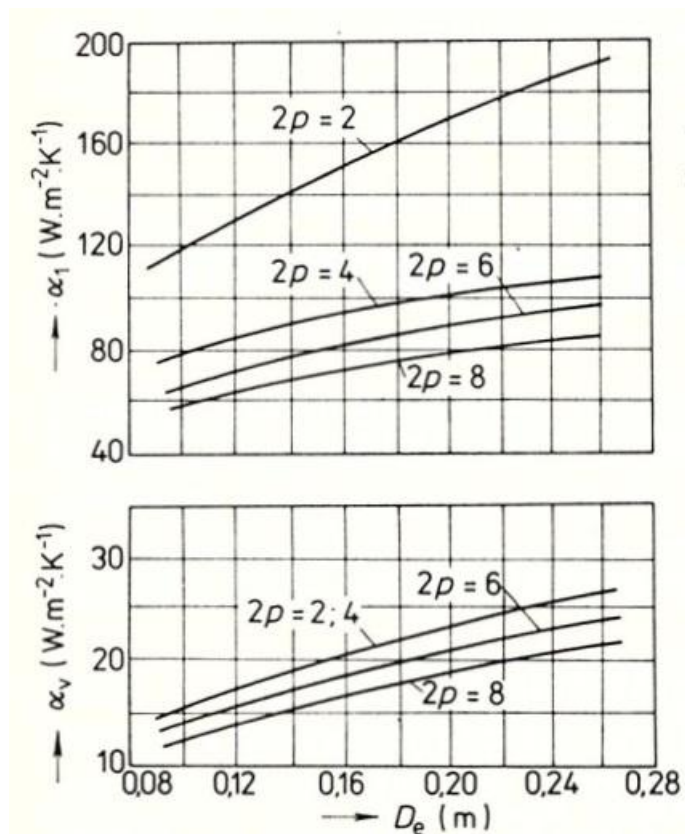
Obr. 8.1 Měrné ztráty elektrotechnických ocelí a exponent  $\beta$  – převzato z [1]



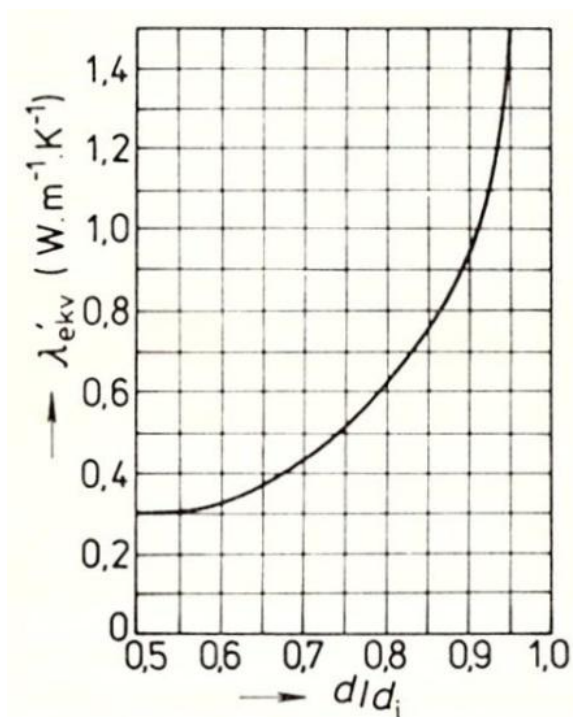
Obr. 8.2 Závislost činitele  $\beta_0$  – převzato z [1]

Krytí	Počet pólů motoru $2p$					
	2	4	6	8	10	12
IP 44	0,22	0,20	0,19	0,18	0,17	0,16
IP 23	0,84	0,80	0,78	0,76	0,74	0,72

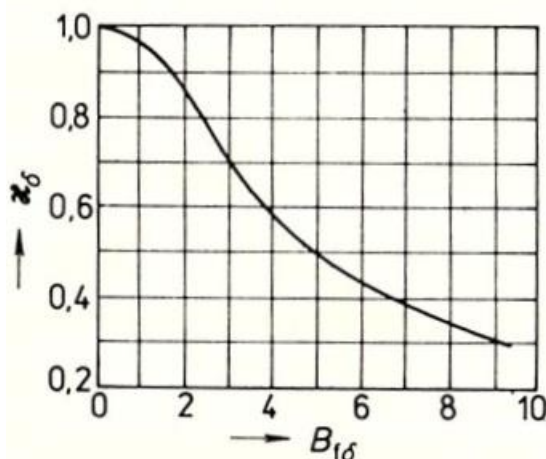
Obr. 9.1 Činitel  $K$  pro výpočet oteplení – převzato z [1]



Obr. 9.2 Závislosti velikostí součinitelů přestupu tepla – převzato z [1]



Obr. 9.3 Střední hodnoty součinitele tepelné vodivosti – převzato z [1]

Obr. 10.2 Závislost činitele  $\chi_\delta$  na fiktivní indukci  $B_{f\delta}$ 

## Předpis pro výpočet skin efektu

```

s=[1e-20:0.0001:1];
n_vrstev = 16;
% Rozměry jednotlivých vrstev
b_skin = [b0rot, sqrt(bH^2/4 - bH^2/16)/2, (bH/2+sqrt(bH^2/4 - bH^2/16))/2,
(bH/2+sqrt(bH^2/4 - bH^2/16))/2, sqrt(bH^2/4 - bH^2/16)/2,bm, sqrt(bD1^2/4 -
bD1^2/16)/2, (bD1/2+sqrt(bD1^2/4 - bD1^2/16))/2, bD1+(bD2-bD1)*0.5/6,
bD1+(bD2-bD1)*1.5/6, bD1+(bD2-bD1)*2.5/6, bD1+(bD2-bD1)*3.5/6, bD1+(bD2-
bD1)*4.5/6, bD1+(bD2-bD1)*5.5/6, (bD2/2+sqrt(bD2^2/4 - bD2^2/16))/2,
sqrt(bD2^2/4 - bD2^2/16)/2,];
h_skin = [h0rot, bH/4, bH/4, bH/4, bH/4,hm, bD1/4, bD1/4, hD1/6, hD1/6, hD1/6,
hD1/6, hD1/6, hD1/6, bD2/4, bD2/4];
%Odpory jednotlivých vrstev
gamma_AIR = 5.14e-16;
gamma_H = 1/(7.1e-8);
gamma_D = 47e6;
g = zeros(1, n_vrstev);
for poz_r = 1: n_vrstev
    if poz_r == [2,3,4,5]
        g(poz_r) = gamma_H*b_skin(poz_r)*h_skin(poz_r);
    elseif poz_r == [1,6]
        g(poz_r) = gamma_AIR*b_skin(poz_r)*h_skin(poz_r);
    else
        g(poz_r) = gamma_D*b_skin(poz_r)*h_skin(poz_r);
    end
end
r_skin = 1./g;
r_celkovy = 1/sum(g);
% Reaktance jednotlivých vrstev
lambda_skin= h_skin./b_skin;
x_skin = zeros(1, n_vrstev);
for poz_x = 1: n_vrstev

```

```

if poz_x == 1
    x_skin(poz_x) = 2*pi*mi_sigma*lambda_skin(poz_x)+
2*pi*mi_sigma*lambda_dif2;
elseif poz_x == 6
    x_skin(poz_x) = 2*pi*mi_sigma*lambda_skin(poz_x);
else
    x_skin(poz_x) = 2*pi*mi_sigma*lambda_skin(poz_x);
end
end
% Soustava linearnich rovnich pro skinefekt - vse v pomernych jednotkach
f2_skin = s*f;
pocet_f2 = length(f2_skin);
k_R_f2 = zeros(1, pocet_f2);
k_X_f2 = zeros(1, pocet_f2);
for poz = 1:pocet_f2;
    x_skin_f = f2_skin(poz)*x_skin;
    u_pom = 1;
    U_pom = u_pom*ones(n_vrstev,1);
    radky_Z = 1;
    sloupce_Z = 1;
    Z_skin = zeros(n_vrstev);
    for radky_Z=1:n_vrstev
        for sloupce_Z=1:n_vrstev
            if sloupce_Z < radky_Z
                Z_skin(radky_Z, sloupce_Z) = i*sum(x_skin_f(1:sloupce_Z));
            elseif sloupce_Z == radky_Z
                Z_skin(radky_Z, sloupce_Z) = r_skin(radky_Z) +
i*sum(x_skin_f(1:radky_Z));
            else
                Z_skin(radky_Z, sloupce_Z) = i*sum(x_skin_f(1:radky_Z));
            end
        end
    end
    end
    l_pom = Z_skin\U_pom;
    l_celkovy_abs = abs(sum(l_pom));
    l_vektor_abs = abs(l_pom);
    k_R_f2(poz) = sum(r_skin.*l_vektor_abs.^2)/(r_celkovy*l_celkovy_abs.^2);
    for por = 1:n_vrstev
        suma1 = lambda_skin(por)*abs(sum(l_pom(por:n_vrstev))).^2;
        suma2 = lambda_skin(por)*sum(g(por:n_vrstev)).^2;
    end
    k_X_f2(poz) = suma1/(l_celkovy_abs.^2)/(suma2/sum(g).^2);
end
end

```