

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Návrh asynchronního motoru s kotvou nakrátko**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2012/2013

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Vít VELEBA**  
Osobní číslo: **E10B0268P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**  
Název tématu: **Návrh asynchronního motoru s kotvou 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 :

1. Proveďte elektromagnetický návrh asynchronního stroje s parametry:  $P = 28 \text{ kW}$ ,  $2p = 6$ ,  $U = 400 \text{ V}$ ,  $m = 3$ .
2. Sestrojte kružnicový diagram a momentovou charakteristiku.



Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Kopylov, I. P.: Stavba elektrických strojů, SNTL 1988
2. Petrov, G. N.: Elektrické stroje 2, ČSAV 1982

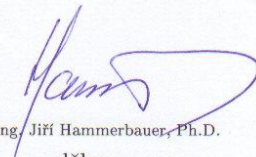
Vedoucí bakalářské práce:

**Doc. Ing. Josef Červený, CSc.**

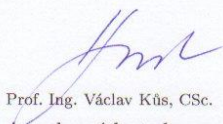
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: 15. října 2012

Termín odevzdání bakalářské práce: 7. června 2013

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



  
Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

## **Anotace**

Tato bakalářská práce se zabývá elektromagnetickým návrhem asynchronního motoru s kotvou nakrátko o výkonu 28 kW, synchronní rychlostí 1000 otáček za minutu a krytím IP 44. Návrh je proveden dle zadaných parametrů. Práce obsahuje výpočet rozměrů stroje, dále odpory a reaktance, ztráty, účinnost stroje, rozběhové a zatěžovací charakteristiky. Z vypočtených hodnot je sestrojen kružnicový diagram a momentová charakteristika.

## **Klíčová slova**

Asynchronní motor, vinutí, klec nakrátko, stator, rotor, elektromagnetický návrh, drážka, kružnicový diagram, momentová charakteristika

**Abstract**

This Bachelor thesis deals with the electromagnetic design of induction squirrel-cage motor with an output of 28 kW, synchronous speed of 1000 rpm and with IP 44 cover. Design is carried out according to the specified parameters. The thesis contains the computation of the geometric size of the machine, then resistance and reactance, losses, efficiency of the machine acceleration and load characteristics. From the compute values is constructed a circle diagram and torque characteristics.

**Key words**

Induction motor, winding, squirrel cage, stator, rotor, electromagnetic design, groove, circle diagram, torque characteristic

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem 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 30.5.2013

Vít Veleba

## **Poděkování**

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

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>1 NÁVRH ASYNCHRONNÍHO MOTORU</b> .....	<b>10</b>
1.1 VOLBA HLAVNÍCH ROZMĚRŮ .....	10
1.2 URČENÍ POČTU DRÁŽEK, POČTU ZÁVITŮ A PRŮŘEZU VODIČE STATOROVÉHO VINUTÍ .....	12
1.3 VÝPOČET ROZMĚRŮ DRÁŽEK A ZUBŮ STATORU .....	14
1.4 VÝPOČET ROTORU .....	17
1.5 VÝPOČET ROZMĚRŮ ROTOROVÉ DRÁŽKY .....	18
1.6 VÝPOČET MAGNETIZAČNÍHO PROUDU .....	20
1.7 VÝPOČET ODPORŮ A REAKTANCÍ .....	24
1.8 VÝPOČET ZTRÁT .....	29
1.9 VÝPOČET ZATĚŽOVACÍCH CHARAKTERISTIK .....	35
1.10 VÝPOČET ROZBĚHOVÝCH CHARAKTERISTIK .....	43
1.11 SEZNAM VYPOČTENÝCH A ODEČTENÝCH HODNOT .....	49
<b>2 KRUŽNICOVÝ DIAGRAM</b> .....	<b>52</b>
2.1 POSTUP KONSTRUKCE KRUŽNICOVÉHO DIAGRAMU .....	52
2.2 POSTUP KONSTRUKCE MOMENTOVÉ CHARAKTERISTIKY .....	55
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>57</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b> .....	<b>58</b>
<b>PŘÍLOHY</b> .....	<b>1</b>



## Úvod

Asynchronní motor, nebo také indukční motor, je elektrický točivý stroj. Je nejpoužívanějším točivým strojem v elektrotechnice a to díky vysoké spolehlivosti dané jednoduchou konstrukcí, nenáročnou obsluhou a údržbou.

Asynchronní stroj se skládá ze dvou hlavních částí. Stator (pevná část) je složen z navzájem odizolovaných elektrotechnických plechů s drážkami, ve kterých je uloženo statorové vinutí, které může být třífázové nebo jednofázové. Rotor (pohyblivá část) je složen z plechů s vylišovanými drážkami, ve kterých je uloženo buď rotorové vinutí (kroužková kotva), nebo měděné, mosazné nebo hliníkové tyče, které jsou na obou koncích zkratovány kruhy (klec nakrátko). [1]

Základním principem je vytvoření točivého magnetického pole vhodně umístěným vinutím v drážkách statoru. Toto pole indukuje do rotorového vinutí napětí, které protlačí proud a tím vznikne rotorové pole, které reaguje s točivým polem statoru a rotor se tak roztočí. Pokud nebude zatížený, tak se roztočí na otáčky blízké synchronním. Nikdy se však neroztočí na synchronní otáčky. Asynchronní stroj vždy pracuje s určitým skluzem. Při synchronních otáčkách nebude vznikat změna magnetického toku a do rotorového vinutí se nebude indukovat napětí. [1]

Problémem asynchronních motorů je velmi vysoký rozběhový proud, který může být až sedminásobkem proudu jmenovitého. Proto se používají různé metody spouštění, jako jsou: Statorový spouštěč, rozběhový transformátor, přepínač hvězda – trojúhelník, polovodičový regulátor napětí, nebo speciální úprava klece nakrátko. Mezi speciální klece patří: dvojitá (Boucherotova) klec, odporová klec, nebo klec vírová. U motorů s kotvou vinutou (kroužkovou) lze záběrný proud snížit zapojením odporů ke sběracím kartáčům, které jsou postupně vyřazovány. [1]

Regulaci otáček asynchronního motoru lze provést několika způsoby. Regulace může být provedena například změnou skluzu (pouze u vinuté kotvy), změnou napájecího kmitočtu (nejlepší způsob), změnou počtu pólů (velmi náročné na konstrukci), nebo změnou napájecího napětí (problém s momentem). [1]

# 1 Návrh asynchronního motoru

## 1.1 Volba hlavních rozměrů

Předběžná výška osy stroje dle [2] Obr. 6.7 a):

$$h = 200 \text{ mm} \quad (1)$$

Vnější průměr statorových plechů dle [2] Tab. 6.6:

$$D_e = 0,392 \text{ m} \quad (2)$$

Vnitřní průměr statoru:

$$D = K_D \cdot D_e = 0,71 \cdot 0,392 = 0,248 \text{ m} , \quad (3)$$

kde koeficient  $K_D$  zvolen dle [2] Tab. 6.7  $K_D = 0,71$ .

Pólová rozteč:

$$t_p = \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot p} = \frac{\pi \cdot 0,248}{2 \cdot 3} = 0,13 \text{ m} \quad (4)$$

Vnitřní (výpočtový) výkon stroje:

$$P_i = P_2 \cdot \frac{k_E}{\eta \cdot \cos \varphi} = 28000 \cdot \frac{0,97}{0,915 \cdot 0,88} = 33730 \text{ VA} , \quad (5)$$

kde  $k_E$  je poměr indukovaného napětí vinutí statoru k jmenovitému napětí, který je zvolen dle [2] Obr. 6.8  $k_E = 0,97$ ,

$\eta$  je účinnost dle [2] Obr. 6. 9 a)  $\eta = 0,915$ ,

$\cos \varphi$  je účiník dle [2] Obr. 6. 9 a)  $\cos \varphi = 0,88$ .

Předběžná elektromagnetická zatížení podle [2] Obr. 6.11 b):

zvolena lineární proudová hustota  $A = 34000 \text{ Am}^{-1}$  a magnetická indukce ve vzduchové mezeře  $B_\delta = 0,8 \text{ T}$ .

Činitel statorového vinutí zvolen dle [2]  $k_{v1} = 0,91$

Činitel tvaru pole:

$$k_B = \frac{\pi}{2 \cdot \sqrt{2}} = 1,11 \quad (6)$$

Synchronní úhlová rychlost hřídele motoru:

$$\omega_s = 2 \cdot \pi \cdot \frac{n_1}{60} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{1000}{60} = 105 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}, \quad (7)$$

$$\text{kde } n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p} = \frac{60 \cdot 50}{3} = 1000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$$

Ideální délka vzduchové mezery:

$$l_i = \frac{P_i}{D^2 \cdot \omega_s \cdot k_B \cdot k_{v1} \cdot A \cdot B_\delta} = \frac{33730}{0,248^2 \cdot 105 \cdot 1,11 \cdot 0,91 \cdot 34000 \cdot 0,8} = 0,19 \text{ m} \quad (8)$$

Štíhlostní poměr:

$$\lambda = \frac{l_i}{t_p} = \frac{0,19}{0,13} = 1,46 \quad (9)$$

Hodnota štíhlostního poměru se nachází v udávaném rozmezí dle [2] Obr. 6.14 a)

## 1.2 Určení počtu drážek, počtu závitů a průřezu vodiče statorového vinutí

Mezní hodnoty drážkové rozteče dle [2] Obr. 6.15

$$t_{d1min} = 0,0105 \text{ m}; t_{d1max} = 0,013 \text{ m}$$

Počet drážek statoru:

$$Q_{1min} = \pi \cdot \frac{D}{t_{d1max}} = \pi \cdot \frac{0,248}{0,013} = 60 \quad (10)$$

$$Q_{1max} = \pi \cdot \frac{D}{t_{d1min}} = \pi \cdot \frac{0,248}{0,0105} = 74 \quad (11)$$

Zvoleno  $Q_1 = 72$

Počet drážek na pól a fázi:

$$q = \frac{Q_1}{2 \cdot p \cdot m} = \frac{72}{2 \cdot 3 \cdot 3} = 4 \quad (12)$$

Skutečná drážková rozteč:

$$t_{d1} = \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot p \cdot m \cdot q} = \frac{\pi \cdot 0,248}{2 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 4} = 0,0108 \text{ m} \quad (13)$$

Předběžný počet efektivních vodičů v drážce:

$$V_d' = \frac{\pi \cdot D \cdot A}{I_{1N} \cdot Q_1} = \frac{\pi \cdot 0,248 \cdot 34000}{50 \cdot 72} = 7, \quad (14)$$

kde  $I_{1N}$  je jmenovitý proud statoru.

$$I_{1N} = \frac{P_2}{m \cdot U_{1N} \cdot \eta \cdot \cos \varphi} = \frac{28000}{3 \cdot 230 \cdot 0,915 \cdot 0,88} = 50 \text{ A} \quad (15)$$

Konečný počet efektivních vodičů v drážce:

$$V_d = a \cdot V_d' = 2 \cdot 7 = 14, \quad (16)$$

kde  $a$  je počet paralelních větví vinutí zvolen dle [2]  $a = 2$ .

Počet závitů ve fázi vinutí:

$$N_1 = \frac{V_d \cdot Q_1}{2 \cdot a \cdot m} = \frac{14 \cdot 72}{2 \cdot 2 \cdot 3} = 84 \quad (17)$$

Lineární hustota proudu:

$$A = \frac{2 \cdot I_{1N} \cdot N_1 \cdot m}{\pi \cdot D} = \frac{2 \cdot 50 \cdot 84 \cdot 3}{\pi \cdot 0,248} = 32300 \text{ Am}^{-1} \quad (18)$$

Činitel vinutí:

$$k_{v1} = k_r \cdot k_y = 0,958 \cdot 0,95 = 0,91, \quad (19)$$

kde  $k_r$  je činitel rozlohy určený dle [2] Tab. 3.13  $k_r = 0,958$  a  $k_y$  je činitel zkrácení kroku určený dle [2] Obr. 3.11  $k_y = 0,95$ .

Magnetický tok:

$$\phi = \frac{k_E \cdot U_{1N}}{4 \cdot k_B \cdot N_1 \cdot k_{v1} \cdot f_1} = \frac{0,97 \cdot 230}{4 \cdot 1,11 \cdot 84 \cdot 0,91 \cdot 50} = 0,0131 \text{ Wb} \quad (20)$$

Magnetická indukce ve vzduchové mezeře:

$$B_\delta = \frac{p \cdot \phi}{D \cdot l_i} = \frac{3 \cdot 0,0131}{0,248 \cdot 0,19} = 0,834 \text{ T} \quad (21)$$

Hustota proudu ve statorovém vinutí:

$$J_1 = \frac{(A \cdot J_1)}{A} = \frac{201 \cdot 10^9}{32300} = 6,22 \cdot 10^6 \text{ Am}^{-2}, \quad (22)$$

kde součin  $A \cdot J_1$  je určen dle [2] Obr. 6.16 b)  $A \cdot J_1 = 201 \cdot 10^9 \text{ A}^2\text{m}^{-3}$ .

Předběžný průřez efektivního vodiče:

$$S_{ef1} = \frac{I_{1N}}{a \cdot J_1} = \frac{50}{2 \cdot 6,22 \cdot 10^6} = 4,02 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \quad (23)$$

Dle [2] Tab. D 3.1 je zvolený vodič:

Průměr dílčího vodiče  $d_v = 1,32 \text{ mm}$

Průřez dílčího vodiče  $S_v = 1,369 \text{ mm}^2$

Oboustranný izolační přírůstek  $d_i = 0,14 \text{ mm}$

Průměr izolovaného vodiče  $d_{vi} = d_v + d_i = 1,32 + 0,14 = 1,46 \text{ mm}$

Průřez efektivního vodiče:

$$S_{ef} = n_p \cdot S_v = 3 \cdot 1,369 = 4,107 \text{ mm}^2, \quad (24)$$

kde  $n_p$  je počet paralelních vodičů zvoleno  $n_p = 3$ .

Skutečná hustota proudu ve statorovém vinutí:

$$J_1 = \frac{I_{1N}}{a \cdot S_v \cdot n_p} = \frac{50}{2 \cdot 1,369 \cdot 10^{-6} \cdot 3} = 6,082 \cdot 10^6 \text{ Am}^{-2} \quad (25)$$

### 1.3 Výpočet rozměrů drážek a zubů statoru

Pro statorové vinutí byla zvolena drážka typu L, která má po celé výšce stejnou šířku zubu. Dle [2] Tab. 6.10 byly zvoleny předběžné magnetické indukce ve jhu statoru  $B_{j1} = 1,45 \text{ T}$  a v zubech  $B_{z1} = 1,75 \text{ T}$ .

Činitel plnění železa  $k_{Fe}$  pro elektrotechnické plechy izolované vrstvou oxidu je dle [2] Tab. 6.11  $k_{Fe} = 0,97$

Předběžná šířka zubu statoru:

$$b_{z1} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{d1} \cdot l_i}{B_{z1} \cdot l_{Fe1} \cdot k_{Fe}} = \frac{0,834 \cdot 0,0108 \cdot 0,19}{1,75 \cdot 0,19 \cdot 0,97} = 0,00531 \text{ m} = 5,31 \text{ mm} \quad (26)$$

Výška statorového jha:

$$h_{j1} = \frac{\phi}{2 \cdot B_{j1} \cdot l_{Fe1} \cdot k_{Fe}} = \frac{0,0131}{2 \cdot 1,45 \cdot 0,19 \cdot 0,97} = 0,0245 \text{ m} = 24,5 \text{ mm} \quad (27)$$

Hloubka drážky:

$$h_d = \frac{D_e - D}{2} - h_{j1} = \frac{0,349 - 0,248}{2} - 0,0245 = 0,026 \text{ m} = 26 \text{ mm} \quad (28)$$

Šířka drážky u paty zubu:

$$b_1 = \frac{\pi \cdot (D + 2 \cdot h_d)}{Q_1} - b_{z1} = \frac{\pi \cdot (0,248 + 2 \cdot 0,026)}{72} - 0,00531 = 0,0078 \text{ m} = 7,8 \text{ mm} \quad (29)$$

Otevření drážky je dle [2] Tab. D 4.1 c  $b_0 = 3,5 \text{ mm}$  a  $h_0 = 0,5 \text{ mm}$

Šířka drážky v horní části:

$$b_2 = \frac{\pi \cdot (D + 2 \cdot h_0 - b_0) - Q_1 \cdot b_{z1}}{Q_1 - \pi} = \frac{\pi \cdot (0,248 + 2 \cdot 0,0005 - 0,0035) - 72 \cdot 0,00531}{72 - \pi} \quad (30)$$

$$b_2 = 0,0056 \text{ m} = 5,6 \text{ mm}$$

Aktivní hloubka drážky:

$$h_1 = h_d - \left( h_0 + \frac{b_2 - b_0}{2} \right) = 0,026 - \left( 0,0005 + \frac{0,0056 - 0,0035}{2} \right) \quad (31)$$

$$h_1 = 0,0245 \text{ m} = 24,5 \text{ mm}$$

Celková hloubka drážky:

$$h_d = h_1 + h_k + h_0 = 24,5 + 1,72 + 0,5 = 26,72 \text{ mm}, \quad (32)$$

kde  $h_k$  je výška klínové části drážky dle [2] Tab. D 4.1 c  $h_k = 1,72 \text{ mm}$ .

Rozměry drážky s uvažováním přídatku na skládání plechů:

$$b_1' = b_1 - \Delta b_d = 0,0078 - 0,0002 = 0,0076 \text{ m} = 7,6 \text{ mm} \quad (33)$$

$$b_2' = b_2 - \Delta b_d = 0,0056 - 0,0002 = 0,0054 \text{ m} = 5,4 \text{ mm} \quad (34)$$

$$h_1' = h_1 - \Delta h_d = 0,0245 - 0,0002 = 0,0243 \text{ m} = 24,3 \text{ mm} \quad (35)$$

Plocha příčného řezu drážkové izolace:

$$S_{vi} = b_{vi} \cdot (2 \cdot h_d + b_1 + b_2) \quad (36)$$

$$S_{vi} = 0,0004 \cdot (2 \cdot 0,02672 + 0,0078 + 0,0056) = 27 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 = 27 \text{ mm}^2,$$

kde  $b_{vi}$  je tloušťka drážkové izolace dle [2] Tab. 3.8  $b_{vi} = 0,4 \text{ mm}$ .

Plocha vložek mezi vrstvami vinutí v drážce:

$$S_{vl} = 0,4 \cdot b_1 + 0,9 \cdot b_2 = 0,4 \cdot 7,8 + 0,9 \cdot 5,6 = 8,2 \text{ mm}^2 \quad (37)$$

Aktivní plocha příčného řezu drážky:

$$S_d' = \frac{b_1' + b_2'}{2} \cdot h_1' - S_{vi} - S_{vl} = \frac{0,0076 + 0,0054}{2} \cdot 0,0243 - 27 \cdot 10^{-6} - 8,2 \cdot 10^{-6}$$

$$S_d' = 122,8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 = 122,8 \text{ mm}^2 \quad (38)$$



Činitel plnění drážky:

$$k_T = \frac{d_{vi}^2 \cdot V_d \cdot n_p}{S_d'} = \frac{0,00146^2 \cdot 14 \cdot 3}{122,8 \cdot 10^{-6}} = 0,729 \quad (39)$$

Tato hodnota činitele plnění drážky je vyhovující dle [2] Tab. 3.12.

## 1.4 Výpočet rotoru

Vzduchová mezera zvolena dle [2] Obr. 6.21:

$$\delta = 0,5 \text{ mm}$$

Počet drážek rotoru zvolen dle [2] Tab. 6.15:

$$Q_2 = 62$$

Vnější průměr rotoru:

$$D_2 = D - 2 \cdot \delta = 0,248 - 2 \cdot 0,0005 = 0,247 \text{ m} \quad (40)$$

Délka rotoru:

$$l_2 = l_i = 0,19 \text{ m} \quad (41)$$

Drážková rozteč:

$$t_{d2} = \frac{\pi \cdot D_2}{Q_2} = \frac{\pi \cdot 0,247}{62} = 0,0125 \text{ m} \quad (42)$$

Vnitřní průměr rotoru (průměr hřídele):

$$D_i = D_h = k_h \cdot D_e = 0,23 \cdot 0,349 = 0,08 \text{ m}, \quad (43)$$

kde činitel  $k_h$  zvolen dle [2] Tab. 6.16  $k_h = 0,23$ .

Činitel přepočtu proudů:

$$p_i = \frac{2 \cdot m_1 \cdot N_1 \cdot k_{v1}}{Q_2} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 84 \cdot 0,91}{62} = 7,4 \quad (44)$$

Proud v tyči rotorového vinutí:

$$I_t = k_i \cdot I_1 \cdot p_i = 0,91 \cdot 50 \cdot 7,4 = 337 \text{ A}, \quad (45)$$

kde činitel  $k_i$  zvolen dle [2] Obr. 6.22  $k_i = 0,91$ .

Příčný průřez tyče:

$$S_t = \frac{I_t}{J_2} = \frac{337}{2,5 \cdot 10^6} = 134,8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 = 134,8 \text{ mm}^2, \quad (46)$$

kde  $J_2$  je proudová hustota v tyčích rotoru, zvolena dle [2]  $J_2 = 2,5 \cdot 10^6 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$ .

## 1.5 Výpočet rozměrů rotorové drážky

Drážka rotoru je zavřená typu V dle [2] Obr. 6.27 b) s rozměry  $b_0 = 1,5 \text{ mm}$ ,  $h_0 = 0,7 \text{ mm}$  a  $h_0' = 0,3 \text{ mm}$ .

Dovolená šířka zubu:

$$b_{z2} = \frac{B_\delta \cdot t_{d2} \cdot l_i}{B_{z2} \cdot l_{Fe2} \cdot k_{Fe}} = \frac{0,834 \cdot 0,0125 \cdot 0,19}{1,8 \cdot 0,19 \cdot 0,97} = 0,006 \text{ m}, \quad (47)$$

kde  $B_{z2}$  je dovolená magnetická indukce v zubech rotoru s rovnoběžnými stěnami zvolena dle [2] Tab. 6.10  $B_{z2} = 1,8 \text{ T}$ .

Průměr zaoblení horní části drážky:

$$b_1 = \frac{\pi \cdot (D_2 - 2 \cdot h_0 - 2 \cdot h_0') - Q_2 \cdot b_{z2}}{\pi + Q_2} = \frac{\pi(247 - 2 \cdot 0,7 - 2 \cdot 0,3) - 62 \cdot 6}{\pi + 62} = 6,1 \text{ mm} \quad (48)$$

Průměr zaoblení dolní části drážky:

$$b_2 = \sqrt{\frac{b_1^2 \cdot \left(\frac{Q_2}{\pi} + \frac{\pi}{2}\right) - 4 \cdot S_t}{\frac{Q_2}{\pi} - \frac{\pi}{2}}} = \sqrt{\frac{6,1^2 \cdot \left(\frac{62}{\pi} + \frac{\pi}{2}\right) - 4 \cdot 134,8}{\frac{62}{\pi} - \frac{\pi}{2}}} = 3,74 \text{ mm} \quad (49)$$

Vzdálenost středů zaoblení:

$$h_1 = (b_1 - b_2) \cdot \frac{Q_2}{2 \cdot \pi} = (6,1 - 3,74) \cdot \frac{62}{2 \cdot \pi} = 23,3 \text{ mm} \quad (50)$$

Celková hloubka rotorové drážky:

$$h_{d2} = h_0' + h_0 + \frac{b_1 + b_2}{2} + h_1 = 0,3 + 0,7 + \frac{6,1 + 3,74}{2} + 23,3 = 29,22 \text{ mm} \quad (51)$$

Skutečný průřez tyče:

$$S_t = \frac{\pi}{8} \cdot (b_1^2 + b_2^2) + \frac{1}{2} \cdot (b_1 + b_2) \cdot h_1 \quad (52)$$

$$S_t = \frac{\pi}{8} \cdot (6,1^2 + 3,74^2) + \frac{1}{2} \cdot (6,1 + 3,74) \cdot 23,3 = 134,74 \text{ mm}^2$$

Hustota proudu v tyči:

$$J_t = \frac{I_2}{S_t} = \frac{337}{134,74 \cdot 10^{-6}} = 2,5 \cdot 10^6 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2} \quad (53)$$

### Výpočet kruhu nakrátko

Proud kruhem nakrátko:

$$I_{kn} = \frac{I_t}{\Delta} = \frac{337}{0,303} = 1112 \text{ A}, \quad (54)$$

$$\text{kde } \Delta = 2 \cdot \sin \frac{\pi \cdot p}{Q_2} = 2 \cdot \sin \frac{\pi \cdot 3}{62} = 0,303. \quad (55)$$

Průřez kruhu nakrátko:

$$S'_{kn} = \frac{I_{kn}}{J_{kn}} = \frac{1112}{2,13 \cdot 10^6} = 522,1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 = 522,1 \text{ mm}^2, \quad (56)$$

kde  $J_{kn}$  je proudová hustota v kruhu nakrátko dle [2] o 15 až 20 % menší než hustota proudu v tyčích.

$$J_{kn} = 0,85 \cdot J_t = 0,85 \cdot 2,5 \cdot 10^6 = 2,13 \cdot 10^6 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2} \quad (57)$$

Rozměry kruhu nakrátko:

$$a_{kn} = 1,25 \cdot h_{d2} = 1,25 \cdot 29,22 = 36,5 \text{ mm} \quad (58)$$

$$b_{kn} = \frac{S'_{kn}}{a_{kn}} = \frac{522,1}{36,5} = 14,3 \text{ mm} \quad (59)$$

$$S_{kn} = a_{kn} \cdot b_{kn} = 36,5 \cdot 14,3 = 522 \text{ mm}^2 \quad (60)$$

Vnitřní průměr kruhu nakrátko:

$$D_{kn} = D_2 - a_{kn} = 247 - 36,5 = 210,5 \text{ mm} \quad (61)$$

## 1.6 Výpočet magnetizačního proudu

Magnetická indukce v zubech statoru:

$$B_{z1} = \frac{B_\delta \cdot t_{d1} \cdot l_i}{b_{z1} \cdot l_{Fe1} \cdot k_{Fe}} = \frac{0,834 \cdot 0,0108 \cdot 0,19}{0,00531 \cdot 0,19 \cdot 0,97} = 1,749 \text{ T} \quad (62)$$

Magnetická indukce v zubech rotoru:

$$B_{z2} = \frac{B_\delta \cdot t_{d2} \cdot l_i}{b_{z2} \cdot l_{Fe2} \cdot k_{Fe}} = \frac{0,834 \cdot 0,0125 \cdot 0,19}{0,006 \cdot 0,19 \cdot 0,97} = 1,791 \text{ T} \quad (63)$$

Magnetická indukce ve jhu statoru:

$$B_{j1} = \frac{\phi}{2 \cdot h'_{j1} \cdot l_{Fe1} \cdot k_{Fe}} = \frac{0,0131}{2 \cdot 0,02378 \cdot 0,19 \cdot 0,97} = 1,495 \text{ T}, \quad (64)$$

kde  $h'_{j1}$  je výpočtová výška jha statoru.

$$h'_{j1} = \frac{D_e - D_i}{2} - h_{d1} = \frac{0,349 - 0,248}{2} - 0,02672 = 0,02378 \text{ m} \quad (65)$$

Magnetická indukce ve jhu rotoru:

$$B_{j2} = \frac{\phi}{2 \cdot h'_{j2} \cdot l_{Fe2} \cdot k_{Fe}} = \frac{0,0131}{2 \cdot 0,05428 \cdot 0,19 \cdot 0,97} = 0,655 \text{ T}, \quad (66)$$

kde  $h'_{j2}$  je výpočtová výška jha rotoru.

$$h'_{j2} = \frac{D_2 - D_i}{2} - h_{d2} = \frac{0,247 - 0,08}{2} - 29,22 = 0,05428 \text{ m} \quad (67)$$

Carterův činitel:

$$k_c = \frac{t_{d1}}{t_{d1} - \gamma \cdot \delta} = \frac{0,0108}{0,0108 - 4,1 \cdot 0,0005} = 1,234, \quad (68)$$

kde

$$\gamma = \frac{\left(\frac{b_0}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{b_0}{\delta}} = \frac{\left(\frac{0,0035}{0,0005}\right)^2}{5 + \frac{0,0035}{0,0005}} = 4,1. \quad (69)$$

Magnetické napětí vzduchové mezery:

$$U_\delta = 1,59 \cdot B_\delta \cdot \delta \cdot k_c \cdot 10^6 \quad (70)$$

$$U_\delta = 1,59 \cdot 0,834 \cdot 0,0005 \cdot 1,234 \cdot 10^6 = 818,18 \text{ A}$$

Magnetické napětí zubů statoru:

$$U_{z1} = 2 \cdot h_{z1} \cdot H_{z1} = 2 \cdot 0,02672 \cdot 3329 = 177,9 \text{ A}, \quad (71)$$

kde výpočtová výška zubu statoru  $h_{z1} = h_{d1} = 0,02672 \text{ m}$  a intenzita magnetického pole v zubech statoru dle [2] Tab. D 2.13 pro ocel 2411 a magnetickou indukci  $B_{z1} = 1,749 \text{ T}$  je  $H_{z1} = 3329 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$ .

Magnetické napětí zubů rotoru:

$$U_{z2} = 2 \cdot h_{z2} \cdot H_{z2} = 2 \cdot 0,0288 \cdot 4211 = 242,6 \text{ A}, \quad (72)$$

kde výpočtová výška zubu rotoru  $h_{z2} = h_{d2} - 0,1 \cdot b_2 = 29,22 - 0,1 \cdot 3,74 = 28,8 \text{ mm}$  a intenzita magnetického pole v zubech rotoru dle [2] Tab. D 2.13 pro ocel 2411 a magnetickou indukci  $B_{z2} = 1,791 \text{ T}$  je  $H_{z2} = 4211 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$ .

Činitel nasycení zubů:

$$k_z = 1 + \frac{U_{z1} + U_{z2}}{U_\delta} = 1 + \frac{177,9 + 242,6}{818,18} = 1,51 \quad (73)$$

Hodnota činitele nasycení zubů leží v doporučené mezi.

Délka střední magnetické indukční čáry ve jhu statoru:

$$l_{j1} = \frac{\pi \cdot (D_e - h_{j1})}{2 \cdot p} = \frac{\pi \cdot (0,349 - 0,0245)}{2 \cdot 3} = 0,1699 \text{ m} \quad (74)$$

Délka střední magnetické indukční čáry ve jhu rotoru:

$$l_{j2} = \frac{\pi \cdot (D_h + h_{j2})}{2 \cdot p} = \frac{\pi \cdot (0,08 + 0,05428)}{2 \cdot 3} = 0,0703 \text{ m}, \quad (75)$$

kde výška jha rotoru je

$$h_{j2} = \frac{D_2 - D_i}{2} - h_{d2} = \frac{0,247 - 0,08}{2} - 29,22 = 0,05428 \text{ m}. \quad (76)$$

Magnetické napětí jha statoru:

$$U_{j1} = l_{j1} \cdot H_{j1} = 0,1699 \cdot 1197 = 203,37 \text{ A}, \quad (77)$$

kde intenzita magnetického pole ve jhu statoru dle [2] Tab. D 2.12 pro ocel 2411 a magnetickou indukci  $B_{j1} = 1,495 \text{ T}$  je  $H_{j1} = 1197 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$ .

Magnetické napětí jha rotoru:

$$U_{j2} = l_{j2} \cdot H_{j2} = 0,0703 \cdot 72,4 = 5,09 \text{ A}, \quad (78)$$

kde intenzita magnetického pole ve jhu rotoru dle [2] Tab. D 2.12 pro ocel 2411 a magnetickou indukci  $B_{j2} = 0,655 \text{ T}$  je  $H_{j2} = 72,4 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$ .

Výsledné magnetické napětí na jednu pólovou dvojici:

$$F_m = U_\delta + U_{z1} + U_{z2} + U_{j1} + U_{j2} \quad (79)$$

$$F_m = 818,18 + 177,9 + 242,6 + 203,37 + 5,09 = 1447,14 \text{ A}$$

Činitel nasycení magnetického obvodu:

$$k_\mu = \frac{F_m}{U_\delta} = \frac{1447,14}{818,18} = 1,77 \quad (80)$$

Magnetizační proud:

$$I_{\mu} = \frac{p \cdot F_m}{0,9 \cdot m \cdot N_1 \cdot k_{v1}} = \frac{3 \cdot 1447,14}{0,9 \cdot 3 \cdot 84 \cdot 0,91} = 21,04 \text{ A} \quad (81)$$

Poměrná hodnota magnetizačního proudu:

$$i_{\mu} = \frac{I_{\mu}}{I_1} = \frac{21,04}{50} = 0,42 \quad (82)$$

Hodnota poměrného magnetizačního proudu  $i_{\mu}$  je ještě přijatelná.

## 1.7 Výpočet odporů a reaktancí

Pro izolaci tepelné třídy F je výpočtová teplota  $\vartheta = 115 \text{ }^{\circ}\text{C}$  a pro měď je měrná rezistivita  $\rho_{\text{Cu}115} = 10^{-6}/41 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$

Střední šířka cívky:

$$b_c = \frac{\pi \cdot (D + h_{d1})}{2 \cdot p} \cdot \beta_1 = \frac{\pi \cdot (0,248 + 0,02672)}{2 \cdot 3} \cdot 0,8333 = 0,12 \text{ m}, \quad (83)$$

kde  $\beta_1$  je poměrné zkrácení kroku statorového vinutí

$$\beta_1 = \frac{2}{3} \cdot \frac{q+1}{q} = \frac{2}{3} \cdot \frac{4+1}{4} = 0,8333. \quad (84)$$

Délka čela:

$$l_{\zeta} = K_{\zeta} \cdot b_c + 2 \cdot B = 1,4 \cdot 0,12 + 2 \cdot 0,01 = 0,188 \text{ m}, \quad (85)$$

kde činitel  $K_{\zeta}$  dle [2] Tab. 6.19 je  $K_{\zeta} = 1,4$  a  $B$  je délka přímé části cívky při výstupu z drážky od čela statorového svazku do začátku ohybu čela, pro vsypávané vinutí  $B = 0,01 \text{ m}$ .



Vyložení čel statorového vinutí:

$$l_v = K_v \cdot b_c + B = 0,5 \cdot 0,12 + 0,01 = 0,07 \text{ m} \quad (86)$$

Střední délka závitů:

$$l_{av} = 2 \cdot (l_d + l_{\zeta}) = 2 \cdot (0,19 + 0,188) = 0,756 \text{ m}, \quad (87)$$

kde  $l_d$  je délka drážkové části a je rovna konstrukční délce statorového svazku  $l_d = l_i$ .

Celková délka vodičů jedné fáze statorového vinutí:

$$L_1 = l_{av} \cdot N_1 = 0,756 \cdot 84 = 63,5 \text{ m} \quad (88)$$

Odpor jedné fáze statorového vinutí:

$$R_1 = \rho_{Cu115} \cdot \frac{L_1}{S_{ef} \cdot a} = \frac{10^{-6}}{41} \cdot \frac{63,5}{4,107 \cdot 2} = 0,189 \Omega \quad (89)$$

Poměrná hodnota odporu:

$$r_1 = R_1 \cdot \frac{I_{1N}}{U_{1N}} = 0,189 \cdot \frac{50}{230} = 0,041 \quad (90)$$

Odpor tyče:

$$R_t = \rho_{Al115} \cdot \frac{l_2}{S_t} = \frac{10^{-6}}{20,5} \cdot \frac{0,19}{134,74 \cdot 10^{-6}} = 68,79 \cdot 10^{-6} \Omega, \quad (91)$$

kde  $\rho_{Al115}$  je měrná rezistivita litého hliníku  $\rho_{Al115} = 10^{-6}/20,5 \Omega \cdot \text{m}$ .

Odpor kruhu nakrátko:

$$R_{kn} = \rho_{Al115} \cdot \frac{\pi \cdot D_{kn}}{Q_2 \cdot S_{kn}} = \frac{10^{-6}}{20,5} \cdot \frac{\pi \cdot 0,2105}{62 \cdot 522 \cdot 10^{-6}} = 0,997 \cdot 10^{-6} \Omega \quad (92)$$

Odpor fáze rotorového vinutí:

$$R_2 = R_t + 2 \cdot \frac{R_{kn}}{\Delta^2} = 68,79 \cdot 10^{-6} + 2 \cdot \frac{0,997 \cdot 10^{-6}}{0,303^2} = 90,5 \cdot 10^{-6} \Omega \quad (93)$$

Odpor fáze rotoru přepočtený na počet závitů statorového vinutí:

$$R_2' = R_2 \cdot \frac{4 \cdot m_1 \cdot (N_1 \cdot k_{v1})^2}{Q_2} = 90,5 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{4 \cdot 3 \cdot (84 \cdot 0,91)^2}{62} = 0,102 \Omega \quad (94)$$

Poměrná hodnota odporu:

$$r_2' = R_2' \cdot \frac{I_{1N}}{U_{1N}} = 0,102 \cdot \frac{50}{230} = 0,022 \quad (95)$$

Činitel magnetické vodivosti v drážce statoru:

$$\lambda_{d1} = \frac{h_3}{3 \cdot b_2} \cdot k_\beta + \left( \frac{u}{b_2} + \frac{3 \cdot h_k}{b_2 + 2 \cdot b_0} + \frac{h_0}{b_0} \right) \cdot k_{\beta'} \quad (96)$$

$$\lambda_{d1} = \frac{23,22}{3 \cdot 5,6} \cdot 0,906 + \left( \frac{1,28}{5,6} + \frac{3 \cdot 1,72}{5,6 + 2 \cdot 3,5} + \frac{0,5}{3,5} \right) \cdot 0,875 = 1,94,$$

kde  $h_3 = h_1 - u = 24,5 - 1,28 = 23,22$  mm a  $u$  je část klínu zasahující do aktivní části drážky a činitelé  $k_\beta$  a  $k_{\beta'}$  se spočítají jako:

$$k_\beta = 0,25 \cdot (1 + 3 \cdot k_{\beta'}) = 0,25 \cdot (1 + 3 \cdot 0,875) = 0,906, \quad (97)$$

$$k_{\beta'} = 0,25 \cdot (1 + 3 \cdot \beta) = 0,25 \cdot (1 + 3 \cdot 0,8333) = 0,875. \quad (98)$$

Činitel magnetické vodivosti čel vinutí statoru:

$$\lambda_{\zeta 1} = 0,34 \cdot \frac{q}{l_i} \cdot (l_\zeta - 0,64 \cdot \beta \cdot t_p) \quad (99)$$

$$\lambda_{\zeta 1} = 0,34 \cdot \frac{4}{0,19} \cdot (0,188 - 0,64 \cdot 0,8333 \cdot 0,13) = 0,85$$

Činitel magnetické vodivosti diferenčního rozptylu statoru:

$$\lambda_{dif1} = \frac{t_{d1}}{12 \cdot \delta \cdot k_c} \cdot \xi = \frac{0,0108}{12 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} \cdot 1,234} \cdot 1,066 = 1,555, \quad (100)$$

kde činitel  $\xi$  se určí jako:

$$\xi = 2 \cdot k_{\gamma'} \cdot k_{\beta} - k_{v1}^2 \cdot \left(\frac{t_{d2}}{t_{d1}}\right)^2 \cdot (1 + \beta_{\gamma}^2), \quad (101)$$

$$\xi = 2 \cdot 1,2 \cdot 0,906 - 0,91^2 \cdot \left(\frac{0,0125}{0,0108}\right)^2 \cdot 1 = 1,066,$$

kde činitel  $k_{\gamma'}$  dle [2] Obr. 6.39 e) pro poměr  $\frac{t_{d2}}{t_{d1}} = \frac{0,0125}{0,0108} = 1,157$  a činitel natočení drážek  $\beta_{\gamma} = 0$  je  $k_{\gamma'} = 1,2$ .

Rozptylová reaktance fáze statorového vinutí:

$$X_{1\sigma} = 15,8 \cdot \frac{f_1}{100} \cdot \left(\frac{N_1}{100}\right)^2 \cdot \frac{l_i}{p \cdot q} \cdot (\lambda_{d1} + \lambda_{\zeta 1} + \lambda_{dif1}) \quad (102)$$

$$X_{1\sigma} = 15,8 \cdot \frac{50}{100} \cdot \left(\frac{84}{100}\right)^2 \cdot \frac{0,19}{3 \cdot 4} \cdot (1,94 + 0,85 + 1,555) = 0,383 \Omega$$

Poměrná hodnota rozptylové reaktance:

$$x_{1\sigma} = X_{1\sigma} \cdot \frac{I_{1N}}{U_{1N}} = 0,383 \cdot \frac{50}{230} = 0,083 \quad (103)$$

Činitel magnetické vodivosti drážky rotoru:

$$\lambda_{d2} = \left( \frac{h_1}{3 \cdot b_1} \cdot \left( 1 - \frac{\pi \cdot b_1^2}{8 \cdot S_t} \right)^2 + 0,66 - \frac{b_0}{2 \cdot b_1} \right) \cdot k_d + \frac{h_0}{b_0} + 1,12 \cdot \frac{h_0'}{l_2} \cdot 10^6 \quad (104)$$

$$\lambda_{d2} = \left( \frac{24,796}{3 \cdot 6,1} \cdot \left( 1 - \frac{\pi \cdot 6,1^2}{8 \cdot 134,74} \right)^2 + 0,66 - \frac{1,5}{2 \cdot 6,1} \right) \cdot 1 + \frac{0,7}{1,5} + 1,12 \frac{0,0003}{337} \cdot 10^6 = 3,078,$$

kde činitel  $k_d$  pro jmenovitý chod je  $k_d = 1$  a výška  $h_1$ :

$$h_1 = h_{d2} - h_0' - h_0 - 0,5 \cdot b_1 - 0,1 \cdot b_2, \quad (105)$$

$$h_1 = 29,22 - 0,3 - 0,7 - 0,5 \cdot 6,1 - 0,1 \cdot 3,74 = 24,796.$$

Činitel magnetické vodivosti čel rotoru:

$$\lambda_{\check{c}2} = \frac{2,3 \cdot D_{kn}}{Q_2 \cdot l_i \cdot \Delta^2} \cdot \log \frac{4,7 \cdot D_{kn}}{2 \cdot a_{kn} + b_{kn}} = \frac{2,3 \cdot 0,2105}{62 \cdot 0,19 \cdot 0,303^2} \cdot \log \frac{4,7 \cdot 0,2105}{2 \cdot 0,0365 + 0,0143} = 0,47 \quad (106)$$

Činitel magnetické vodivosti diferenčního rozptylu rotoru:

$$\lambda_{dif2} = \frac{t_{d2}}{12 \cdot \delta \cdot k_c} \cdot \xi = \frac{12,5}{12 \cdot 0,5 \cdot 1,234} \cdot 0,97 = 1,638, \quad (107)$$

kde činitel  $\xi$  se určí jako:

$$\xi = 1 + \frac{1}{5} \cdot \left( \frac{\pi \cdot p}{Q_2} \right)^2 - \frac{\Delta_z}{1 - \left( \frac{p}{Q_2} \right)^2} = 1 + \frac{1}{5} \cdot \left( \frac{\pi \cdot 3}{62} \right)^2 - \frac{0,03}{1 - \left( \frac{3}{62} \right)^2} = 0,97, \quad (108)$$

kde činitel  $\Delta_z$  dle [2] Obr. 6.39 a) pro poměr  $\frac{b_0}{t_{d2}} = \frac{1,5}{12,5} = 0,12$  a pro poměr

$$\frac{b_0}{\delta} = \frac{1,5}{0,5} = 3 \text{ je } \Delta_z = 0,03.$$

Rozptylová reaktance fáze rotorového vinutí:

$$X_{2\sigma} = 7,9 \cdot f_1 \cdot l_i \cdot (\lambda_{d2} + \lambda_{\xi 2} + \lambda_{dif2}) \cdot 10^{-6} \quad (109)$$

$$X_{2\sigma} = 7,9 \cdot 50 \cdot 0,19 \cdot (3,078 + 0,47 + 1,638) \cdot 10^{-6} = 0,389 \cdot 10^{-3} \Omega$$

Rozptylová reaktance fáze rotoru přepočtená na počet závitů statorového vinutí:

$$X'_{2\sigma} = X_{2\sigma} \cdot \frac{4 \cdot m_1 \cdot (N_1 \cdot k_{v1})^2}{Q_2} = 0,389 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{4 \cdot 3 \cdot (84 \cdot 0,91)^2}{62} = 0,44 \Omega \quad (110)$$

Poměrná hodnota rozptylové reaktance:

$$x'_{2\sigma} = X'_{2\sigma} \cdot \frac{I_{1N}}{U_{1N}} = 0,44 \cdot \frac{50}{230} = 0,095 \quad (111)$$

## 1.8 Výpočet ztrát

Hmotnost železa jha statoru:

$$m_{j1} = \pi \cdot (D_e - h_{j1}) \cdot h_{j1} \cdot l_{Fe1} \cdot k_{Fe} \cdot \gamma_{Fe} \quad (112)$$

$$m_{j1} = \pi \cdot (0,349 - 0,0245) \cdot 0,0245 \cdot 0,19 \cdot 0,97 \cdot 7800 = 35,9 \text{ kg},$$

kde  $\gamma_{Fe}$  je hustota oceli  $\gamma_{Fe} = 7800 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ .

Hmotnost železa zubů statoru:

$$m_{z1} = h_{z1} \cdot b_{z1} \cdot Q_1 \cdot l_{Fe1} \cdot k_{Fe} \cdot \gamma_{Fe} \quad (113)$$

$$m_{z1} = 0,02672 \cdot 0,00531 \cdot 72 \cdot 0,19 \cdot 0,97 \cdot 7800 = 14,69 \text{ kg},$$

kde výška zubu  $h_{z1}$  je rovna hloubce statorové drážky  $h_{d1} = h_{z1} = 0,02672 \text{ m}$ .

Hlavní ztráty v železe:

$$\Delta P_{Feh} = \Delta p_{1,0} \cdot \left(\frac{f_1}{50}\right)^\beta \cdot (k_{dj} \cdot B_{j1}^2 \cdot m_{j1} + k_{dz} \cdot B_{z1}^2 \cdot m_{z1}) \quad (114)$$

$$\Delta P_{Feh} = 2,6 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1,5} \cdot (1,6 \cdot 1,45^2 \cdot 35,9 + 1,8 \cdot 1,75^2 \cdot 14,69) = 524,54 \text{ W},$$

kde exponent  $\beta$  a měrné ztráty v železe  $\Delta p_{1,0}$  jsou určeny dle [2] Tab. 6.24.

$$\beta = 1,5 \text{ a } \Delta p_{1,0} = 2,5 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}.$$

Činitelé uvažující vliv nerovnoměrnosti rozložení toku v částech magnetického obvodu a vliv technologie výroby statorového svazku jsou  $k_{dj} = 1,6$  a  $k_{dz} = 1,8$  pro stroje do výkonu 250 kW.

Hustota povrchových ztrát ve statoru:

$$p_{\delta p1} = 0,5 \cdot k_{01} \cdot \left(\frac{Q_2 \cdot n}{10000}\right)^{1,5} \cdot (B_{01} \cdot t_{d2} \cdot 10^3)^2 \quad (115)$$

$$p_{\delta p1} = 0,5 \cdot 1,6 \cdot \left(\frac{62 \cdot 1000}{10000}\right)^{1,5} \cdot (0,206 \cdot 0,0125 \cdot 10^3)^2 = 81,89 \text{ W},$$

kde  $k_{01}$  je činitel respektující opracování povrchu hlav zubů, u strojů do 160 kW je  $k_{01} = 1,4$  až  $1,8$  zvolen  $k_{01} = 1,6$ .

$B_{01}$  je amplituda pulsací indukce ve vzduchové mezeře nad hlavami zubů rotoru:

$$B_{01} = \beta_{01} \cdot k_c \cdot B_\delta = 0,2 \cdot 1,234 \cdot 0,834 = 0,206 \text{ T}, \quad (116)$$

kde hodnota  $\beta_{01}$  dle [2] Obr. 6.41 a) pro poměr  $\frac{b_{02}}{\delta} = \frac{1,5}{0,5} = 3$  je  $\beta_{01} = 0,2$ .

Celkové povrchové ztráty ve statoru:

$$\Delta P_{\delta p1} = p_{\delta p1} \cdot (t_{d1} - b_{01}) \cdot Q_1 \cdot l_{Fe1} \quad (117)$$

$$\Delta P_{\delta p1} = 81,89 \cdot (0,0108 - 0,0035) \cdot 72 \cdot 0,19 = 8,18 \text{ W}$$

Hustota povrchových ztrát v rotoru:

$$p_{\delta p 2} = 0,5 \cdot k_{02} \cdot \left( \frac{Q_1 \cdot n}{10000} \right)^{1,5} \cdot (B_{02} \cdot t_{d1} \cdot 10^3)^2 \quad (118)$$

$$p_{\delta p 2} = 0,5 \cdot 1,6 \cdot \left( \frac{72 \cdot 1000}{10000} \right)^{1,5} \cdot (0,36 \cdot 0,0108 \cdot 10^3)^2 = 233,64 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2},$$

kde  $k_{02}$  je činitel respektující opracování povrchu hlav zubů, u strojů do 160 kW je  $k_{02} = 1,4$  až  $1,8$  zvolen  $k_{02} = 1,6$ .

$B_{02}$  je amplituda pulsací indukce ve vzduchové mezeře nad hlavami zubů statoru:

$$B_{02} = \beta_{02} \cdot k_c \cdot B_\delta = 0,35 \cdot 1,234 \cdot 0,834 = 0,36 \text{ T}, \quad (119)$$

kde hodnota  $\beta_{02}$  dle [2] Obr. 6.41 a) pro poměr  $\frac{b_{01}}{\delta} = \frac{3,5}{0,5} = 7$  je  $\beta_{02} = 0,35$ .

Celkové povrchové ztráty v rotoru:

$$\Delta P_{\delta p 2} = p_{\delta p 2} \cdot (t_{d2} - b_{02}) \cdot Q_2 \cdot l_{Fe2} \quad (120)$$

$$\Delta P_{\delta p 2} = 233,64 \cdot (0,0125 - 0,0015) \cdot 62 \cdot 0,19 = 30,28 \text{ W}$$

Amplituda pulsací indukce ve středním průřezu zubu statoru:

$$B_{p1} = \frac{\gamma_2 \cdot \delta}{2 \cdot t_{d1}} \cdot B_{z1} = \frac{1,1 \cdot 0,0005}{2 \cdot 0,0108} \cdot 1,749 = 0,045 \text{ T}, \quad (121)$$

kde

$$\gamma_2 = \frac{\left( \frac{b_{02}}{\delta} \right)^2}{5 + \frac{b_{02}}{\delta}} = \frac{\left( \frac{1,5}{0,5} \right)^2}{5 + \frac{1,5}{0,5}} = 1,1. \quad (122)$$

Pulsní ztráty v zubech statoru:

$$\Delta P_{p1} = 0,11 \cdot \left( \frac{Q_2 \cdot n}{1000} \cdot B_{p1} \right)^2 \cdot m_{z1} \quad (123)$$

$$\Delta P_{p1} = 0,11 \cdot \left( \frac{62 \cdot 1000}{1000} \cdot 0,045 \right)^2 \cdot 14,69 = 12,58 \text{ W}$$

Amplituda pulsací indukce ve středním průřezu zubu rotoru:

$$B_{p2} = \frac{\gamma_1 \cdot \delta}{2 \cdot t_{d2}} \cdot B_{z2} = \frac{4,1 \cdot 0,0005}{2 \cdot 0,0125} \cdot 1,791 = 0,147 \text{ T}, \quad (124)$$

kde

$$\gamma_1 = \frac{\left( \frac{b_{01}}{\delta} \right)^2}{5 + \frac{b_{01}}{\delta}} = \frac{\left( \frac{3,5}{0,5} \right)^2}{5 + \frac{3,5}{0,5}} = 4,1. \quad (125)$$

Pulsní ztráty v zubech rotoru:

$$\Delta P_{p2} = 0,11 \cdot \left( \frac{Q_1 \cdot n}{1000} \cdot B_{p2} \right)^2 \cdot m_{z2} \quad (126)$$

$$\Delta P_{p2} = 0,11 \cdot \left( \frac{72 \cdot 1000}{1000} \cdot 0,147 \right)^2 \cdot 15,63 = 192,6 \text{ W}, \quad (127)$$

kde  $m_{z2}$  je hmotnost zubů rotoru určená jako:

$$m_{z2} = h_{z2} \cdot b_{z2} \cdot Q_2 \cdot l_{Fe2} \cdot k_{Fe} \cdot \gamma_{Fe} \quad (128)$$

$$m_{z2} = 0,02922 \cdot 0,006 \cdot 62 \cdot 0,19 \cdot 0,97 \cdot 7800 = 15,63 \text{ kg},$$

kde výška zubu je rovna hloubce rotorové drážky  $h_{z2} = h_{d2} = 29,22 \text{ mm}$ .



Součet dodatečných ztrát v železe:

$$\Delta P_{Fed} = \Delta P_{\delta p 1} + \Delta P_{\delta p 2} + \Delta P_{p 1} + \Delta P_{p 2} \quad (129)$$

$$\Delta P_{Fed} = 8,18 + 30,28 + 12,58 + 192,6 = 243,64 \text{ W}$$

Celkové ztráty v železe:

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_{Feh} + \Delta P_{Fed} = 524,54 + 243,64 = 768,18 \text{ W} \quad (130)$$

Jouleovy ztráty ve všech fázích statoru:

$$\Delta P_{j 1} = m_1 \cdot R_1 \cdot I_1^2 = 3 \cdot 0,189 \cdot 50^2 = 1417,5 \text{ W} \quad (131)$$

Jouleovy ztráty v klecovém vinutí rotoru nakrátko:

$$\Delta P_{j 2} = Q_2 \cdot R_2 I_2^2 = 62 \cdot 90,5 \cdot 10^{-6} \cdot 337^2 = 637,24 \text{ W} \quad (132)$$

Mechanické a ventilační ztráty:

$$\Delta P_{mech} = K_T \cdot \left(\frac{n}{10}\right)^2 \cdot D_e^4 = 0,8463 \cdot \left(\frac{1000}{10}\right)^2 \cdot 0,349^4 = 125,55 \text{ W}, \quad (133)$$

kde

$$K_T = 1,3 \cdot (1 - D_e) = 1,3 \cdot (1 - 0,349) = 0,8463.$$

Dodatečné ztráty při jmenovitém chodu:

$$\Delta P_d = 0,005 \cdot P_{1N} = 0,005 \cdot \frac{P_{2N}}{\eta} = 0,005 \cdot \frac{28000}{0,915} = 153,01 \text{ W} \quad (134)$$

Celkové ztráty stroje:

$$\Delta P = \Delta P_{Fe} + \Delta P_{j1} + \Delta P_{j2} + \Delta P_{mec h} + \Delta P_d \quad (135)$$

$$\Delta P = 768,18 + 1417,5 + 637,24 + 125,55 + 153,01 = 3101,48 \text{ W}$$

Proud naprázdno:

$$I_0 = \sqrt{I_{0\check{c}}^2 + I_{0j}^2} = \sqrt{1,65^2 + 21,04^2} = 21,1 \text{ A}, \quad (136)$$

kde činná a jalová složka proudu naprázdno se určí jako:

$$I_{0\check{c}} = \frac{\Delta P_{Fe} + \Delta P_{mec h} + \Delta P_{j0}}{m_1 \cdot U_{1N}} = \frac{768,18 + 125,55 + 251}{3 \cdot 230} = 1,65 \text{ A} \quad (137)$$

$$I_{0j} = I_{\mu} = 21,04 \text{ A},$$

kde elektrické ztráty ve statorovém vinutí při chodu naprázdno jsou

$$\Delta P_{j0} = m_1 \cdot R_1 \cdot I_{\mu}^2 = 3 \cdot 0,189 \cdot 21,04^2 = 251 \text{ W}. \quad (138)$$

Účinník při chodu naprázdno:

$$\cos \varphi_0 = \frac{I_{0\check{c}}}{I_0} = \frac{1,65}{21,1} = 0,078 \quad (139)$$

Proud nakrátko:

$$I_k = \frac{U_{1N}}{Z_k} = \frac{230}{0,873} = 264,54 \text{ A}, \quad (140)$$

kde impedance nakrátko se určí jako:

$$Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_k^2} = \sqrt{0,291^2 + 0,823^2} = 0,873 \Omega, \quad (141)$$

kde odpor  $R_k$  a reaktance  $X_k$  se určí jako:

$$R_k = R_1 + R_2' = 0,189 + 0,102 = 0,291 \Omega, \quad (142)$$

$$X_k = X_{1\sigma} + X_{2\sigma}' = 0,383 + 0,44 = 0,823 \Omega. \quad (143)$$

Účinník při chodu nakrátko:

$$\cos \varphi_k = \frac{R_k}{Z_k} = \frac{0,291}{0,873} = 0,33 \quad (144)$$

Účinnost stroje:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P} = \frac{28000}{28000 + 3101,48} = 0,9 = 90 \% \quad (145)$$

## 1.9 Výpočet zatěžovacích charakteristik

$$R_{12} = \frac{\Delta P_{Fe h}}{m \cdot I_\mu^2} = \frac{524,54}{3 \cdot 21,04^2} = 0,39 \Omega \quad (146)$$

$$X_{12} = \frac{U_{1N}}{I_\mu} - X_{1\sigma} = \frac{230}{21,04} - 0,383 = 10,59 \Omega \quad (147)$$

Komplexní Hopkinsonův činitel rozptylu:

$$c_1 = \frac{Z_1 + Z_{12}}{Z_{12}} = 1 + \frac{Z_1}{Z_{12}} = c_1 \cdot e^{-j\gamma}, \quad (148)$$

kde

$$\gamma = \arctg \frac{R_1 \cdot X_{12} - R_{12} \cdot X_{1\sigma}}{R_{12} \cdot (R_1 + R_{12}) + X_{12} \cdot (X_{1\sigma} + X_{12})}, \quad (149)$$

$$\gamma = \arctg \frac{0,189 \cdot 10,59 - 0,39 \cdot 0,383}{0,39 \cdot (0,189 + 0,39) + 10,59 \cdot (0,383 + 10,59)} = 0,917^\circ < 1^\circ.$$

Vzhledem k tomu že  $\gamma < 1^\circ$  může se jalová složka činitele  $c_1$  zanedbat a lze psát:

$$c_1 = 1 + \frac{X_{1\sigma}}{X_{12}} = 1 + \frac{0,383}{10,59} = 1,036. \quad (150)$$

Činná složka proudu při synchronním chodu:

$$I_{(0)\varepsilon} = \frac{\Delta P_{Fe h} + 3 \cdot R_1 \cdot I_\mu^2}{3 \cdot U_{1N}} = \frac{524,54 + 3 \cdot 0,189 \cdot 21,04^2}{3 \cdot 230} = 1,119 \text{ A} \quad (151)$$

Jalová složka proudu při synchronním chodu:

$$I_{(0)j} = I_\mu = 21,04 \text{ A}$$

Proud naprázdno při synchronních otáčkách:

$$I_{(0)} = \sqrt{I_{(0)\varepsilon}^2 + I_{(0)j}^2} = \sqrt{1,119^2 + 21,04^2} = 21,07 \text{ A} \quad (152)$$

Výpočtové veličiny  $a$ ,  $a'$ ,  $b$  a  $b'$  se určí jako:

$$a = c_1 \cdot R_1 = 1,036 \cdot 0,189 = 0,196 \Omega \quad (153)$$

$$a' = c_1^2 = 1,036^2 = 1,073 \quad (154)$$

$$b = c_1 \cdot (X_{1\sigma} + c_1 \cdot X_{2\sigma}') = 1,036 \cdot (0,383 + 1,073 \cdot 0,44) = 0,869 \Omega \quad (155)$$

$$b' = 0$$

Ztráty nezávislé na skluzu:

$$\Delta P_{Fe} + \Delta P_{mech} = 768,18 + 125,55 = 893,73 \text{ W} \quad (156)$$

Předběžný jmenovitý skluz:

$$s_N = r_2' = 0,022 \quad (157)$$

Veličiny nezávislé na skluzu pro výpočet zatěžovacích charakteristik:

$$P_{2N} = 28 \text{ kW}$$

$$U_{1N} = 230/400 \text{ V}$$

$$2p = 6$$

$$I_{1N} = 50 \text{ A}$$

$$\Delta P_{Fe} + \Delta P_{mech} = 893,73 \text{ W}$$

$$\Delta P_d = 153,01 \text{ W}$$

$$I_{(0)\varepsilon} = 1,119 \text{ A}$$

$$I_{(0)j} = I_\mu = 21,04 \text{ A}$$

$$R_1 = 0,189 \Omega$$

$$R_2' = 0,102 \Omega$$

$$c_1 = 1,036$$

$$a = 0,196 \Omega$$

$$a' = 1,073$$

$$b = 0,869 \Omega$$

$$b' = 0$$

vztah	Jednotky	Skluz						$s_N$
		0,005	0,01	0,015	0,02	0,025	0,03	0,0224
$a' \cdot R_2'/s$	$\Omega$	21,889	10,945	7,296	5,472	4,378	3,648	4,886
$b' \cdot R_2'/s$	$\Omega$	0	0	0	0	0	0	0
$R = a + a' \cdot R_2'/s$	$\Omega$	22,085	11,141	7,492	5,668	4,574	3,844	5,082
$X = b + b' \cdot R_2'/s$	$\Omega$	0,869	0,869	0,869	0,869	0,869	0,869	0,869
$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$	$\Omega$	22,102	11,175	7,542	5,734	4,656	3,941	5,156
$I_2'' = U_{1N}/Z$	A	10,449	20,666	30,621	40,276	49,601	58,599	44,791
$\cos \varphi_2' = R/Z$	-	0,999	0,997	0,993	0,988	0,982	0,975	0,986
$\sin \varphi_2' = X/Z$	-	0,039	0,078	0,115	0,152	0,187	0,221	0,169
$I_{1\check{c}} = I_{(0)\check{c}} + I_2'' \cdot \cos \varphi_2'$	A	11,558	21,723	31,526	40,912	49,827	58,253	45,283
$I_{1j} = I_{(0)j} + I_2'' \cdot \sin \varphi_2'$	A	21,448	22,652	24,561	27,162	30,315	33,99	28,61
$I_1 = \sqrt{I_{1\check{c}}^2 + I_{1j}^2}$	A	24,364	31,385	39,964	49,108	58,324	67,444	53,564
$I_2' = c_1 \cdot I_2''$	A	10,825	21,41	31,723	41,726	51,387	60,709	46,403
$P_1 = P_p = 3 \cdot U_{1N} \cdot I_{1\check{c}} \cdot 10^{-3}$	kW	8,008	15,05	21,842	28,345	34,521	40,359	31,373
$\Delta P_{j1} = 3 \cdot R_1 \cdot I_1^2 \cdot 10^{-3}$	kW	0,337	0,559	0,906	1,367	1,929	2,579	1,627
$\Delta P_{j2} = 3 \cdot R_2' \cdot I_2'^2 \cdot 10^{-3}$	kW	0,036	0,14	0,308	0,533	0,808	1,128	0,659
$\Delta P_d = \Delta P_{dN} \cdot (I_1/I_{1N})^2$	kW	0,036	0,06	0,098	0,148	0,208	0,278	0,176
$\Delta P = \Delta P_{Fe} + \Delta P_{mech} + \Delta P_{j1} + \Delta P_{j2} + \Delta P_d$	kW	1,303	1,653	2,206	2,942	3,839	4,879	3,356
$P_2 = P_1 - \Delta P$	kW	6,705	13,397	19,636	25,403	30,682	35,48	28,017
$\eta = 1 - \Delta P/P_1$	-	0,837	0,89	0,899	0,896	0,889	0,879	0,893
$\cos \varphi = I_{1\check{c}}/I_1$	-	0,474	0,692	0,789	0,833	0,854	0,864	0,845

Tab. 1. Výpočet zatěžovacích charakteristik

Z průběhu charakteristik  $s = f(P_2)$ , (Obr. 1.) je  $s_N = 0,0224$

Příklad výpočtu pro  $s_N$ :

$$a' \cdot \frac{R_2'}{s} = 1,073 \cdot \frac{0,102}{0,0224} = 4,886 \Omega \quad (158)$$

$$b' \cdot \frac{R_2'}{s} = 0 \cdot \frac{0,102}{0,0224} = 0 \Omega \quad (159)$$

$$R = a + a' \cdot \frac{R_2'}{s} = 0,196 + 4,886 = 5,082 \Omega \quad (160)$$

$$X = b + b' \cdot \frac{R_2'}{s} = 0,869 + 0 = 0,869 \Omega \quad (161)$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{5,082^2 + 0,869^2} = 5,156 \Omega \quad (162)$$

$$I_2'' = \frac{U_{1N}}{Z} = \frac{230}{5,156} = 44,791 \text{ A} \quad (163)$$

$$\cos \varphi_2' = \frac{R}{Z} = \frac{5,082}{5,156} = 0,986 \quad (164)$$

$$\sin \varphi_2' = \frac{X}{Z} = \frac{0,869}{5,156} = 0,169 \quad (165)$$

$$I_{1\check{c}} = I_{(0)\check{c}} + I_2'' \cdot \cos \varphi_2' = 1,119 + 44,791 \cdot 0,986 = 45,283 \text{ A} \quad (166)$$

$$I_{1j} = I_{(0)j} + I_2'' \cdot \sin \varphi_2' = 21,04 + 44,791 \cdot 0,169 = 28,61 \text{ A} \quad (167)$$

$$I_1 = \sqrt{I_{1\check{c}}^2 + I_{1j}^2} = \sqrt{45,283^2 + 28,61^2} = 53,564 \text{ A} \quad (168)$$

$$I_2' = c_1 \cdot I_2'' = 1,036 \cdot 44,791 = 46,403 \text{ A} \quad (169)$$

$$P_1 = P_p = 3 \cdot U_{1N} \cdot I_{1\check{c}} \cdot 10^{-3} = 3 \cdot 230 \cdot 45,283 \cdot 10^{-3} = 31,373 \text{ kW} \quad (170)$$

$$\Delta P_{j1} = 3 \cdot R_1 \cdot I_1^2 \cdot 10^{-3} = 3 \cdot 0,189 \cdot 53,564^2 \cdot 10^{-3} = 1,627 \text{ kW} \quad (171)$$

$$\Delta P_{j2} = 3 \cdot R_2' \cdot I_2'^2 \cdot 10^{-3} = 3 \cdot 0,102 \cdot 46,403^2 \cdot 10^{-3} = 0,659 \text{ kW} \quad (172)$$

$$\Delta P_d = \Delta P_{dN} \cdot \left(\frac{I_1}{I_{1N}}\right)^2 = 153,01 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{53,564}{50}\right)^2 = 0,176 \text{ kW} \quad (173)$$

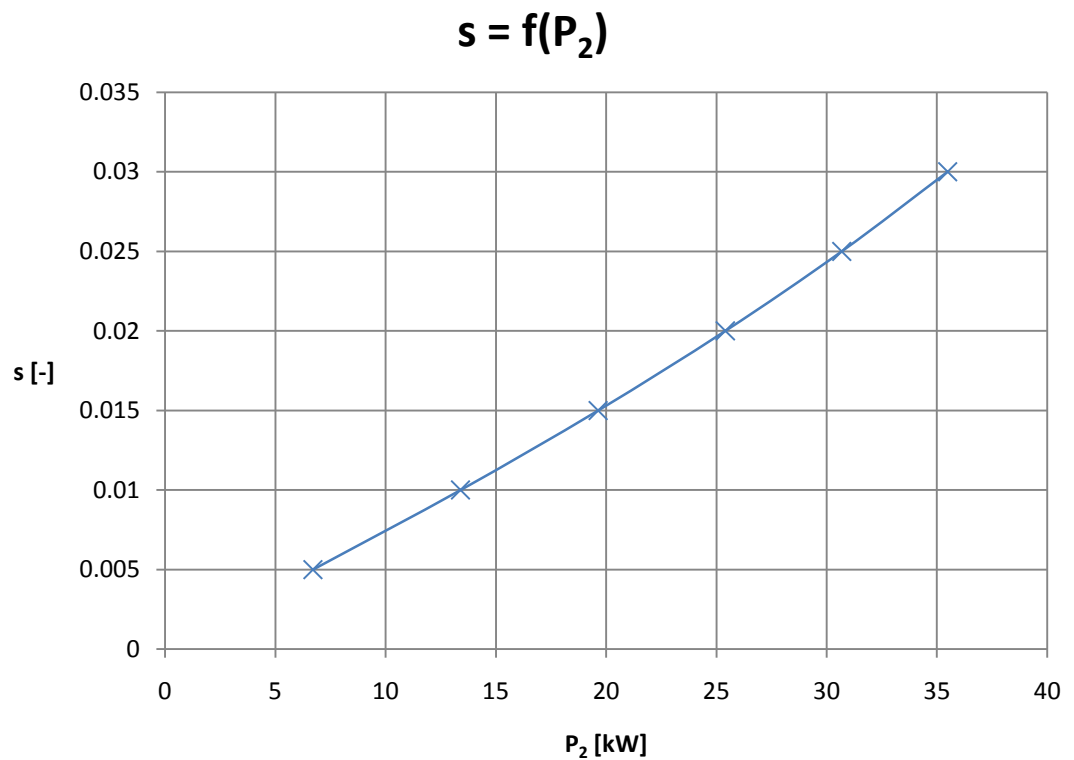
$$\Delta P = \Delta P_{Fe} + \Delta P_{mec h} + \Delta P_{j1} + \Delta P_{j2} + \Delta P_d = \quad (174)$$

$$= 768,18 \cdot 10^{-3} + 125,55 \cdot 10^{-3} + 1,627 + 0,659 + 0,176 = 3,356 \text{ kW}$$

$$P_2 = P_1 - \Delta P = 31,373 - 3,356 = 28,017 \text{ kW} \quad (175)$$

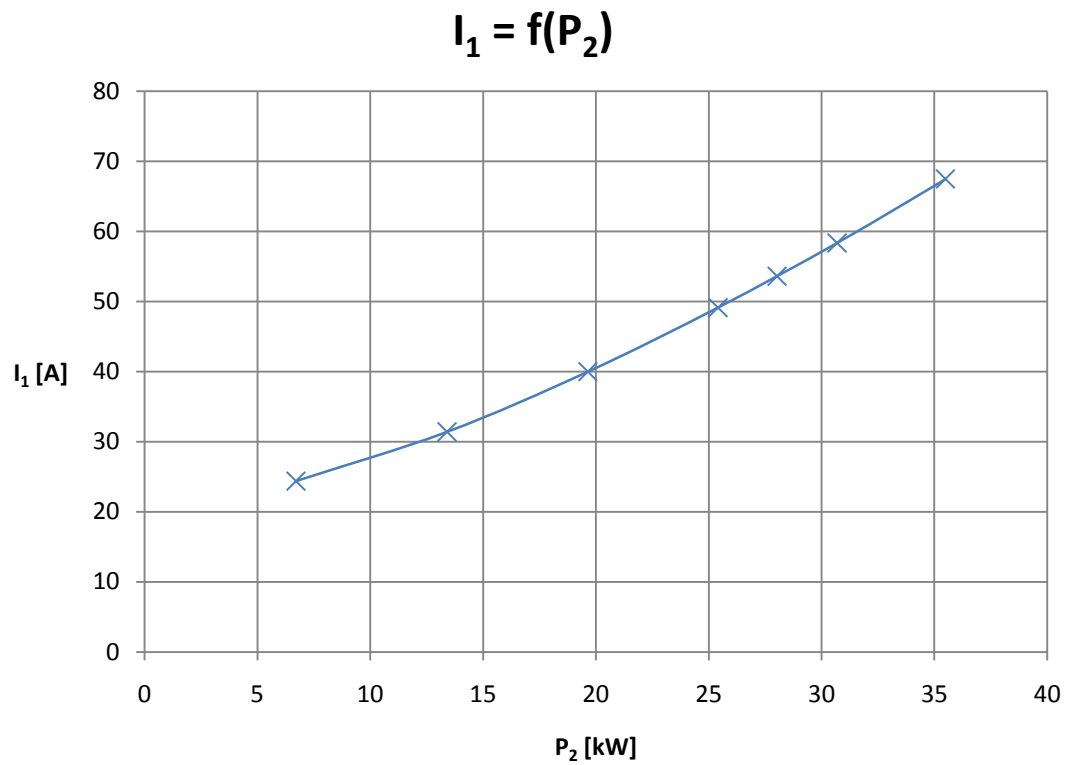
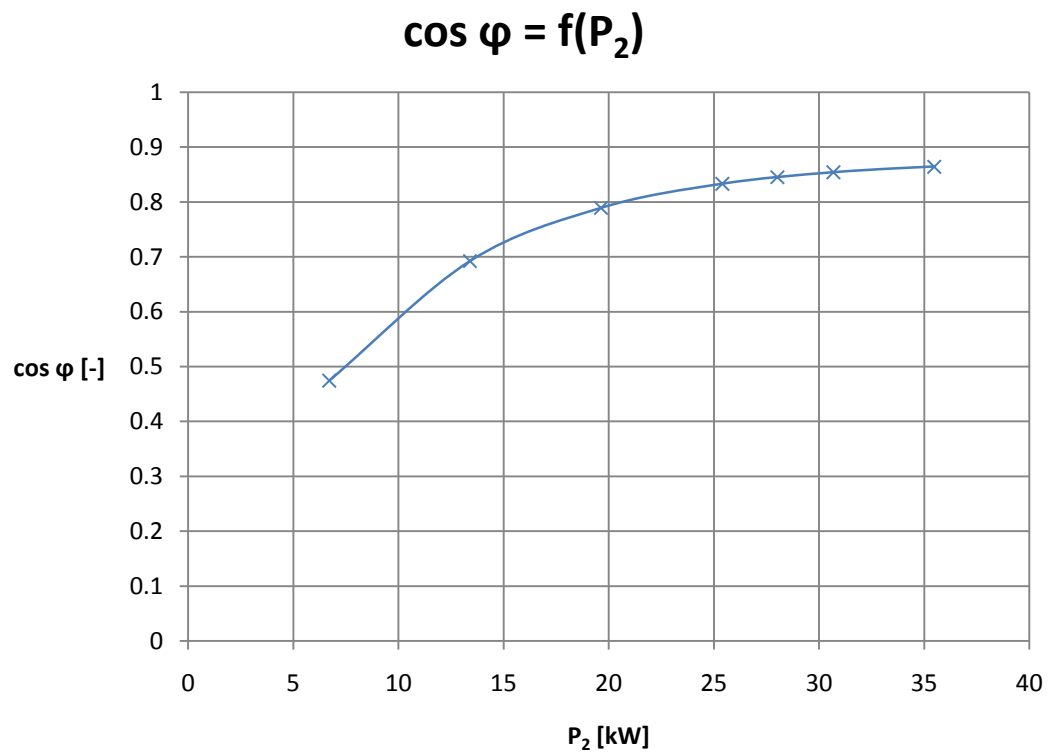
$$\eta = 1 - \frac{\Delta P}{P_1} = 1 - \frac{3,356}{31,373} = 0,893 \quad (176)$$

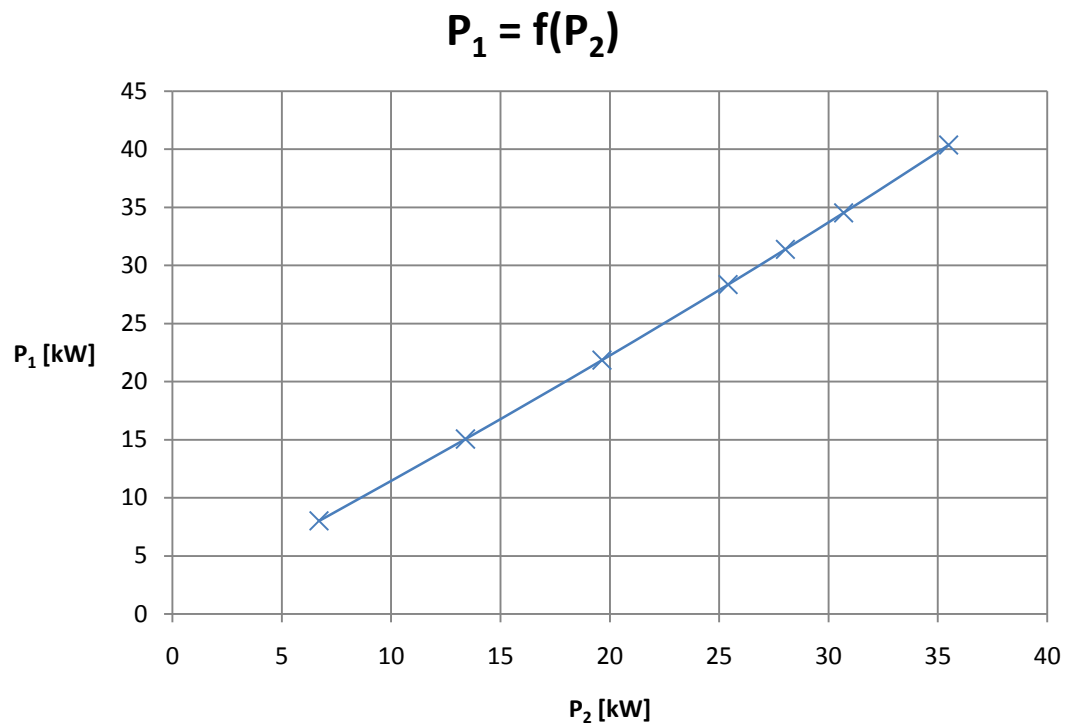
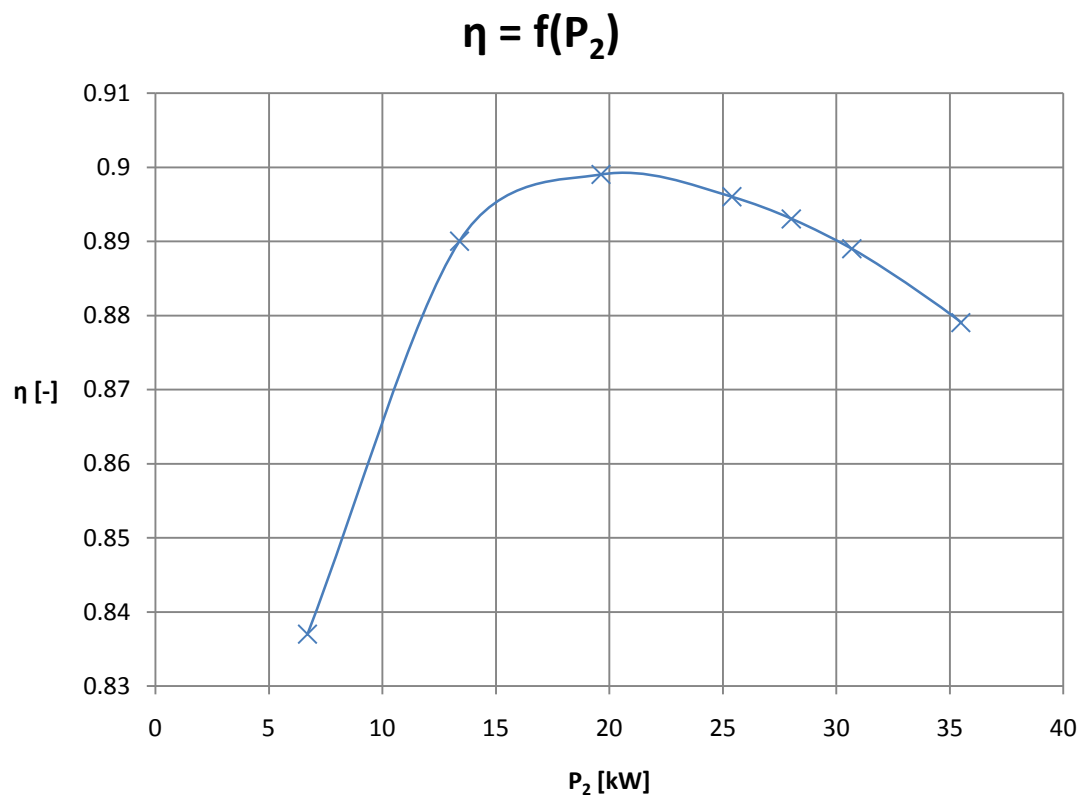
$$\cos \varphi = \frac{I_{1\xi}}{I_1} = \frac{45,283}{53,564} = 0,845 \quad (177)$$



Obr. 1. Závislost skluzu na výkonu P<sub>2</sub>



Obr. 2. Závislost proudu  $I_1$  na výkonu  $P_2$ Obr. 3. Závislost účinníku na výkonu  $P_2$

Obr. 4. Závislost příkonu na výkonu  $P_2$ Obr. 5. Závislost účinnosti na výkonu  $P_2$

## 1.10 Výpočet rozběhových charakteristik

Rozběhové charakteristiky jsou počítány v bodech odpovídajících skluzům  $s = 1; 0,8; 0,5; 0,2; 0,1$ . Podrobný výpočet je uveden pro skluz  $s = 1$ . Odporů a reaktancí jsou počítány s uvažováním vlivu povrchového jevu (při výpočtové teplotě  $\vartheta = 115 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

Redukovaná výška vodiče:

$$\xi = 63,61 \cdot h_t \cdot \sqrt{s} = 63,61 \cdot 0,02822 \cdot \sqrt{1} = 1,8, \quad (178)$$

kde hloubka tyče  $h_t$  se určí jako:

$$h_t = h_1 + \frac{b_1}{2} + \frac{b_2}{2} = 0,0233 + \frac{0,0061}{2} + \frac{0,00374}{2} = 0,02822 \text{ m}. \quad (179)$$

Pro  $\xi = 1,8$  je dle [2] Obr. 6.46  $\varphi(\xi) = 0,6$  a dle [2] Obr. 6.47.  $\varphi'(\xi) = k_d = 0,82$ .

Hloubka vniku proudu:

$$h_R = \frac{h_t}{1+\varphi(\xi)} = \frac{0,02822}{1+0,6} = 0,01764 \text{ m} \quad (180)$$

Plocha průřezu:

$$S_R = \frac{\pi \cdot b_1^2}{8} + \frac{b_1 + b_2}{2} \cdot \left( h_R - \frac{b_1}{2} \right) \quad (181)$$

$$S_R = \frac{\pi \cdot 0,0061^2}{8} + \frac{0,0061 + 0,00462}{2} \cdot \left( 0,01764 - \frac{0,0061}{2} \right) = 92,81 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2,$$

kde

$$b_R = b_1 - \frac{b_1 - b_2}{h_1} \cdot \left( h_R - \frac{b_1}{2} \right), \quad (182)$$

$$b_R = 0,0061 - \frac{0,0061 - 0,00374}{0,0233} \cdot \left( 0,01764 - \frac{0,0061}{2} \right) = 0,00462 \text{ m}.$$

Přepočtený odpor rotorového vinutí s uvažováním povrchového jevu:

$$R'_{2\xi} = K_R \cdot R'_2 = 1,34 \cdot 0,102 = 0,137 \, \Omega, \quad (183)$$

kde činitel  $K_R$  se určí jako:

$$K_R = 1 + \frac{R_t}{R_2} \cdot (k_R - 1) = 1 + \frac{68,79 \cdot 10^{-6}}{90,5 \cdot 10^{-6}} \cdot (1,45 - 1) = 1,34, \quad (184)$$

kde činitel  $k_R$  se určí jako:

$$k_R = \frac{S_t}{S_R} = \frac{134,74 \cdot 10^{-6}}{92,81 \cdot 10^{-6}} = 1,45. \quad (185)$$

Činitel magnetické vodivosti drážky rotoru s uvažováním povrchového jevu:

$$\lambda_{d2\xi} = \left( \frac{h_1}{3 \cdot b_1} \cdot \left( 1 - \frac{\pi \cdot b_1^2}{8 \cdot S_t} \right)^2 + 0,66 - \frac{b_0}{2 \cdot b_1} \right) \cdot k_d + \frac{h_0}{b_0} + 1,12 \cdot \frac{h_0' \cdot 10^6}{i_z \cdot l_2} \quad (186)$$

$$\lambda_{d2\xi} = \left( \frac{24,796}{3 \cdot 6,1} \cdot \left( 1 - \frac{\pi \cdot 6,1^2}{8 \cdot 134,74} \right)^2 + 0,66 - \frac{1,5}{2 \cdot 6,1} \right) \cdot 0,82 + \frac{0,7}{1,5} + 1,12 \cdot \frac{0,0003 \cdot 10^6}{6 \cdot 337} = 1,956,$$

kde  $i_z$  je předběžně zvolený poměrný záběrný proud dle [2] Tab. 6.27  $i_z = 6$ .

Činitel změny rozptylové reaktance fáze rotoru s uvažováním povrchového jevu:

$$K_X = \frac{\lambda_{d2\xi} + \lambda_{\xi 2} + \lambda_{dif 2}}{\lambda_{d2} + \lambda_{\xi 2} + \lambda_{dif 2}} = \frac{1,956 + 0,47 + 1,638}{3,078 + 0,47 + 1,638} = 0,784 \quad (187)$$

Přepočtená rozptylová reaktance rotoru s uvažováním povrchového jevu:

$$X'_{2\sigma\xi} = X'_{2\sigma} \cdot K_X = 0,44 \cdot 0,784 = 0,345 \, \Omega \quad (188)$$

Proud rotoru bez uvažování nasycení rozptylových cest ( $c_1 \approx 1$ ):

$$I_2' = \frac{U_{1N}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_{1\sigma} + X_{2\sigma}')^2}} = \frac{230}{\sqrt{\left(0,189 + \frac{0,137}{1}\right)^2 + (0,383 + 0,345)^2}} = 289,5 \text{ A} \quad (189)$$

Zjištění vlivu nasycení na odpory a reaktance dle [2] je činitel nasycení  $k_n = 1,35$  a  $I_1 \approx I_2'$ .

Celkové magnetické napětí na jednu drážku vinutí:

$$F_{dav} = 0,7 \cdot \frac{k_n \cdot I_1 \cdot V_{d1}}{a} \cdot \left(k_\beta' + k_{y1} \cdot k_{v1} \cdot \frac{Q_1}{Q_2}\right) \quad (190)$$

$$F_{dav} = 0,7 \cdot \frac{1,35 \cdot 289,5 \cdot 14}{2} \cdot \left(0,875 + 0,95 \cdot 0,91 \cdot \frac{72}{62}\right) = 3598 \text{ A}$$

Fiktivní indukce rozptylového toku ve vzduchové mezeře:

$$B_{f\delta} = \frac{F_{dav}}{1,6 \cdot \delta \cdot C_n} \cdot 10^{-6} = \frac{3598}{1,6 \cdot 0,0005 \cdot 1,006} \cdot 10^{-6} = 4,47 \text{ T}, \quad (191)$$

kde činitel  $C_n$  se určí jako:

$$C_n = 0,64 + 2,5 \cdot \sqrt{\frac{\delta}{t_{d1} + t_{d2}}} = 0,64 + 2,5 \cdot \sqrt{\frac{0,5}{10,8 + 12,5}} = 1,006. \quad (192)$$

Dle [2] Obr. 6.50 pro  $B_{f\delta} = 4,47 \text{ T}$  je  $\kappa_\delta = 0,55$

Dodatečné otevření drážek statoru:

$$\Delta b_{01} = (t_{d1} - b_{01}) \cdot (1 - \kappa_\delta) = (10,8 - 3,5) \cdot (1 - 0,55) = 3,285 \text{ mm} \quad (193)$$

Zmenšení činitele drážkové rozptylové vodivosti statoru vlivem nasycení:

$$\Delta \lambda_{d1n} = \frac{h_{01} + 0,58 \cdot h'}{b_{01}} \cdot \frac{\Delta b_{01}}{\Delta b_{01} + 1,5 \cdot b_{01}} = \frac{0,5 + 0,58 \cdot 1,72}{3,5} \cdot \frac{3,285}{3,285 + 1,5 \cdot 3,5} = 0,165 \quad (194)$$

Činitel magnetické vodivosti drážkového rozptylu statoru při nasycení:

$$\lambda_{d1n} = \lambda_{d1} - \Delta\lambda_{d1n} = 1,94 - 0,165 = 1,775 \quad (195)$$

Činitel magnetické vodivosti diferenčního rozptylu statoru při nasycení:

$$\lambda_{dif1n} = \lambda_{dif1} \cdot \kappa_{\delta} = 1,555 \cdot 0,55 = 0,855 \quad (196)$$

Rozptylová reaktance fáze statorového vinutí s uvažováním vlivu nasycení:

$$X_{1\sigma n} = X_{1\sigma} \cdot \frac{\lambda_{d1n} + \lambda_{\xi 1} + \lambda_{dif1n}}{\lambda_{d1} + \lambda_{\xi 1} + \lambda_{dif1}} = 0,383 \cdot \frac{1,775 + 0,85 + 0,855}{1,94 + 0,85 + 1,555} = 0,307 \Omega \quad (197)$$

Dodatečné otevření drážek rotoru:

$$\Delta b_{02} = (t_{d2} - b_{02}) \cdot (1 - \kappa_{\delta}) = (12,5 - 1,5) \cdot (1 - 0,55) = 4,95 \text{ mm} \quad (198)$$

Zmenšení činitele drážkové rozptylové vodivosti rotoru vlivem nasycení:

$$\Delta\lambda_{d2n} = \frac{h_{02}}{b_{02}} \cdot \frac{\Delta b_{02}}{b_{02} + \Delta b_{02}} = \frac{0,7}{1,5} \cdot \frac{4,95}{1,5 + 4,95} = 0,36 \quad (199)$$

Činitel rozptylové drážkové vodivosti rotoru s uvažováním povrchového jevu a nasycení:

$$\lambda_{d2\xi n} = \lambda_{d2\xi} - \Delta\lambda_{d2n} = 1,956 - 0,36 = 1,596 \quad (200)$$

Činitel magnetické vodivosti diferenčního rozptylu rotoru s vlivem nasycení:

$$\lambda_{dif2n} = \lambda_{dif2} \cdot \kappa_{\delta} = 1,638 \cdot 0,55 = 0,901 \quad (201)$$

Přepočtená rozptylová reaktance jedné fáze rotoru s vlivem povrchového jevu a nasycení:

$$X'_{2\sigma\xi n} = X'_{2\sigma} \cdot \frac{\lambda_{d2\xi n} + \lambda_{\xi 2} + \lambda_{dif\ 2n}}{\lambda_{d2} + \lambda_{\xi 2} + \lambda_{dif\ 2}} = 0,44 \cdot \frac{1,596 + 0,47 + 0,901}{3,078 + 0,47 + 1,638} = 0,252 \ \Omega \quad (202)$$

Vzájemná reaktance vinutí statoru a rotoru při spouštění:

$$X_{12n} = X_{12} \cdot \frac{F_m}{U_\delta} = 10,59 \cdot \frac{1447,14}{818,18} = 18,73 \ \Omega \quad (203)$$

Činitel rozptylu při zanedbání odporu  $R_{12}$ :

$$c_{1pn} = 1 + \frac{X_{1\sigma n}}{X_{12n}} = 1 + \frac{0,307}{18,73} = 1,016 \quad (204)$$

Přepočtený rotorový proud:

$$I'_2 = \frac{U_{1N}}{\sqrt{a_p^2 + b_p^2}} = \frac{230}{\sqrt{0,328^2 + 0,563^2}} = 354,4 \ A, \quad (205)$$

kde

$$a_p = R_1 + c_{1pn} \cdot \frac{R'_{2\xi}}{s} = 0,189 + 1,016 \cdot \frac{0,137}{1} = 0,328 \ \Omega, \quad (206)$$

$$b_p = X_{1\sigma n} + c_{1pn} \cdot X'_{2\sigma\xi n} = 0,307 + 1,016 \cdot 0,252 = 0,563 \ \Omega. \quad (207)$$

Statorový proud:

$$I_1 = I'_2 \cdot \frac{\sqrt{a_p^2 + (b_p + X_{12n})^2}}{c_{1pn} \cdot X_{12n}} = 354,4 \cdot \frac{\sqrt{0,328^2 + (0,563 + 18,73)^2}}{1,016 \cdot 18,73} = 359,4 \ A \quad (208)$$

Poměrný záběrný proud:

$$i_z = \frac{I_{1z}}{I_{1N}} = \frac{359,4}{53,564} = 6,71 \quad (209)$$

Poměrný záběrný moment (poměrný spouštěcí moment při  $s = 1$ ):

$$m_z = \left( \frac{I'_{2z}}{I'_{2N}} \right)^2 \cdot \frac{s_N}{s} = \left( \frac{354,4}{46,403} \right)^2 \cdot 1,34 \cdot \frac{0,0224}{1} = 1,75 \quad (210)$$

Vztah	Jednotky	skluz					
		1	0,8	0,5	0,2	0,1	0,16
$\xi$	-	1,8	1,61	1,27	0,8	0,57	0,72
$\varphi$	-	0,6	0,41	0,2	0,04	0,01	0,02
$k_R = S_t/S_R$	-	1,45	1,3	1,14	1,02	1	1
$K_R = 1 + \frac{R_2}{R_t} \cdot (k_R - 1)$	-	1,34	1,23	1,11	1,02	1	1
$R_{2\xi}' = K_R \cdot R_2'$	$\Omega$	0,137	0,125	0,113	0,104	0,102	0,102
$k_d$	-	0,82	0,86	0,93	0,97	0,98	0,97
$K_x = \Sigma\lambda_{2\xi}/\Sigma\lambda_2$	-	0,784	0,796	0,818	0,83	0,834	0,83
$X_{2\sigma\xi}' = K_x \cdot X_{2\sigma}'$	$\Omega$	0,345	0,35	0,36	0,365	0,367	0,365
$X_{2\sigma\xi n}' = X_{2\sigma\xi}' \cdot \Sigma\lambda_{2\xi n}/\Sigma\lambda_2$	$\Omega$	0,252	0,259	0,273	0,297	0,327	0,302
$X_{1\sigma n} = X_{1\sigma} \cdot \Sigma\lambda_{1n}/\Sigma\lambda_1$	$\Omega$	0,307	0,308	0,313	0,331	0,358	0,336
$c_{1pn} = 1 + X_{1\sigma n}/X_{12n}$	-	1,016	1,016	1,017	1,018	1,019	1,018
$a_p = R_1 + c_{1pn} \cdot R_{2\xi}'/s$	$\Omega$	0,328	0,348	0,419	0,718	1,228	0,838
$b_p = X_{1\sigma n} + c_{1pn} \cdot X_{2\sigma\xi n}'$	$\Omega$	0,563	0,571	0,591	0,633	0,691	0,643
$I_2' = \frac{U_{1N}}{\sqrt{a_p^2 + b_p^2}}$	A	354,4	345,4	318,8	241,3	163,9	218,6
$I_1 = I_2' \cdot \frac{\sqrt{a_p^2 + (b_p + X_{12})^2}}{c_{1p} \cdot X_{12n}}$	A	359,4	350,4	323,4	245,2	167,1	222,3
$i_1 = I_1/I_{1N}$	-	6,71	6,54	6,04	4,58	3,12	4,15
$m = \left( \frac{I_2'}{I_{2N}} \right)^2 \cdot K_R \cdot \frac{s_N}{s}$	-	1,75	1,91	2,35	3,09	2,79	3,11

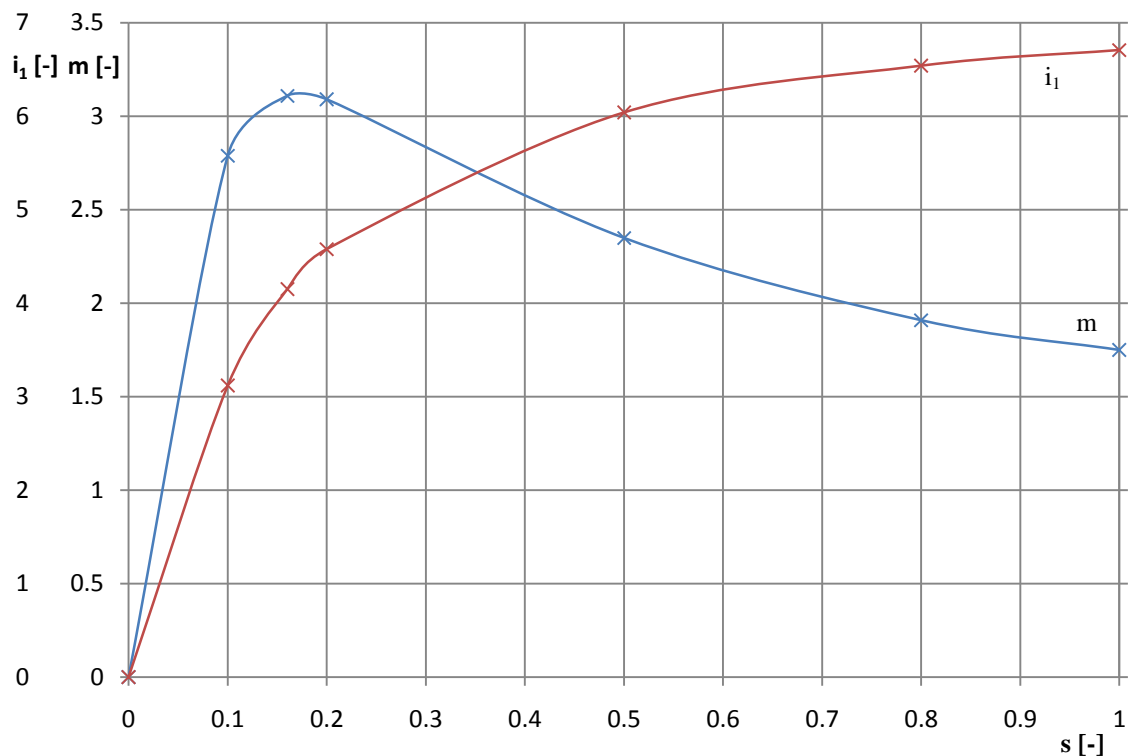
Tab. 2 Výpočet rozběhových charakteristik

Kritický skluz (skluz zvratu):

Určen po výpočtu všech bodů rozběhových charakteristik pro střední hodnoty reaktancí  $X_{1\sigma n}$  a  $X_{2\sigma\xi n}'$  pro skluzy  $s = 0,1$  a  $s = 0,2$ .

$$s_{max} = \frac{R_{2\xi}'}{X_{1\sigma n} + X_{2\sigma\xi n}'} = \frac{0,103}{\frac{0,3445}{1,0185} + 0,312} = 0,16 \quad (211)$$





Obr. 6. Rozběhové charakteristiky

## 1.11 Seznam vypočtených a odečtených hodnot

Název	Značka	Hodnota	Jednotka
Jmenovitý výkon stroje	$P_2$	28	kW
Počet pólových dvojic	$p$	3	-
Synchronní otáčky	$n_1$	1000	Ot · min <sup>-1</sup>
Výška osy stroje	$h$	200	mm
Vnější průměr statoru	$D_e$	0,392	m
Vnitřní průměr statoru	$D$	0,248	m
Pólová rozteč	$t_p$	0,13	m
Vnitřní výkon stroje	$P_i$	33730	VA
Ideální délka vzduchové mezery	$l_i$	0,19	m
Štíhlostní poměr	$\lambda$	1,46	-
Počet drážek statoru	$Q_1$	72	-
Počet drážek na pól a fázi	$q$	4	-
Drážková rozteč statoru	$t_{d1}$	0,0108	m
Jmenovitý proud statoru	$I_{1N}$	50	A
Počet efektivních vodičů v drážce	$V_d$	14	-
Počet paralelních větví	$a$	2	-
Počet závitů ve fázi vinutí	$N_1$	84	-
Lineární proudová hustota	$A$	32300	Am <sup>-1</sup>
Činitel rozlohy	$k_r$	0,958	-
Činitel zkrácení kroku	$k_y$	0,95	-

Činitel vinutí	$k_v$	0,91	-
Magnetický tok	$\Phi$	0,0131	Wb
Magnetická indukce ve vzduchové mezeře	$B_\delta$	0,834	T
Průměr vodiče statorového vinutí	$d_v$	1,32	mm
Průřez vodiče statorového vinutí	$S_v$	1,369	mm <sup>2</sup>
Počet paralelních vodičů	$n_p$	3	-
Průřez efektivního vodiče	$S_{ef}$	4,107	mm <sup>2</sup>
Proudová hustota ve statorovém vinutí	$J_1$	$6,082 \cdot 10^6$	Am <sup>-2</sup>
Šířka zubu statoru	$b_{z1}$	5,31	mm
Výška jha statoru	$h_{j1}$	24,5	mm
Šířka drážky statoru u paty zubu	$b_1$	7,8	mm
Šířka drážky statoru v horní části	$b_2$	5,6	mm
Výška klínové části drážky statoru	$h_k$	1,72	mm
Aktivní hloubka drážky statoru	$h_1$	24,5	mm
Celková hloubka drážky statoru	$h_d$	26,72	mm
Aktivní plocha příčného řezu drážky	$S_d'$	122,8	mm <sup>2</sup>
Činitel plnění drážky	$k_T$	0,729	-
Vzduchová mezera	$\delta$	0,5	mm
Počet drážek rotoru	$Q_2$	62	-
Vnější průměr rotoru	$D_2$	0,247	m
Délka rotoru	$l_2$	0,19	m
Drážková rozteč rotoru	$t_{d2}$	0,0125	m
Vnitřní průměr rotoru	$D_i$	0,08	m
Proud v tyči rotoru	$I_t$	337	A
Příčný průřez tyče rotoru	$S_t$	134,8	mm <sup>2</sup>
Šířka zubu rotoru	$b_{z2}$	0,006	m
Průměr zaoblení horní části drážky rotoru	$b_1$	6,1	mm
Průměr zaoblení dolní části drážky rotoru	$b_2$	3,74	mm
Vzdálenost středů zaoblení	$h_1$	23,3	mm
Celková hloubka drážky rotoru	$h_{d2}$	29,22	mm
Skutečný průřez tyče	$S_t$	134,74	mm <sup>2</sup>
Hustota proudu v tyči	$J_t$	$2,5 \cdot 10^6$	Am <sup>-2</sup>
Proud kruhem nakrátko	$I_{kn}$	1112	A
Rozměry kruhu nakrátko	$a_{kn}$	36,5	mm
	$b_{kn}$	14,3	mm
Průřez kruhu nakrátko	$S_{kn}$	522	mm <sup>2</sup>
Magnetická indukce v zubech statoru	$B_{z1}$	1,749	T
Magnetická indukce v zubech rotoru	$B_{z2}$	1,791	T
Magnetická indukce ve jhu statoru	$B_{j1}$	1,495	T
Magnetická indukce ve jhu rotoru	$B_{j2}$	0,655	T
Carterův činitel	$k_c$	1,234	-
Magnetické napětí vzduchové mezery	$U_\delta$	818,18	A
Magnetické napětí zubů statoru	$U_{z1}$	177,9	A
Magnetické napětí zubů rotoru	$U_{z2}$	242,6	A
Činitel nasycení zubů	$k_z$	1,51	-

Magnetické napětí jha statoru	$U_{j1}$	203,37	A
Magnetické napětí jha rotoru	$U_{j2}$	5,09	A
Výsledné magnetické napětí na jednu pólovou dvojici	$F_m$	1447,14	A
Činitel nasycení magnetického obvodu	$k_\mu$	1,77	-
Magnetizační proud	$I_\mu$	21,04	A
Poměrná hodnota magnetizačního proudu	$i_\mu$	0,42	-
Odpor jedné fáze statorového vinutí	$R_1$	0,189	$\Omega$
Poměrná hodnota odporu statorového vinutí	$r_1$	0,041	-
Odpor fáze rotorového vinutí	$R_2$	$90,5 \cdot 10^{-6}$	$\Omega$
Odpor fáze rotoru přepočtený na stator	$R_2'$	0,102	$\Omega$
Poměrná hodnota odporu rotoru	$r_2'$	0,022	-
Rozptylová reaktance fáze statorového vinutí	$X_{1\sigma}$	0,383	$\Omega$
Poměrná hodnota statorové reaktance	$x_{1\sigma}$	0,083	-
Rozptylová reaktance fáze rotorového vinutí	$X_{2\sigma}$	$0,389 \cdot 10^{-3}$	$\Omega$
Rozptylová reaktance fáze rotoru přepočtená na stator	$X_{2\sigma}'$	0,44	$\Omega$
Poměrná hodnota reaktance rotoru	$x_{2\sigma}'$	0,095	-
Hlavní ztráty v železe	$\Delta P_{Feh}$	524,54	W
Celkové povrchové ztráty ve statoru	$\Delta P_{\delta p1}$	8,18	W
Celkové povrchové ztráty v rotoru	$\Delta P_{\delta p2}$	30,28	W
Pulzní ztráty v zubech statoru	$\Delta P_{p1}$	12,58	W
Pulzní ztráty v zubech rotoru	$\Delta P_{p2}$	192,6	W
Součet dodatečných ztráty v železe	$\Delta P_{Fed}$	243,64	W
Celkové ztráty v železe	$\Delta P_{Fe}$	768,18	W
Jouleovy ztráty ve všech fázích statoru	$\Delta P_{j1}$	1417,5	W
Jouleovy ztráty v klecovém vinutí rotoru	$\Delta P_{j2}$	637,24	W
Mechanické a ventilační ztráty	$\Delta P_{mech}$	125,55	W
Dodatečné ztráty	$\Delta P_d$	153,01	W
Celkové ztráty stroje	$\Delta P$	3101,48	W
Proud naprázdno	$I_0$	21,1	A
Účinitel při chodu naprázdno	$\cos\varphi_0$	0,078	-
Proud nakrátko	$I_k$	264,54	A
Účinitel při chodu nakrátko	$\cos\varphi_k$	0,33	-
Jmenovitý skluz stroje	$s_N$	0,224	-
Účinnost stroje při jmenovitém skluzu	$\eta$	89,3	%
Účinitel při jmenovitém skluzu	$\cos\varphi$	0,845	-
Příkon při jmenovitém skluzu	$P_1$	31,373	kW
Poměrný záběrný proud ( $s = 1$ )	$i_z$	6,71	-
Poměrný záběrný moment ( $s = 1$ )	$m_z$	1,75	-
Kritický skluz	$s_{max}$	0,16	-
Poměrný moment zvratu	$m_{max}$	3,11	-

## 2 Kružnicový diagram

### 2.1 Postup konstrukce kružnicového diagramu

Kružnicový diagram lze sestavit mnoha způsoby. Zvolená metoda spočívá v určení měřítek proudu, výkonu a momentu a následné vynesení úseček z již dříve vypočtených hodnot.

Pro konstrukci je třeba znát několik hodnot:

Proud naprázdno a jeho účinník (úhel):  $I_0 = 21,1 \text{ A}$ ;  $\cos \varphi_0 = 0,078$  ( $\varphi_0 = 85,53^\circ$ )

Proud nakrátko a jeho účinník (úhel):  $I_k = 264,54 \text{ A}$ ;  $\cos \varphi_k = 0,33$  ( $\varphi_k = 70,53^\circ$ )

Odpor statorového vinutí:  $R_1 = 0,189 \Omega$

Odpor rotorového vinutí:  $R_2' = 0,102 \Omega$

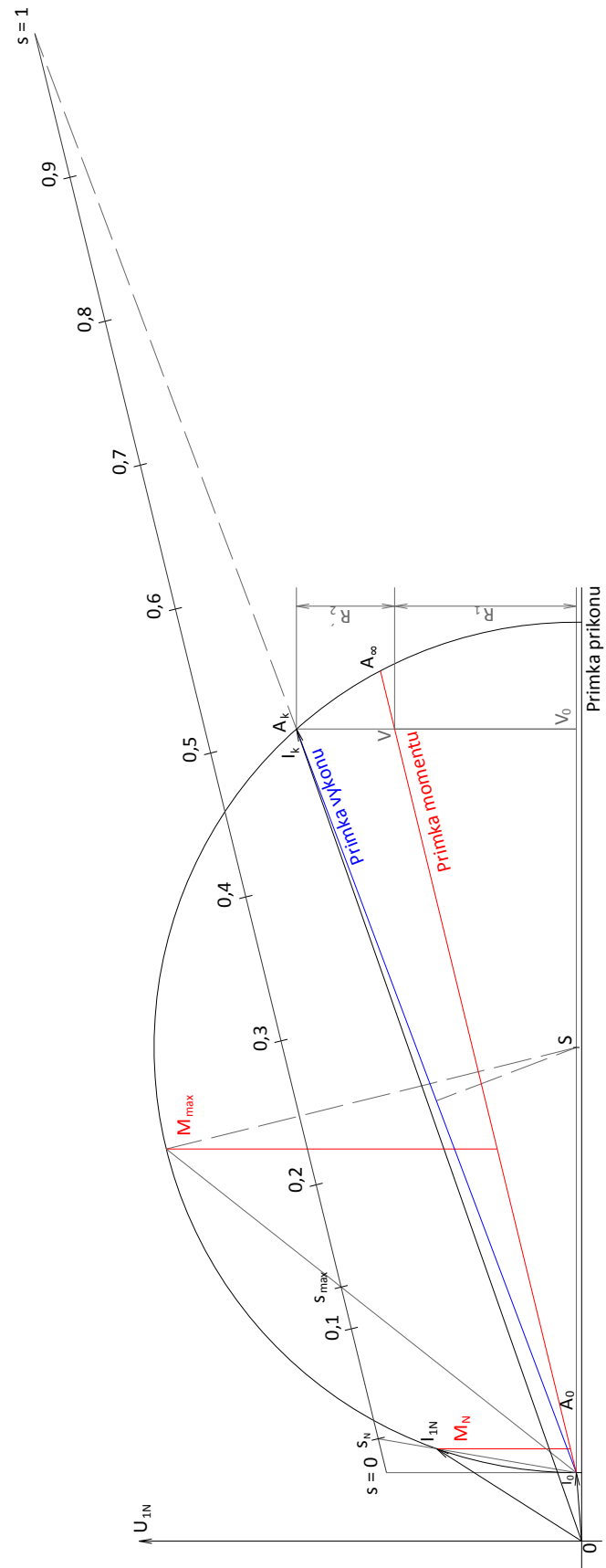
Dle [3] je postup konstrukce:

1. Nejdříve se zvolí měřítko proudu  $m_I$ . Jeho velikost se volí podle velikosti plochy, na kterou chceme kružnicový diagram kreslit. Určí se podle velikosti proudu nakrátko, který je z vypočtených hodnot největší. Vzhledem k tomu, že ke konstrukci byl použit software, tak použité měřítko proudu je:

$$m_I = 1 \text{ A/mm}$$

2. Dále se zvolí rovina, do které budeme kružnicový diagram kreslit. Je to komplexní rovina orientovaná tak, že vodorovná osa je imaginární část (**přímka příkonů**) a svislá osa je reálná část.
3. Do komplexní roviny vyneseme oba proudy (naprázdno  $I_0$  a nakrátko  $I_k$ ) pod příslušným úhlem a v měřítku.
4. Z bodu  $A_0$  vedeme rovnoběžku s **přímkou příkonů**, na které bude ležet střed kružnice  $S$ . Dále ještě bude vytvořena spojnice bodů  $A_0$  a  $A_k$ , která bude tvořit **přímkou výkonů**.

5. V ose **přímky výkonů** vedeme kolmici, která se protne s vodorovnou přímkou vedenou bodem  $A_0$ . Tento průsečík je hledaný střed kružnice  $S$ . Kružnice prochází body  $A_0$  a  $A_k$ .
6. Z bodu  $A_k$  spustíme kolmici k vodorovné přímce vedené bodem  $A_0$  a tím získáme bod  $V_0$ . Takto vzniklou úsečku rozdělíme v poměru odporů  $R_1$  a  $R_2'$ , tím získáme bod  $V$ . V části  $V_0V$  bude poměrná velikost odporu  $R_1$  a v části  $VA_k$  bude poměrná velikost odporu  $R_2'$ .
7. Z bodu  $A_0$  vedeme přímkou procházející bodem  $V$ , která průsečíkem s kružnicí vytvoří bod  $A_\infty$ . Takto vzniklá úsečka se nazývá **přímka momentů**.
8. Nakonec vytvoříme **přímku skluzu**. Tu sestrojíme tak, že prodloužíme **přímku výkonů** a sestrojíme rovnoběžku nad **přímkou výkonů** s **přímkou momentů** až do vzdálenosti, kde se tyto přímky protnou. V tomto průsečíku vzniká bod, který odpovídá skluzu  $s = 1$ . Bod odpovídající skluzu  $s = 0$  dostaneme tak, že v bodě  $A_0$  sestrojíme tečnu ke kružnici a kde se tato tečna protne s **přímkou skluzu**, je právě hledaný bod odpovídající skluzu  $s = 0$ .



Obr. 7. Kružnicový diagram asynchronního motoru

## 2.2 Postup konstrukce momentové charakteristiky

Momentová charakteristika je závislost točivého momentu stroje na skluzu (popř. otáčkách).

Dle [3] je postup konstrukce:

1. Na vodorovnou osu charakteristiky budeme vynášet skluz a na svislou osu příslušný točivý moment  $M$ .
2. Velikost příslušného momentu zjistíme z kružnicového diagramu tak, že vedeme úsečku z bodu  $A_0$  k příslušnému skluzu na *přímce skluzu*. Tam, kde se úsečka protne kružnicí (obecný bod  $A$ ), spustíme kolmici s *přímkou příkonů* až k *přímce momentů*. Velikost úsečky od bodu  $A$  k *přímce momentů* vynásobíme měřítkem momentů a tak získáme příslušný moment.

Měřítko momentů

$$m_M = \frac{m_P}{\omega_s} = \frac{692,8}{105} = 6,6 \text{ Nm/mm}, \quad (212)$$

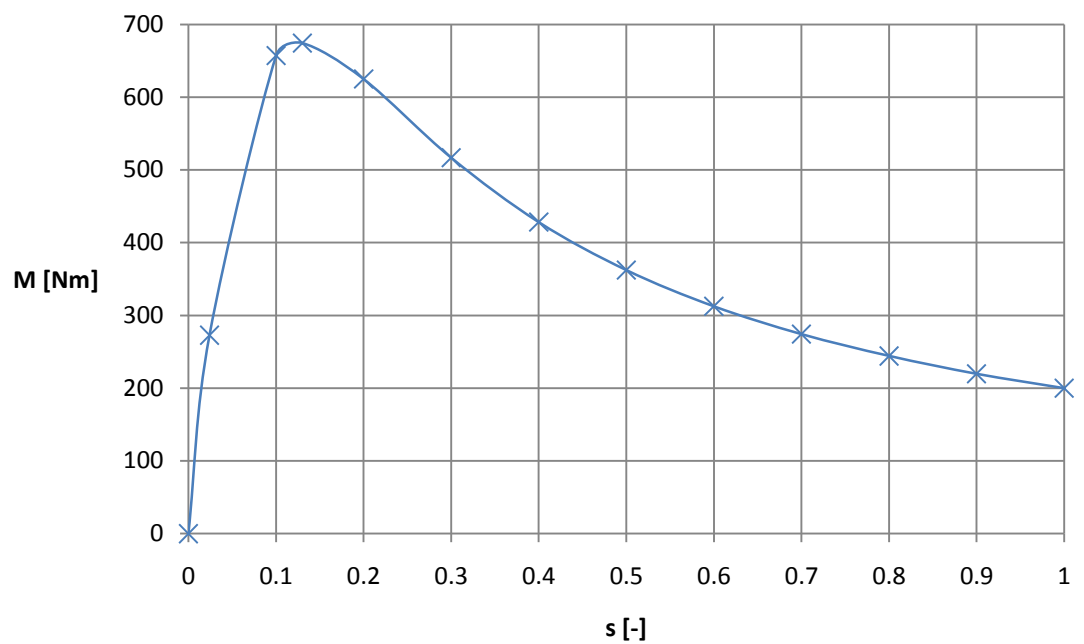
kde  $m_P$  je měřítko momentů a  $\omega_s$  je úhlová synchronní rychlost.

$$m_P = 3 \cdot U_{1N} \cdot m_I = 3 \cdot 230 \cdot 1 = 690 \text{ W/mm} \quad (213)$$

$$\omega_s = \frac{\pi \cdot n_s}{30} = \frac{\pi \cdot 1000}{30} = 105 \text{ rad/s} \quad (214)$$

s [-]	M [Nm]
0	0
<b>0,024</b>	<b>272,8</b>
0,1	657,2
<b>0,13</b>	<b>674,4</b>
0,2	625,1
0,3	516,7
0,4	428,3
0,5	362,3
0,6	312,6
0,7	274,4
0,8	244,2
0,9	219,9
<b>1</b>	<b>199,9</b>

Tab. 1. Odečtený moment k příslušnému skluzu



Obr. 8. Momentová charakteristika odečtená z kružnicového diagramu (pro motorický režim)



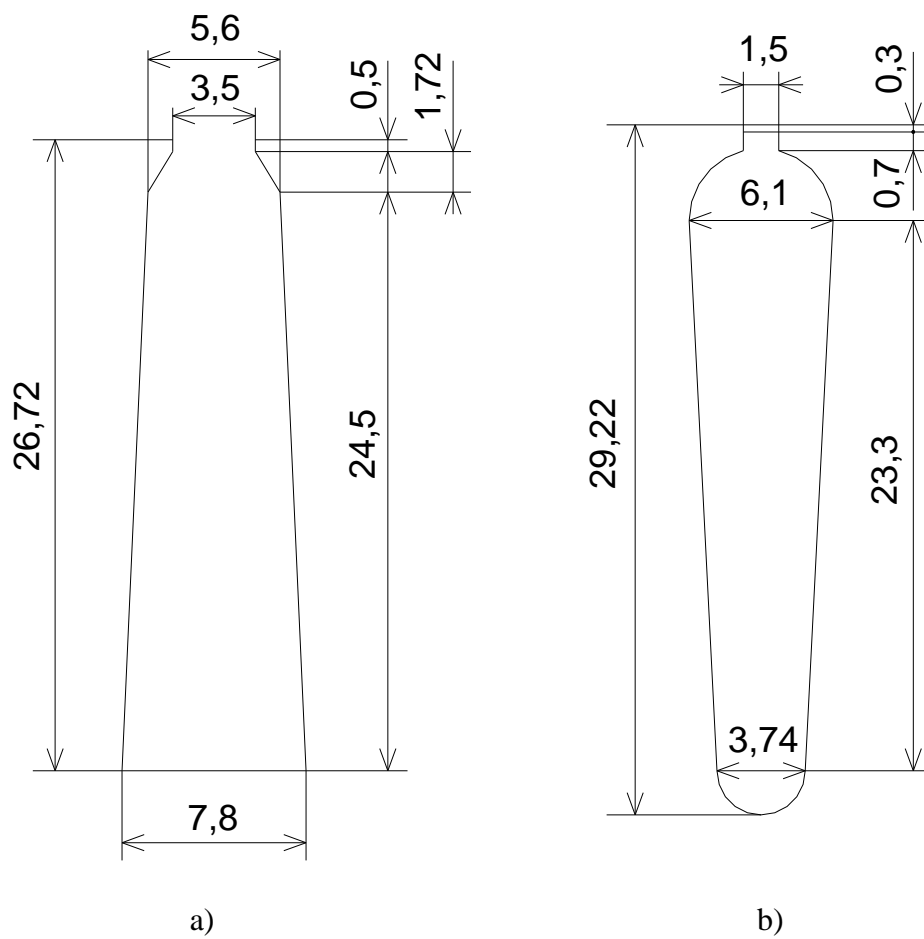
## Závěr

Obsahem bakalářské práce bylo navrhnout asynchronní motor s kotvou nakrátko o výkonu 28 kW. Návrh obsahuje výpočet rozměrů statoru a rotoru, výpočet odporů a reaktancí a ztrát. Z vypočtených hodnot byly sestrojeny rozběhové a zatěžovací charakteristiky. Během návrhu je řada kontrolních výpočtů, které musí ležet v určitém rozmezí a pokud tomu tak není je třeba část návrhu opakovat pro jiné hodnoty. V práci bylo potřeba několikrát upravovat hodnoty, aby se s kontrolním výpočtem dosáhlo mezního rozsahu. Proto je tento způsob návrhu značně časově náročný.

Dále bylo součástí zadání sestrojít z vypočtených hodnot kružnicový diagram a z něho odečíst momentovou charakteristiku. Momentová charakteristika získaná z rozběhových charakteristik se nepatrně liší od momentové charakteristiky získané z kružnicového diagramu a to hlavně ve velikosti záběrného momentu. Tato odlišnost je způsobena hlavně tím, že v kružnicovém diagramu není brán ohled na vliv povrchového jevu při vysokých hodnotách skluzu, a proto vzniká nepřesnost ve velikosti záběrného momentu. Jmenovitý moment stroje odečtený z kružnicového diagramu je  $M_N = 272,8 \text{ Nm}$ , při jmenovitém skluzu  $s_N = 0,024$  a jmenovitém proudu  $I_N = 53 \text{ A}$ . Při jmenovitém chodu je příkon stroje  $P_1 = 30,943 \text{ kW}$ , při účinnosti  $\eta = 0,9$  a účinníku  $\cos \varphi = 0,848$ . Z rozběhových charakteristik je poměrný maximální moment  $m_{\max} = 3,09$ , což je velmi vysoká hodnota. A jak ukázal kružnicový diagram, tak maximální moment je o něco nižší než trojnásobek jmenovitého momentu  $M_{\max} = 674,4 \text{ Nm}$ . Záběrný moment odečtený z kružnicového diagramu je  $M_z = 199,9 \text{ Nm}$ , ovšem podle rozběhových charakteristik bude tento moment vyšší a poměrný záběrný proud je  $i_z = 6,71$ , což je velmi vysoká hodnota a pro takovýto motor bude třeba použít nějakou spouštěcí metodu, která omezí tento proud. V poslední řadě je v příloze nákres statorové a rotorové drážky s rozměry.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] Wikipedie: Otevřená encyklopedie. *Asynchronní motor*. [online]. [cit. 2013-05-25]. Dostupné z: <[http://cs.wikipedia.org/wiki/Asynchronní\\_motor](http://cs.wikipedia.org/wiki/Asynchronní_motor)>.
- [2] KOPYLOV, I. P., a kol. *Stavba elektrických strojů*. SNTL, Praha, 1988, 688 s. ISBN 04-532-88.
- [3] DUPAL, Petr. *Návrh asynchronního motoru s kotvou nakrátko*. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni, 2011.

**Přílohy**

Obr. 9. Nákres a) statorové drážky b) rotorové drážky