

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY
A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Návrh asynchronního motoru s klecí nakrátko

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jan PŘIKRYL**
Osobní číslo: **E09B0077P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Název tématu: **Návrh asynchronního motoru s klecí nakrátko**
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Provedte elektromagnetický návrh asynchronního motoru s klecí nakrátko s parametry:
 $P = 15 \text{ kW}$, $U = 400 \text{ V}$, $2p = 4$, $m = 3$, IP23, $f=50 \text{ Hz}$.
2. Nakreslete schématicky podélný a příčný řez stroje.
3. Popište vinutí statoru a nakreslete v měřítku řez drážky statorového vinutí i klece nakrátko.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

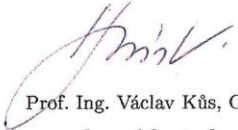
1. I.P.Kopylov: Stavba elektrických strojů

Vedoucí bakalářské práce: **Doc. Ing. Josef Červený, CSc.**
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: **17. října 2011**
Termín odevzdání bakalářské práce: **3. června 2012**


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




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na návrh třífázového asynchronního stroje s klecí nakrátko. Cílem této práce je vypracování postupu návrhu motoru o středním výkonu 15 kW. Návrh obsahuje výpočet hlavních rozměrů stroje, návrh magnetického obvodu, parametry statorového a rotorového vinutí, ztráty, účinnost, rozběhové a zatěžovací charakteristiky, tepelný výpočet a popis statorového vinutí.

Klíčová slova

Třífázový asynchronní motor, návrh motoru, stator, rotor, vinutí, klec nakrátko, magnetický obvod, odpor, reaktance, ztráty, účinnost, zatěžovací charakteristika, rozběhová charakteristika, oteplení.

Abstract

The master theses presents design three-phase asynchronous motor with squirrel cage. The aim of this project is to develop workflow of design engine with a middle power of 15 kW. The design includes the calculation of the main machine measures, design of magnetic circuit, parameters of the stator and rotor windings, losses, efficiency, starting and load characteristics, thermal calculation and description of the stator winding.

Key words

Three-phase asynchronous motor, engine design, stator, rotor, windings, squirrel cage, magnetic circuit, resistance, reactance, losses, efficiency, load characteristic, starting characteristic, temperature rise.

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.

V Plzni dne 5.6.2012

Jan Příkryl

.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Josefovi Červenému, CSc. za cenné rady, připomínky a vedení práce.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	9
1 ZADANÉ PARAMETRY NAVRHOVANÉHO STROJE	10
2 VOLBA HLAVNÍCH ROZMĚRŮ	10
3 POČET DRÁŽEK, POČET ZÁVITŮ A PRŮŘEZ VODIČE STATOROVÉHO VINUTÍ	11
4 ROZMĚRY DRÁŽEK A ZUBŮ STATORU	13
5 VÝPOČET ROTORU	14
6 PARAMETRY MAGNETICKÉHO OBVODU	16
7 VÝPOČET ODPORŮ A REAKTANCÍ	18
7.1 ODPOR STATORU	18
7.2 ODPOR ROTORU.....	19
7.3 ROZPTYLOVÁ REAKTANCE STATORU.....	19
7.4 ROZPTYLOVÁ REAKTANCE ROTORU	20
8 VÝPOČET ZTRÁT	21
9 VÝPOČET ZATĚŽOVACÍCH CHARAKTERISTIK	23
10 VÝPOČET ROZBĚHOVÝCH CHARAKTERISTIK	25
11 TEPELNÝ VÝPOČET	29
12 SCHEMATICKÝ PODÉLNÝ A PŘÍČNÝ ŘEZ STROJE	32
13 POPIS STATOROVÉHO VINUTÍ	33
ZÁVĚR	34
SEZNAM LITERATURY	35
PŘÍLOHY	36

Úvod

Bakalářská práce je zaměřena na návrh asynchronního motoru s klecí nakrátko o středním výkonu 15 kW. Problematika návrhu točivých strojů je velice rozsáhlá. Práce je zaměřena pouze na jeden typ elektromotoru, a to asynchronního. Tento motor je pro své nesporné výhody nejpoužívanějším elektromotorem vůbec, a proto je třeba, abychom se problematikou stavby strojů a jejich návrhem zabývali.

Práce je rozdělena do několika částí, z nichž největší část je věnována samotnému návrhu a výpočtům tohoto stroje. V dalších částech je rozvinuté schéma a popis statorového vinutí a schematický řez stroje.

1 Zadané parametry navrhovaného stroje

$$P = 15 \text{ kW}$$

$$U = 400 \text{ V}$$

$$2p = 4$$

$$m = 3$$

$$f = 50 \text{ Hz}$$

krytí IP23

2 Volba hlavních rozměrů

Návrh asynchronního motoru začíná volbou hlavních rozměrů stroje. Jedná se o vnitřní průměr statoru D a o ideální délku vzduchové mezery l_i , které jsou vázány s výkonem, úhlovou rychlostí a elektromagnetickým zatížením [1].

$$\frac{D^2 l_i \omega_s}{P_i} = \frac{2}{\pi \alpha_\delta k_B k_v A B_\delta} \quad 1$$

Předběžná výška osy určená podle obr. 6.7b [1] $h = 180 \text{ mm}$. Z tab. 6.6 [1] volím výšku osy $h = 160 \text{ mm}$ a pro tuto výšku je v této tabulce dán vnější průměr statoru $D_e = 0,272 \text{ m}$.

Vnitřní průměr statoru

$$D = K_D D_e = 0,67 \cdot 0,272 = 0,182 \text{ m} \quad 2$$

kde koeficient $K_D = 0,67$ je volený z tab. 6.7 [1].

Pólová rozteč

$$t_p = \frac{\pi D}{2p} = \frac{\pi \cdot 0,182}{4} = 0,143 \text{ m} \quad 3$$

Vnitřní výpočtový výkon

$$P_i = mIU_i = P_2 \frac{k_E}{\eta \cos \varphi} = 15 \cdot 10^3 \cdot \frac{0,972}{0,86 \cdot 0,84} = 20 183 \text{ VA} \quad 4$$

kde $k_E = 0,972$ (obr. 6.8 [1]) je poměr indukovaného napětí vinutí statoru k jmenovitému napětí. Výkon na hřídeli motoru $P_2 = P = 15 \text{ kW}$. Účinnost $\eta = 0,86$ a účinník $\cos \varphi = 0,84$ jsou voleny z obr. 6.10 [1].

Činitel pólového krytí $\alpha_\delta = 2/\pi$, činitel tvaru pole $k_B = \pi/2\sqrt{2} = 1,11$ [1].

Předběžná hodnota činitele statorového vinutí se pro jednovrstvá vinutí volí v rozmezí 0,95 až 0,96 [1]. Volím $k_{vI} = 0,96$.

Předběžné hodnoty elektromagnetického zatížení se volí z obr. 6.12a [1]. Lineární hustota proudu $A = 40 \cdot 10^3 \text{ A/m}$, indukce ve vzduchové mezeře $B_\delta = 0,785 \text{ T}$.

Synchronní úhlová rychlost hřídele motoru

$$\omega_s = 2\pi \frac{f_1}{p} = 2\pi \frac{50}{2} = 157 \text{ rad/s} \quad 5$$

S respektováním činitele α_δ je ideální délka vzduchové mezery ze vztahu 1

$$l_i = \frac{P_i}{D^2 \omega_s k_B k_{v1} A B_\delta} = \frac{20183}{0,272^2 \cdot 157 \cdot 1,11 \cdot 0,96 \cdot 40 \cdot 10^3 \cdot 0,785} = 0,116 \text{ m} \quad 6$$

Štíhlostní poměr

$$\lambda = \frac{l_i}{t_p} = \frac{0,116}{0,143} = 0,81 \quad 7$$

Hodnota štíhlostního poměru leží v doporučeném rozmezí z obr. 6.14b [1].

3 Počet drážek, počet závitů a průřez vodiče statorového vinutí

Minimální a maximální hodnota drážkové rozteče $t_{d1min} = 11 \text{ mm}$ a $t_{d1max} = 13 \text{ mm}$ se získá z obr. 6.15 [1], v němž pro daný motor určuje hodnoty oblast 2.

Rozmezí počtu statorových drážek

$$Q_{1min} \text{ až } Q_{1max} = \frac{\pi D}{t_{d1max}} \text{ až } \frac{\pi D}{t_{d1min}} = \frac{\pi \cdot 182}{13} \text{ až } \frac{\pi \cdot 182}{11} = 44 \text{ až } 52 \quad 8$$

Volím počet drážek $Q_1 = 48$ (jednovrstvé vinutí).

Počet drážek statoru na pól a fázi

$$q = \frac{Q_1}{2pm} = \frac{48}{4 \cdot 3} = 4 \quad 9$$

Konečná hodnota drážkové rozteče

$$t_{d1} = \frac{\pi D}{2pmq} = \frac{\pi \cdot 182}{4 \cdot 3 \cdot 4} = 11,9 \text{ mm} \quad 10$$

Jmenovitý proud vinutí statoru

$$I_{1N} = \frac{P_2}{mU_N \eta \cos \varphi} = \frac{15 \cdot 10^3}{3 \cdot 230 \cdot 0,86 \cdot 0,84} = 30 \text{ A} \quad 11$$

Předběžný počet efektivních vodičů v drážce

$$V'_d = \frac{\pi D A}{I_{1N} Q_1} = \frac{\pi \cdot 0,182 \cdot 40 \cdot 10^3}{30 \cdot 48} = 15,92 \quad 12$$

Konečný počet efektivních vodičů v drážce při počtu paralelních větví $a = 2$

$$V_d = aV'_d = 2 \cdot 15,92 = 31,84 \doteq 32 \quad 13$$

Konečný počet vodičů ve fázi vinutí

$$N_1 = \frac{V_d Q_1}{2am} = \frac{32 \cdot 48}{2 \cdot 2 \cdot 3} = 128 \quad 14$$

Konečná lineární hustota proudu

$$A = \frac{2mN_1 I_{1N}}{\pi D} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 128 \cdot 30}{\pi \cdot 0,182} = 40,2 \cdot 10^3 \text{ A/m} \quad 15$$

Konečný činitel statorového vinutí

$$k_{v1} = k_r k_y = 0,958 \cdot 1 = 0,958 \quad 16$$

kde pro jednovrstvé vinutí je činitel zkrácení kroku $k_y = 1$ a činitel rozlohy $k_r = 0,958$ (tab. 3.13) [1].

Magnetický tok

$$\Phi = \frac{k_E U_{1N}}{4k_B N_1 f_1 k_{v1}} = \frac{0,972 \cdot 230}{4 \cdot 1,11 \cdot 128 \cdot 50 \cdot 0,958} = 8,25 \cdot 10^{-3} \text{ Wb} \quad 17$$

Konečná hodnota magnetické indukce ve vzduchové mezeře

$$B_\delta = \frac{p\Phi}{Dl_i} = \frac{2 \cdot 8,25 \cdot 10^{-3}}{0,182 \cdot 0,116} = 0,783 \text{ T} \quad 18$$

Hodnoty A a B_δ leží v doporučeném rozmezí (obr. 6.12a [1]).

Předběžná hustota proudu ve statorovém vinutí

$$J_1 = \frac{(AJ)}{A} = \frac{282 \cdot 10^9}{40,2 \cdot 10^3} = 7,01 \cdot 10^6 \text{ Am}^{-2} \quad 19$$

kde AJ-kritérium $(AJ) = 282 \cdot 10^9 \text{ A}^2\text{m}^{-3}$ (obr. 6.16d [1]).

Průřez efektivního vodiče

$$S_{ef1} = \frac{I_{1N}}{aJ_1} = \frac{30}{2 \cdot 7,01 \cdot 10^6} = 2,136 \text{ mm}^2 \quad 20$$

Pro vsypávaná vinutí se používají dráty do průměru maximálně 1,4 mm [1], proto volím počet dílčích vodičů $n_p = 2$ a průřez dílčího vodiče je pak

$$S_v = \frac{S_{ef1}}{n_p} = \frac{2,136}{2} = 1,068 \text{ mm}^2 \quad 21$$

Z tab. D3.1 volím dílčí vodič s průřezem $S_v = 1,094 \text{ mm}^2$, průměr vodiče $d_v = 1,18 \text{ mm}$, průměr vodiče izolovaného tereftalátovým lakem $d_{vi} = 1,275 \text{ mm}$.

Skutečná hustota proudu ve statorovém vinutí

$$J_1 = \frac{I_{1N}}{aS_v n_p} = \frac{30}{2 \cdot 1,094 \cdot 10^{-6} \cdot 2} = 6,85 \cdot 10^6 \text{ Am}^{-2} \quad 22$$

4 Rozměry drážek a zubů statoru

Volím drážku typu L (obr. 6.19a [1]), šířka zubu je po celé výšce stejná.

Předběžná magnetická indukce ve jhu a zubech statoru je podle tab.6.10 [1] $B_{j1} = 1,65 \text{ T}$ a $B_{z1} = 2 \text{ T}$. Průřez drážky je uveden v příloze A.

Výška jha statoru

$$h_{j1} = \frac{\Phi}{2B_{j1} l_{Fe1} k_{Fe}} = \frac{8,25 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 1,65 \cdot 0,116 \cdot 0,97} = 22,3 \text{ mm} \quad 23$$

kde činitel plnění železa $k_{Fe} = 0,97$ (tab.6.11 [1]) a pro asynchronní motory bez radiálních ventilačních kanálů $l_{Fe} = l_i = l_1$.

Šířka zubu statoru

$$b_{z1} = \frac{B_{\delta} t_{d1} l_i}{B_{z1} l_{Fe1} k_{Fe}} = \frac{0,783 \cdot 0,0119 \cdot 0,116}{2 \cdot 0,116 \cdot 0,97} = 4,8 \text{ mm} \quad 24$$

Hloubka drážky statoru

$$h_d = \frac{D_e - D}{2} - h_{j1} = \frac{272 - 182}{2} - 22,3 = 22,7 \text{ mm} \quad 25$$

Šířka drážky u paty zubu

$$b_1 = \frac{\pi(D + 2h_d)}{Q_1} - b_{z1} = \frac{\pi(182 + 2 \cdot 22,7)}{48} - 4,8 = 10 \text{ mm} \quad 26$$

Šířka drážky v horní části při $\beta = 45^\circ$

$$b_2 = \frac{\pi(D + 2h_0 - b_0) - Q_1 b_{z1}}{Q_1 - \pi} = \frac{\pi(182 + 2 \cdot 0,5 - 3,5) - 48 \cdot 4,8}{48 - \pi} = 7,4 \text{ mm} \quad 27$$

kde otevření drážky $b_0 = 3,5 \text{ mm}$ a $h_0 = 0,5$ (tab. D4.1c [1]).

Výška klínové části drážky při $\beta = 45^\circ$

$$h_k = \frac{b_2 - b_0}{2} = \frac{7,4 - 3,5}{2} = 2 \text{ mm} \quad 28$$

Aktivní hloubka drážky

$$h_1 = h_d - (h_0 + h_k) = 22,7 - (0,5 + 2) = 20,2 \quad 29$$

Světlost drážky

$$b'_1 = b_1 - \Delta b_d = 10 - 0,2 = 9,8 \text{ mm} \quad 30$$

$$b'_2 = b_2 - \Delta b_d = 7,4 - 0,2 = 7,2 \text{ mm} \quad 31$$

$$h'_1 = h_1 - \Delta h_d = 20,2 - 0,2 = 20 \text{ mm} \quad 32$$

Plocha drážkové izolace

$$S_i = b_i (2h_d + b_1 + b_2) = 0,4(2 \cdot 22,7 + 10 + 7,4) = 25 \text{ mm}^2 \quad 33$$

kde jednostranná tloušťka izolace $b_i = 0,4 \text{ mm}$ je uvedena v tab. 3.8 [1].

Aktivní plocha příčného řezu drážky

$$S'_d = \frac{b'_1 + b'_2}{2} h'_1 - S_i = \frac{9,8 + 7,2}{2} \cdot 20 - 25 = 145 \text{ mm}^2 \quad 34$$

Činitel plnění drážky

$$k_T = \frac{d_{vi}^2 V_d n_p}{S'_d} = \frac{1,275^2 \cdot 32 \cdot 2}{145} = 0,719 \quad 35$$

Hodnoty činitelů plnění drážky jsou uvedeny v tab. 3.12 [1]. Vypočtená hodnota vyhovuje.

5 Výpočet rotoru

Volba vzduchové mezery

$$\delta = (0,3 + 1,5D)10^{-3} = (0,3 + 1,5 \cdot 0,182) \cdot 10^{-3} = 0,432 \text{ mm} \doteq 0,45 \text{ mm} \quad 36$$

Počet drážek rotoru volím dle tab.6.12 [1] $Q_2 = 38$.

Vnější průměr rotoru

$$D_2 = D - 2\delta = 182 - 2 \cdot 0,45 = 181,1 \text{ mm} \quad 37$$

Délka rotoru $l_2 = l_1 = 116 \text{ mm}$.

Drážková rozteč

$$t_{d2} = \frac{\pi D_2}{Q_2} = \frac{\pi \cdot 0,1811}{38} = 15 \text{ mm} \quad 38$$

Vnitřní průměr rotoru (průměr hřídele)

$$D_i = D_h = k_h D_e = 0,23 \cdot 0,272 = 63 \text{ mm} \quad 39$$

kde činitel $k_h = 0,23$ (tab. 6.16 [1]).

Činitel přepočtu proudů

$$p_i = \frac{2m_1 N_1 k_{v1}}{Q_2} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 128 \cdot 0,958}{38} = 19,36 \quad 40$$

Proud v tyči rotorového vinutí

$$I_t = k_i I_{1N} p_i = 0,88 \cdot 30 \cdot 19,36 = 511 \text{ A} \quad 41$$

kde činitel $k_i = 0,88$ z obr. 6.22 [1].

Hustota proudu v hliníkových tyčích rotoru se volí u zavřených strojů v rozmezí $(2,5 \text{ až } 3,5) \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$, u otevřených strojů o 10 – 15% větší [1]. Volím přeběžnou hustotu proudu $J_2 = 3,5 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$, potom předběžný příčný průřez tyče

$$S_t = \frac{I_t}{J_2} = \frac{511}{3,5 \cdot 10^6} = 146 \text{ mm}^2 \quad 42$$

V motorech s výškou osy 160 až 250 mm se používají zavřené drážky typu V (obr. 6.27 [1]) s rozměry $b_0 = 1,5 \text{ mm}$, $h_0 = 0,7 \text{ mm}$, $h_0' = 0,3 \text{ mm}$ [1]. Průřez drážky je uveden v příloze A.

Dovolená šířka zubu

$$b_{z2} = \frac{B_{\delta} t_{d2} l_i}{B_{z2} l_{Fe2} k_{Fe}} = \frac{0,783 \cdot 0,015 \cdot 0,116}{1,8 \cdot 0,116 \cdot 0,97} = 6,7 \text{ mm} \quad 43$$

kde $B_{z2} = 1,8 \text{ T}$ (tab. 6.10 [1]).

Rozměry drážky

$$b_1 = \frac{\pi(D_2 - 2h_0 - 2h_0') - Q_2 b_{z2}}{\pi + Q_2} = \frac{\pi(0181,1 - 2 \cdot 0,7 - 2 \cdot 0,3) - 38 \cdot 6,7}{\pi + 38} = 7,5 \text{ mm} \quad 44$$

$$b_2 = \sqrt{\frac{b_1^2 \left(\frac{Q_2}{\pi} + \frac{\pi}{2}\right) - 4S_t}{\frac{Q_2}{\pi} - \frac{\pi}{2}}} = \sqrt{\frac{7,5^2 \cdot \left(\frac{38}{\pi} + \frac{\pi}{2}\right) - 4 \cdot 146}{\frac{38}{\pi} - \frac{\pi}{2}}} = 4,2 \text{ mm} \quad 45$$

$$h_1 = (b_1 - b_2) \frac{Q_2}{2\pi} = (7,5 - 4,2) \cdot \frac{38}{2\pi} = 20,1 \text{ mm} \quad 46$$

Celková hloubka drážky

$$h_{d2} = h_0' + h_0 + \frac{b_1}{2} + h_1 + \frac{b_2}{2} = 0,3 + 0,7 + \frac{7,5}{2} + 20,1 + \frac{4,2}{2} = 26,9 \text{ mm} \quad 47$$

Konečný průřez tyče

$$S_t = \frac{\pi}{8} (b_1^2 + b_2^2) + \frac{1}{2} (b_1 + b_2) h_1 = \frac{\pi}{8} (7,5^2 + 4,2^2) + \frac{1}{2} (7,5 + 4,2) \cdot 20,1 = 146 \text{ mm}^2 \quad 48$$

Konečná hustota proudu v tyči

$$J_t = \frac{I_t}{S_t} = \frac{511}{146 \cdot 10^{-6}} = 3,5 \cdot 10^6 \text{ Am}^{-2} \quad 49$$

Proud v kruhu nakrátko

$$I_{kn} = \frac{I_t}{\Delta} = \frac{511}{0,329} = 1551 \text{ A} \quad 50$$

kde

$$\Delta = 2 \sin \frac{\pi p}{Q_2} = 2 \sin \frac{\pi \cdot 2}{38} = 0,329 \quad 51$$

Hustota proudu v kruhu nakrátko

$$J_{kn} = 0,85 J_t = 0,85 \cdot 3,5 \cdot 10^6 = 2,975 \cdot 10^6 \text{ Am}^{-2} \quad 52$$

Průřez kruhu nakrátko

$$S'_{kn} = \frac{I_{kn}}{J_{kn}} = \frac{1551}{2,975 \cdot 10^6} = 521 \text{ mm}^2 \quad 53$$

Rozměry kruhů nakrátko (znázorněny na obr. 6.26b [1])

$$a_{kn} = 1,25 h_d = 1,25 \cdot 26,9 = 33,6 \text{ mm} \quad 54$$

$$b_{kn} = \frac{S'_{kn}}{a_{kn}} = \frac{521}{34} = 15,5 \text{ mm} \quad 55$$

$$S_{kn} = a_{kn} b_{kn} = 33,6 \cdot 15,5 = 521 \text{ mm}^2 \quad 56$$

$$D_{kn} = D_2 - a_{kn} = 181,1 - 33,6 = 147,5 \text{ mm} \quad 57$$

6 Parametry magnetického obvodu

Magnetická indukce v zubech statoru a rotoru

$$B_{z1} = \frac{B_\delta t_{d1} l_i}{b_{z1} l_{Fe1} k_{Fe}} = \frac{0,783 \cdot 11,9 \cdot 10^{-3} \cdot 0,116}{4,8 \cdot 10^{-3} \cdot 0,116 \cdot 0,97} = 2 \text{ T} \quad 58$$

$$B_{z2} = \frac{B_\delta t_{d2} l_i}{b_{z2} l_{Fe2} k_{Fe}} = \frac{0,783 \cdot 15 \cdot 10^{-3} \cdot 0,116}{6,7 \cdot 10^{-3} \cdot 0,116 \cdot 0,97} = 1,8 \text{ T} \quad 59$$

Magnetická indukce ve jhu statoru a rotoru

$$B_{j1} = \frac{\Phi}{2 h'_{j1} l_{Fe1} k_{Fe}} = \frac{8,25 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 22,3 \cdot 10^{-3} \cdot 0,116 \cdot 0,97} = 1,65 \text{ T} \quad 60$$

kde výpočtová výška statorového jha $h'_{j1} = h_{j1}$.

$$B_{j2} = \frac{\Phi}{2 h'_{j2} l_{Fe2} k_{Fe}} = \frac{8,25 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 40 \cdot 10^{-3} \cdot 0,116 \cdot 0,97} = 0,923 \text{ T} \quad 61$$

kde výpočtová výška rotorového jha

$$h'_{j2} = \frac{2+p}{3,2p} \left(\frac{D_2}{2} - h_{d2} \right) = \frac{2+2}{3,2 \cdot 2} \cdot \left(\frac{181}{2} - 26,9 \right) = 40 \text{ mm} \quad 62$$

Činitel vzduchové mezery (Carterův činitel)

$$k_c = \frac{t_{d1}}{t_{d1} - \gamma \delta} = \frac{11,9}{11,9 - 4,73 \cdot 0,45} = 1,217 \quad 63$$

kde

$$\gamma = \frac{\left(\frac{b_{01}}{\delta} \right)^2}{5 + \left(\frac{b_{01}}{\delta} \right)} = \frac{\left(\frac{3,5}{0,45} \right)^2}{5 + \left(\frac{3,5}{0,45} \right)} = 4,73 \quad 64$$

Magnetické napětí vzduchové mezery

$$U_\delta = \frac{2}{\mu_0} B_\delta \delta k_c = \frac{2}{4\pi \cdot 10^{-7}} \cdot 0,783 \cdot 0,45 \cdot 10^{-3} \cdot 1,217 = 682 \text{ A} \quad 65$$

Pro ocel 2013 je z tab. D2.7 [1] $H_{z1} = 3320 \text{ A/m}$, $H_{z2} = 1520 \text{ A/m}$, potom magnetická napětí zubů statoru a rotoru jsou

$$U_{z1} = 2h_{z1}H_{z1} = 2 \cdot 22,6 \cdot 10^{-3} \cdot 3320 = 150 \text{ A} \quad 66$$

$$U_{z2} = 2h_{z2}H_{z2} = 2 \cdot 26,5 \cdot 10^{-3} \cdot 1520 = 81 \text{ A} \quad 67$$

kde výpočtová výška zubu statoru a rotoru je $h_{z1} = h_{d1} = 22,6 \text{ mm}$ a $h_{z2} = h_{d2} - 0,1b_2 = 26,9 - 0,1 \cdot 4 = 26,5 \text{ mm}$.

Činitel nasycení zubů

$$k_z = 1 + \frac{U_{z1} + U_{z2}}{U_\delta} = 1 + \frac{150 + 81}{682} = 1,34 \quad 68$$

a vyhovuje tedy doporučenému rozmezí 1,2 až 1,5.

Střední délka indukční čáry ve jhu statoru a rotoru

$$L_{j1} = \frac{\pi(D_e - h_{j1})}{2p} = \frac{\pi(272 - 22,3)}{4} = 196,1 \text{ mm} \quad 69$$

$$L_{j2} = \frac{\pi(D_h - h_{j2})}{2p} = \frac{\pi(63 - 33,7)}{4} = 73,6 \text{ mm} \quad 70$$

kde

$$h_{j2} = \frac{D_2 - D_i}{2} - h_{d2} = \frac{181,1 - 63}{2} - 26,9 = 33,7 \text{ mm} \quad 71$$

Pro ocel 2013 je z tab. D2.6 [1] $H_{j1} = 940 \text{ A/m}$, $H_{j2} = 158 \text{ A/m}$, potom magnetická napětí jha statoru a rotoru jsou

$$U_{j1} = L_{j1} H_{j1} = 0,1961 \cdot 940 = 184 \text{ A} \quad 72$$

$$U_{j2} = L_{j2} H_{j2} = 0,0736 \cdot 158 = 11,63 \text{ A} \quad 73$$

Výsledné magnetické napětí na jednu pólovou dvojici

$$F_m = U_\delta + U_{z1} + U_{z2} + U_{j1} + U_{j2} = 682 + 150 + 81 + 184 + 12 = 1109 \text{ A} \quad 74$$

Činitel nasycení magnetického obvodu

$$k_\mu = \frac{F_m}{U_\delta} = \frac{1109}{682} = 1,63 \quad 75$$

Magnetizační proud

$$I_\mu = \frac{pF_m}{0,9m_1 N_1 k_{v1}} = \frac{2 \cdot 1109}{0,9 \cdot 3 \cdot 128 \cdot 0,958} = 6,7 \text{ A} \quad 76$$

Magnetizační proud vztažený na jmenovitý proud

$$i_\mu = \frac{I_\mu}{I_{1N}} = \frac{6,7}{30} = 0,22 \quad 77$$

vyhovuje doporučenému rozmezí.

7 Výpočet odporů a reaktancí

7.1 Odpor statoru

Střední šířka cívky

$$b_c = \frac{\pi(D + h_{d1})}{2p} = \frac{\pi(0,182 + 0,0226)}{4} = 0,161 \text{ m} \quad 78$$

Délka čela cívky

$$l_\zeta = K_\zeta b_c + 2B = 1,3 \cdot 0,161 + 2 \cdot 0,01 = 0,209 \text{ m} \quad 79$$

kde činitel $K_\zeta = 1,3$ (tab. 6.19 [1]), $B = 0,01 \text{ m}$ [1].

Střední délka závitů

$$l_{av} = 2(l_d + l_\zeta) = 2 \cdot (0,116 + 0,209) = 0,65 \text{ m} \quad 80$$

kde $l_d = l_i = 0,116 \text{ m}$.

Celková délka vodičů jedné fáze

$$L = l_{av} N_1 = 0,65 \cdot 128 = 83,15 \text{ m} \quad 81$$

Odpor vinutí

$$R_1 = \rho_{115} \frac{L_1}{S_v n_p a} = \frac{10^{-6}}{41} \cdot \frac{83,15}{1,094 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 2} = 0,46 \, \Omega \quad 82$$

kde rezistivita mědi pro provozní teplotu $\rho_{115} = 10^{-6}/41 \, \Omega m$.

Poměrná hodnota odporu

$$r_1 = R_1 \frac{I_{1N}}{U_{1N}} = 0,46 \cdot \frac{30}{230} = 0,06 \quad 83$$

7.2 Odpor rotoru

Odpor kruhu nakrátko

$$R_{kn} = \rho_{115} \frac{\pi D_{kn}}{Q_2 S_{kn}} = \frac{10^{-6}}{20,6} \cdot \frac{\pi \cdot 0,1477}{38 \cdot 521 \cdot 10^{-6}} = 1,142 \cdot 10^{-6} \, \Omega \quad 84$$

kde rezistivita hliníku pro provozní teplotu $\rho_{115} = 10^{-6}/20,6 \, \Omega m$.

Odpor tyče

$$R_t = \rho_{115} \frac{l_2}{S_t} = \frac{10^{-6}}{20,6} \cdot \frac{0,116}{146 \cdot 10^{-6}} = 38,66 \cdot 10^{-6} \, \Omega \quad 85$$

Odpor fáze

$$R_2 = R_t + \frac{2R_{kn}}{\Delta^2} = 38,66 \cdot 10^{-6} + \frac{2 \cdot 1,142 \cdot 10^{-6}}{0,329} = 59,74 \cdot 10^{-6} \, \Omega \quad 86$$

Odpor fáze přepočtený na počet závitů statorového vinutí

$$R'_2 = R_2 \frac{4m(N_1 k_{v1})^2}{Q_2} = 59,72 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{4 \cdot 3(128 \cdot 0,958)^2}{38} = 0,284 \, \Omega \quad 87$$

Poměrná hodnota

$$r'_2 = R'_2 \frac{I_{1N}}{U_{1N}} = 0,284 \cdot \frac{30}{230} = 0,037 \quad 88$$

7.3 Rozptylová reaktance statoru

Činitel magnetické vodivosti v drážce

$$\begin{aligned} \lambda_d &= \frac{h_3}{3b_2} + \left(\frac{h_2}{b_2} + \frac{3h_1}{b_2 + 2b_0} + \frac{h_0}{b_0} \right) = \\ &= \frac{18,7}{3 \cdot 7,44} + \left(\frac{1,4}{3 \cdot 7,44} + \frac{3 \cdot 1,6}{7,44 + 2 \cdot 3,5} + \frac{0,5}{3,5} \right) = 1,5 \end{aligned} \quad 89$$

kde část klínu zasahující do prostoru drážky $h_2 = 1,4 \, mm$, $h_1 = 1,6 \, mm$ (obě hodnoty z tab. D4.1c), $h_3 = 20,1 - 1,4 = 18,7 \, mm$.

Činitel magnetické vodivosti čel vinutí

$$\lambda_{e1} = 0,34 \frac{q}{l_i} (l_c - 0,64t_p) = 0,34 \cdot \frac{4}{0,116} \cdot (0,209 - 0,64 \cdot 0,1431) = 1,383 \quad 90$$

Činitel ξ

$$\xi = 2k'_\gamma - k_{v1}^2 \left(\frac{t_{d2}}{t_{d1}} \right)^2 = 2 \cdot 1,2 - 0,958^2 \cdot \left(\frac{15}{11,9} \right)^2 = 0,95 \quad 91$$

kde činitel $k'_\gamma = 1,2$ (obr. 6.39e [1]).

Činitel magnetické vodivosti diferenčního rozptylu

$$\lambda_{dif1} = \frac{t_{d1}}{12\delta k_c} = \frac{11,9 \cdot 10^{-3}}{12 \cdot 0,45 \cdot 10^{-3} \cdot 1,217} = 1,7 \quad 92$$

Rozptylová reaktance jedné fáze

$$\begin{aligned} X_{1\sigma} &= 15,8 \frac{f_1}{100} \left(\frac{N_1}{100} \right)^2 \frac{l_i}{pq} (\lambda_d + \lambda_{e1} + \lambda_{dif1}) = \\ &= 15,8 \cdot \frac{50}{100} \cdot \left(\frac{128}{100} \right)^2 \cdot \frac{0,116}{2 \cdot 4} \cdot (1,5 + 1,383 + 1,7) = 0,862 \Omega \end{aligned} \quad 93$$

Poměrná hodnota rozptylové reaktance

$$x_{1\sigma} = X_{1\sigma} \frac{I_{1N}}{U_{1N}} = 0,826 \cdot \frac{30}{230} = 0,112 \quad 94$$

7.4 Rozptylová reaktance rotoru

Činitel magnetické vodivosti v drážce

$$\begin{aligned} \lambda_{d2} &= \left[\frac{h_1}{3b_1} \left(1 - \frac{\pi b_1^2}{8S_t} \right)^2 + 0,66 - \frac{b_0}{2b_1} \right] + \frac{h_0}{b_0} + 1,12 \frac{h'_0 10^6}{I_t} = \\ &= \left[\frac{20,1}{3 \cdot 7,5} \left(1 - \frac{\pi \cdot 7,5^2}{8 \cdot 146} \right)^2 + 0,66 - \frac{1,5}{2 \cdot 7,5} \right] + \frac{0,7}{1,5} + 1,12 \frac{0,0003 \cdot 10^6}{511} = 2,44 \end{aligned} \quad 95$$

Činitel magnetické vodivosti čel

$$\lambda_{e2} = \frac{2,3D_{kn}}{Q_2 l_i \Delta^2} \log \frac{4,7D_{kn}}{a_{kn} + 2b_{kn}} = \frac{2,3 \cdot 147,7}{38 \cdot 116 \cdot 0,329^2} \cdot \log \frac{4,7 \cdot 147,7}{15,5 + 2 \cdot 33,6} = 0,659 \quad 96$$

Činitel magnetické vodivosti diferenčního rozptylu

$$\lambda_{dif2} = \frac{t_{d2}}{12\delta k_c} \xi = \frac{15}{12 \cdot 0,45 \cdot 1,217} \cdot 1 = 2,28 \quad 97$$

kde $\xi \approx 1$ [1].

Rozptylová reaktance jedné fáze

$$\begin{aligned} X_{2\sigma} &= 7,9 f_1 l_i (\lambda_{d2} + \lambda_{\epsilon 2} + \lambda_{dif2}) 10^{-6} = \\ &= 7,9 \cdot 50 \cdot 0,116 \cdot (2,44 + 0,659 + 2,28) \cdot 10^{-6} = 246 \cdot 10^{-6} \Omega \end{aligned} \quad 98$$

Rozptylová reaktance fáze přepočtená na počet závitů statorového vinutí

$$X'_{2\sigma} = X_{2\sigma} \frac{4m(N_1 k_{v1})^2}{Q_2} = 246 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{4 \cdot 3 \cdot (128 \cdot 0,958)^2}{38} = 1,17 \Omega \quad 99$$

Poměrná hodnota

$$x'_{2\sigma} = X'_{2\sigma} \frac{I_{1N}}{U_{1N}} = 1,17 \cdot \frac{30}{230} = 0,152 \Omega \quad 100$$

8 Výpočet ztrát

Hmotnost železa jha a zubů statoru

$$\begin{aligned} m_{j1} &= \pi(D_e - h_{j1})h_{j1}l_{Fe1}k_{Fe}\gamma_{Fe} = \\ &= \pi \cdot (0,272 - 0,0223) \cdot 0,0223 \cdot 0,116 \cdot 0,97 \cdot 7,8 \cdot 10^3 = 15,29 \text{ kg} \end{aligned} \quad 101$$

$$m_{z1} = h_{z1}b_{z1}Q_1l_{Fe1}k_{Fe}\gamma_{Fe} = 0,0226 \cdot 0,0048 \cdot 48 \cdot 0,116 \cdot 0,97 \cdot 7,8 \cdot 10^3 = 4,57 \text{ kg} \quad 102$$

kde hustota oceli $\gamma_{Fe} = 7,8 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$.

Hlavní ztráty v železe

$$\begin{aligned} \Delta P_{Feh} &= \Delta p_{1,0} \left(\frac{f_1}{50}\right)^\beta (k_{dj} B_{j1}^2 m_{j1} + k_{dz} B_{z1}^2 m_{z1}) = \\ &= 2,6 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1,5} \cdot (1,6 \cdot 1,65^2 \cdot 15,29 + 1,8 \cdot 2 \cdot 4,57) = 259 \text{ W} \end{aligned} \quad 103$$

kde měrné ztráty $\Delta p_{1,0} = 2,6 \text{ W/kg}$, $\beta = 1,5$ (obě hodnoty z tab. 6.24 [1]), činitele uvažující vliv nerovnoměrnost rozložení toku v magnetickém obvodu a vliv technologie výroby statorového svazku jdou u strojů do výkonu 250 kW $k_{dj} \approx 1,6$ a $k_{dz} \approx 1,8$ [1].

Amplituda pulsací indukce ve vzduchové mezeře nad hlavami zubů rotoru

$$B_{02} = \beta_{02} k_c B_\delta = 0,36 \cdot 1,217 \cdot 0,783 = 0,34 \text{ T} \quad 104$$

kde pro $b_{01}/\delta = 3,5/0,45 = 7,78$ je z obr. 6.41a [1] $\beta_{02} = 0,36$.

Hustota povrchových ztrát v rotoru

$$\begin{aligned} p_{\delta p2} &= 0,5 k_{02} \left(\frac{Q_1 n}{10000}\right)^{1,5} (B_{02} t_{d1} 10^3)^2 = \\ &= 0,5 \cdot 1,5 \cdot \left(\frac{48 \cdot 1500}{10000}\right)^{1,5} \cdot (0,34 \cdot 0,0119 \cdot 10^3)^2 = 242,6 \text{ Wm}^{-2} \end{aligned} \quad 105$$

kde $k_{02} = 1,4$ až $1,8$. Volím $k_{02} = 1,5$.

Povrchové ztráty v rotoru

$$\Delta P_{\delta p_2} = p_{\delta p_2} (t_{d2} - b_{02}) Q_2 I_{Fe2} = 242,6 \cdot (0,015 - 0,0015) \cdot 38 \cdot 0,116 = 14,4 \text{ W} \quad 106$$

Hmotnost zubů rotoru

$$m_{z2} = Q_2 h_{z2} b_{z2} l_{Fe2} k_{Fe} \gamma_{Fe} = 38 \cdot 0,0265 \cdot 0,0067 \cdot 0,116 \cdot 0,97 \cdot 7,8 \cdot 10^3 = 5,92 \text{ kg} \quad 107$$

Pulsní ztráty v zubech rotoru

$$\Delta P_{p2} = 0,11 \left(\frac{Q_1 n}{1000} B_{p2} \right)^2 m_{z2} = 0,11 \cdot \left(\frac{48 \cdot 1500}{1000} \cdot 0,13 \right)^2 \cdot 5,92 = 55,2 \text{ W} \quad 108$$

kde

$$B_{p2} = \frac{\gamma \delta}{2t_{d2}} B_{z2} = \frac{4,73 \cdot 0,45}{2 \cdot 15} \cdot 1,8 = 0,13 \text{ T} \quad 109$$

Celkové dodatečné ztráty v železe

$$\Delta P_{Fed} = \Delta P_{\delta p_2} + \Delta P_{p2} = 14,4 + 55,2 = 69,6 \text{ W} \quad 110$$

Celkové ztráty v železe

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_{Feh} + \Delta P_{Fed} = 259 + 69,6 = 328,6 \text{ W} \quad 111$$

Mechanické ztráty

$$\Delta P_{mech} = K_T \left(\frac{n}{10} \right)^2 D_e^4 = 0,95 \cdot \left(\frac{1500}{10} \right)^2 \cdot 0,272^4 = 116,6 \text{ W} \quad 112$$

kde pro čtyřpólové stroje je činitel $K_T = 1,3(1 - D_e) = 1,3(1 - 0,272) = 0,95$.

Dodatečné ztráty při jmenovitém chodu

$$\Delta P_d = 0,005 P_{1N} = 0,005 \frac{P_{2N}}{\eta} = 0,005 \cdot \frac{15000}{0,86} = 87,2 \text{ W} \quad 113$$

Elektrické ztráty ve satorovém vinutí při chodu naprázdno

$$\Delta P_{j10} = m_1 R_1 I_\mu^2 = 3 \cdot 0,46 \cdot 6,7^2 = 62,4 \text{ W} \quad 114$$

Činná složka proudu naprázdno

$$I_{0\varepsilon} = \frac{\Delta P_{Fe} + \Delta P_{mech} + \Delta P_{j10}}{m U_{1N}} = \frac{328,6 + 116,6 + 87,2}{3 \cdot 230} = 0,73 \text{ A} \quad 115$$

Proud naprázdno

$$I_0 = \sqrt{I_{0\varepsilon}^2 + I_\mu^2} = \sqrt{0,73^2 + 6,7^2} = 6,74 \text{ A} \quad 116$$

Účinnost naprázdno

$$\cos \varphi_0 = \frac{I_{0\varepsilon}}{I_0} = \frac{0,73}{6,74} = 0,109 \quad 117$$

9 Výpočet zatěžovacích charakteristik

Jelikož úhel

$$\begin{aligned} \gamma &= \arctg \frac{R_1 X_{12} - R_{12} X_{1\sigma}}{R_{12}(R_1 + R_{12}) + X_{12}(X_{1\sigma} + X_{12})} = \\ &= \arctg \frac{0,46 \cdot 34,3 - 1,92 \cdot 0,862}{1,92 \cdot (0,46 + 1,92) + 34,3 \cdot (0,862 + 34,3)} = 40' < 1^\circ \end{aligned} \quad 118$$

kde

$$R_{12} = \frac{\Delta P_{Feh}}{m I_\mu^2} = \frac{259}{3 \cdot 6,7^2} = 1,92 \, \Omega \quad 119$$

$$X_{12} = \frac{U_{1N}}{I_\mu} - X_{1\sigma} = \frac{230}{6,7} - 0,862 = 34,3 \, \Omega \quad 120$$

potom činitel rozptylu

$$c_1 = 1 + \frac{X_{1\sigma}}{X_{12}} = 1 + \frac{0,862}{34,3} = 1,025 \quad 121$$

Činná složka proudu při synchronním chodu

$$I_{(0)\varepsilon} = \frac{\Delta P_{Feh} + 3R_1 I_\mu^2}{3U_{1N}} = \frac{259 + 3 \cdot 0,46 \cdot 6,7^2}{3 \cdot 230} = 0,47 \, A \quad 122$$

Výpočtové veličiny

$$a' = c_1^2 = 1,025^2 = 1,051 \quad 123$$

$$b' = 0 \quad 124$$

$$a = c_1 R_1 = 1,025 \cdot 0,46 = 0,48 \quad 125$$

$$b = c_1 (X_{1\sigma} + c_1 X'_{2\sigma}) = 1,025 \cdot (0,882 + 1,025 \cdot 1,17) = 2,11 \quad 126$$

Jmenovitý skluz $s_n \approx r'_2 = 0,037$.

Postup analytického výpočtu (znázorněn pro $s = 0,0075$):

$$R = a + a' \frac{R'_2}{s} = 0,48 + 1,051 \cdot \frac{0,284}{0,0075} = 40,22 \, \Omega \quad 127$$

$$X = b + b' \frac{R'_2}{s} = 2,11 + 0 = 2,11 \, \Omega \quad 128$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{40,22^2 + 2,11^2} = 40,28 \, \Omega \quad 129$$

$$I''_2 = \frac{U_{1N}}{Z} = \frac{230}{40,28} = 5,71 \, A \quad 130$$

$$\cos \varphi'_2 = \frac{R}{Z} = \frac{40,22}{40,28} = 1 \quad 131$$

$$\sin \varphi'_2 = \frac{X}{Z} = \frac{2,11}{40,28} = 0,052 \quad 132$$

$$I_{1\check{e}} = I_{(0)\check{e}} + I''_2 \cos \varphi'_2 = 0,47 + 5,71 \cdot 1 = 6,17 \text{ A} \quad 133$$

$$I_{1j} = I_{\mu} + I''_2 \sin \varphi'_2 = 6,7 + 5,71 \cdot 0,052 = 7 \text{ A} \quad 134$$

$$I_1 = \sqrt{I_{1\check{e}}^2 + I_{1j}^2} = \sqrt{6,17^2 + 7^2} = 9,33 \text{ A} \quad 135$$

$$I'_2 = c_1 I''_2 = 1,025 \cdot 5,71 = 5,85 \text{ A} \quad 136$$

$$P_1 = P_p = 3U_{1N} I_{1\check{e}} 10^{-3} = 3 \cdot 230 \cdot 6,17 \cdot 10^{-3} = 4,26 \text{ kW} \quad 137$$

$$\Delta P_{j1} = 3R_1 I_1^2 10^{-3} = 3 \cdot 0,46 \cdot 9,33 \cdot 10^{-3} = 0,12 \text{ kW} \quad 138$$

$$\Delta P_{j2} = 3R'_2 I_2'^2 10^{-3} = 3 \cdot 0,284 \cdot 5,85^2 \cdot 10^{-3} = 0,03 \text{ kW} \quad 139$$

$$\Delta P_d = \Delta P_{dN} \left(\frac{I_1}{I_{1N}} \right)^2 = 0,08721 \cdot \left(\frac{9,33}{30} \right)^2 = 0,01 \text{ kW} \quad 140$$

$$\begin{aligned} \Delta P &= \Delta P_{Fe} + \Delta P_{mech} + \Delta P_{j1} + \Delta P_{j2} + \Delta P_d = \\ &= 0,3286 + 0,1166 + 0,12 + 0,03 + 0,01 = 0,6 \text{ kW} \end{aligned} \quad 141$$

$$P_2 = P_1 - \Delta P = 4,26 - 0,6 = 3,66 \text{ kW} \quad 142$$

$$\eta = 1 - \frac{\Delta P}{P_1} = 1 - \frac{0,6}{4,26} = 0,858 \quad 143$$

$$\cos \varphi = \frac{I_{1\check{e}}}{I_1} = \frac{6,17}{9,33} = 0,661 \quad 144$$

Zatěžovací charakteristiky pro další hodnoty skluzu jsou uvedeny v tabulce 1. Jejich grafické znázornění je uvedeno v příloze B.

Tabulka 1. Výpočet zatěžovacích charakteristik

s [-]	0,0075	0,015	0,0225	0,03	0,037	0,0425
R [Ω]	40,22	20,38	13,75	10,43	8,55	7,50
X [Ω]	2,11	2,11	2,11	2,11	2,11	2,11
Z [Ω]	40,28	20,49	13,91	10,64	8,80	7,79
I''₂ [A]	5,71	11,23	16,54	21,61	26,13	29,51
cosφ₂ [-]	0,999	0,995	0,988	0,98	0,971	0,963
sinφ₂ [-]	0,052	0,103	0,152	0,198	0,24	0,271
I_{1ē} [A]	6,17	11,64	16,82	21,66	25,83	28,88
I_{1j} [A]	7	7,86	9,21	10,99	12,96	14,69

Tabulka 1. Pokračování

I_1 [A]	9,33	14,04	19,17	24,28	28,9	32,4
I'_2 [A]	5,85	11,51	16,95	22,16	26,78	30,25
P_1 [kW]	4,26	8,03	11,6	14,94	17,83	19,93
ΔP_{j1} [kW]	0,12	0,27	0,51	0,81	1,15	1,45
ΔP_{j2} [kW]	0,03	0,11	0,24	0,42	0,61	0,78
ΔP_d [kW]	0,01	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1
ΔP [kW]	0,6	0,85	1,23	1,73	2,29	2,77
P_2 [kW]	3,65	7,18	10,37	13,21	15,54	17,15
η [-]	0,858	0,894	0,894	0,884	0,872	0,861
$\cos\varphi$ [-]	0,661	0,829	0,877	0,892	0,894	0,891

10 Výpočet rozběhových charakteristik

Body charakteristik jsou počítány pro skluzy $s = 1; 0,8; 0,5; 0,2; 0,1$ a pro skluz zvratu. Tyto hodnoty jsou uvedeny v tabulce 2. Grafická znázornění rozběhových charakteristik jsou v příloze C. Podrobnější výpočet je uveden pouze pro skluz $s = 1$.

Redukovaná výška vodiče (bezrozměrná veličina)

$$\xi = 63,61h_t \sqrt{s} = 63,61 \cdot 25,9 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{1} = 1,65 \quad 145$$

Pro tuto hodnotu je $\varphi(\xi) = 0,46$ (obr. 6.46 [1]), $\varphi'(\xi) = k_d = 0,85$ (obr. 6.47 [1]).

Hloubka vniku proudu rotoru

$$h_R = \frac{h_t}{1 + \varphi} = \frac{25,9}{1 + 0,46} = 17,75 \text{ mm} \quad 146$$

Průřez tyče při této hloubce vniku

$$S_R = \frac{\pi b_1^2}{8} + \frac{b_1 + b_R}{2} \left(h_R - \frac{b_1}{2} \right) = \frac{\pi \cdot 7,5^2}{8} + \frac{7,5 + 5,17}{2} \left(17,75 - \frac{7,5}{2} \right) = 110,7 \text{ mm}^2 \quad 147$$

kde

$$b_R = b_1 - \frac{b_1 - b_2}{h_1} \left(h_R - \frac{b_1}{2} \right) = 7,5 - \frac{7,5 - 4,16}{20,1} \cdot \left(17,75 - \frac{7,5}{2} \right) = 5,17 \text{ mm} \quad 148$$

Činitel

$$k_R = \frac{S_t}{S_R} = \frac{146 \cdot 10^{-6}}{110,7 \cdot 10^{-6}} = 1,32 \quad 149$$

Činitel celkového zvětšení odporu fáze rotoru vlivem povrchového jevu

$$K_R = 1 + \frac{R_t}{R_2} (k_R - 1) = 1 + \frac{38,66 \cdot 10^{-6}}{59,74 \cdot 10^{-6}} (1,32 - 1) = 1,21 \quad 150$$

Přepočtený odpor fáze rotorového vinutí s uvažováním povrchového jevu

$$R'_{2\xi} = K_R R'_2 = 1,21 \cdot 0,284 = 0,34 \, \Omega \quad 151$$

Činitel magnetické vodivosti drážkového rozptylu s uvažováním povrchového jevu

$$\begin{aligned} \lambda_{d2\xi} &= \left[\frac{h_1}{3b_1} \left(1 - \frac{\pi b_1^2}{8S_t} \right)^2 + 0,66 - \frac{b_0}{2b_1} \right] \cdot k_d + \frac{h_0}{b_0} + 1,12 \frac{h'_0 10^6}{i_z I_t} = \\ &= \left[\frac{20,1}{3 \cdot 7,5} \left(1 - \frac{\pi \cdot 7,5^2}{8 \cdot 146} \right)^2 + 0,66 - \frac{1,5}{2 \cdot 7,5} \right] \cdot 0,85 + \frac{0,7}{1,5} + 1,12 \frac{0,0003 \cdot 10^6}{6,5 \cdot 511} = 1,59 \end{aligned} \quad 152$$

kde předběžně zvolený poměrný záběrný proud $i_z = 6,5$.

Činitel uvažující vliv povrchového jevu na reaktanci

$$K_X = \frac{\lambda_{d2\xi} + \lambda_{\xi 2} + \lambda_{dif2}}{\lambda_{d2} + \lambda_{\xi 2} + \lambda_{dif2}} = \frac{1,59 + 0,659 + 2,28}{2,44 + 0,659 + 2,28} = 0,84 \quad 153$$

Přepočtená rozptylová reaktance rotoru s uvažováním povrchového jevu

$$X'_{2\sigma\xi} = X'_{2\sigma} K_X = 1,17 \cdot 0,84 = 0,98 \, \Omega \quad 154$$

Rotorový proud bez uvažování nasycení za předpokladu $c_I \approx 1$

$$\begin{aligned} I'_2 &= \frac{U_{1N}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_{2\xi}}{s} \right)^2 + \left(X_{1\sigma} + X'_{2\sigma\xi} \right)^2}} = \\ &= \frac{230}{\sqrt{(0,46 + 0,34)^2 + (0,862 + 0,98)^2}} = 114,3 \, A \end{aligned} \quad 155$$

Celkové magnetické napětí na jednu drážku vinutí

$$\begin{aligned} F_{dav} &= 0,7 \frac{k_n I_1 V_{d1}}{a} \left(k'_{\beta} + k_{y1} k_{v1} \frac{Q_1}{Q_2} \right) = \\ &= 0,7 \cdot \frac{1,35 \cdot 114,3 \cdot 32}{2} \cdot \left(1 + 1 \cdot 0,958 \cdot \frac{48}{38} \right) = 3818 \, A \end{aligned} \quad 156$$

Fiktivní indukce rozptylového toku ve vzduchové mezeře

$$B_{f\delta} = \frac{F_{dav}}{1,6\delta C_n} 10^{-6} = \frac{3818}{1,6 \cdot 0,00045 \cdot 0,963} \cdot 10^{-6} = 5,51 \, T \quad 157$$

kde činitel

$$C_n = 0,64 + 2,5 \sqrt{\frac{\delta}{t_{d1} + t_{d2}}} = 0,64 + 2,5 \cdot \sqrt{\frac{0,45}{11,9 + 15}} = 0,963 \quad 158$$

a podle obr. 6.50 je činitel $\chi_\delta = 0,47$.

Činitel magnetické vodivosti drážkového rozptylu statorového vinutí s uvažováním nasycení

$$\lambda_{d1n} = \lambda_{d1} - \Delta\lambda_{d1n} = 1,5 - 0,216 = 1,29 \quad 159$$

kde

$$\Delta\lambda_{d1n} = \frac{h_{01} + 0,58h'}{b_{01}} \cdot \frac{\Delta b_{01}}{\Delta b_{01} + 1,5b_{01}} = \frac{0,5 + 0,58 \cdot 2}{3,5} \cdot \frac{4,47}{4,47 + 1,5 \cdot 3,5} = 0,216 \quad 160$$

kde

$$\Delta b_{01} = (t_{d1} - b_{01})(1 - \chi_\delta) = (11,9 - 3,5)(1 - 0,47) = 4,47 \text{ mm} \quad 161$$

Činitel magnetické vodivosti diferenčního rozptylu statorového vinutí s uvažováním vlivu nasycení

$$\lambda_{dif1n} = \lambda_{dif1} \chi_\delta = 1,7 \cdot 0,47 = 0,81 \quad 162$$

Rozptylová reaktance fáze statorového vinutí s uvažováním vlivu nasycení

$$X_{1\sigma n} = X_{1\sigma} \frac{\lambda_{d1n} + \lambda_{\varepsilon1} + \lambda_{dif1n}}{\lambda_{d1} + \lambda_{\varepsilon1} + \lambda_{dif1}} = 0,862 \cdot \frac{0,216 + 1,383 + 0,81}{1,5 + 1,383 + 1,7} = 0,65 \Omega \quad 163$$

Činitel magnetické vodivosti drážkového rozptylu rotoru s uvažováním vlivu nasycení a povrchového jevu

$$\Delta\lambda_{d2n} = \frac{h_{02}}{b_{02}} \cdot \frac{\Delta b_{02}}{b_{02} + \Delta b_{02}} = \frac{0,7}{1,5} \cdot \frac{7,15}{1,5 + 7,15} = 0,39 \quad 164$$

kde

$$\Delta b_{02} = (t_{d2} - b_{02})(1 - \chi_\delta) = (15 - 1,5) \cdot (1 - 0,47) = 7,15 \text{ mm} \quad 165$$

Činitel drážkové vodivosti s uvažováním povrchového jevu

$$\lambda_{d2\zeta n} = \lambda_{d2\xi} - \Delta\lambda_{d2n} = 1,59 - 0,39 = 1,2 \quad 166$$

Činitel magnetické vodivosti diferenčního rozptylu rotoru s vlivem nasycení

$$\lambda_{dif2n} = \lambda_{dif2} \chi_\delta = 2,28 \cdot 0,47 = 1,07 \quad 167$$

Přepočtená rozptylová reaktance jedné fáze rotorového vinutí s uvažováním povrchového jevu a sycení

$$X'_{2\sigma\zeta n} = X_{2\sigma} \frac{\lambda_{d2\zeta n} + \lambda_{dif2n} + \lambda_{\varepsilon2}}{\lambda_{d2} + \lambda_{dif2} + \lambda_{\varepsilon2}} = 1,17 \cdot \frac{1,2 + 1,07 + 0,659}{2,44 + 0,659 + 2,28} = 0,64 \Omega \quad 168$$

Vzájemná reaktance vinutí statoru a rotoru při spouštění

$$X_{12n} = X_{12} \frac{F_m}{U_\delta} = 34,3 \cdot \frac{1109,1}{682} = 55,8 \Omega \quad 169$$

Činitel rozptylu

$$c_{1pn} = 1 + \frac{X_{1\sigma n}}{X_{12n}} = 1 + \frac{0,65}{55,8} = 1,012 \quad 170$$

Přepočtený rotorový proud

$$I'_2 = \frac{U_{1N}}{\sqrt{a_p^2 + b_p^2}} = \frac{230}{\sqrt{0,809^2 + 1,295^2}} = 150,6 \text{ A} \quad 171$$

kde

$$a_p = R_1 + c_{1pn} \frac{R'_{2\xi}}{s} = 0,46 + 1,012 \cdot \frac{0,34}{1} = 0,809 \Omega \quad 172$$

$$b_p = X_{1\sigma n} + c_{1pn} X'_{2\sigma n} = 0,65 + 1,012 \cdot 0,64 = 1,295 \Omega \quad 173$$

Statorový proud

$$I_1 = I'_2 \frac{\sqrt{a_p^2 + (b_p + X_{12n})^2}}{c_{1pn} X_{12n}} = 150,6 \cdot \frac{\sqrt{0,809^2 + (1,295 + 55,8)^2}}{1,012 \cdot 55,8} = 152,33 \text{ A} \quad 174$$

Poměrný záběrný proud

$$i_z = \frac{I_{1z}}{I_{1N}} = \frac{152,33}{30} = 5,08 \quad 175$$

Poměrný záběrný moment

$$m_z = \left(\frac{I'_{2z}}{I'_{2N}}\right)^2 K_R \frac{s_N}{s'} = \left(\frac{150,6}{26,8}\right)^2 \cdot 1,21 \cdot \frac{0,037}{1} = 1,41 \quad 176$$

Kritický skluz (skluz zvratu)

$$s_{\max} = \frac{R'_{2\xi}}{\frac{\bar{X}_{1\sigma n}}{c_{1pn}} + \bar{X}'_{2\sigma n}} = \frac{0,284}{\frac{0,674}{1,0121} + 0,707} = 0,207 \quad 177$$

kde střední hodnota odporu $R'_{2\xi}$ a střední hodnota reaktancí $X_{1\sigma n}$ a $X'_{2\sigma n}$ je počítána pro skluzu $s = 0,1$ a $s = 0,2$.

$$\bar{R}'_{2\xi} = \frac{0,283 + 0,286}{2} \doteq 0,284 \Omega \quad 178$$

$$\bar{X}_{1\sigma n} = \frac{0,678 + 0,667}{2} \doteq 0,674 \Omega \quad 179$$

$$\bar{X}'_{2\sigma\zeta n} = \frac{0,715 + 0,697}{2} \doteq 0,707 \Omega \quad 180$$

Poměrný moment zvratu

$$m_{\max} = \left(\frac{I'_{2N}(s_{\max})}{I'_{2N}} \right)^2 K_R \frac{s_N}{s_{\max}} = \left(\frac{99,6}{26,8} \right)^2 \cdot 1,01 \cdot \frac{0,037}{0,207} = 2,5 \quad 181$$

Tabulka 2. Výpočet rozběhových charakteristik

s [-]	1	0,8	0,5	0,207	0,2	0,1
ξ [-]	1,65	1,47	1,16	0,75	0,74	0,52
φ [-]	0,46	0,3	0,14	0,03	0,03	0,01
k_r [-]	1,32	1,2	1,09	1,01	1,01	1
K_r [-]	1,21	1,13	1,06	1,01	1,01	1
$R'_{2\xi} [\Omega]$	0,342	0,321	0,3	0,286	0,286	0,283
k_d [-]	0,85	0,87	0,94	0,97	0,97	0,98
K_x [-]	0,842	0,847	0,862	0,869	0,869	0,871
$X'_{2\sigma\xi} [\Omega]$	0,983	0,991	1,009	1,017	1,017	1,02
$X'_{2\sigma\xi n} [\Omega]$	0,637	0,649	0,683	0,697	0,699	0,715
$X_{1\sigma n} [\Omega]$	0,651	0,653	0,664	0,667	0,669	0,678
c_{1pn} [-]	1,012	1,012	1,012	1,012	1,012	1,012
$a_p [\Omega]$	0,809	0,866	1,067	1,857	1,905	3,326
$b_p [\Omega]$	1,295	1,31	1,355	1,372	1,377	1,402
$I'_2 [\text{A}]$	150,6	146,5	133,3	99,6	97,9	63,7
$I_1 [\text{A}]$	152,3	148,2	135	100,9	99,1	64,6
i_1 [-]	5,08	4,94	4,5	3,36	3,3	2,15
m [-]	1,41	1,56	1,94	2,49	2,48	2,09

11 Tepelný výpočet

Jouleovy ztráty v drážkách statoru

$$\Delta P'_{jd1} = k_\rho \Delta P_{jl} \frac{2l_1}{l_{av1}} = 1,07 \cdot 1153 \cdot \frac{2 \cdot 0,116}{0,65} = 439 \text{ W} \quad 182$$

kde činitel zvýšení ztrát $k_\rho = \rho_{140} / \rho_{115} = 1,07$.

Oteplení vnitřního povrchu statorového svazku nad teplotu vzduchu uvnitř stroje

$$\Delta \vartheta_{pov1} = K \frac{\Delta P'_{jd1} + \Delta P_{Feh}}{\pi D l_1 \alpha_1} = 0,8 \cdot \frac{439 + 259}{\pi \cdot 0,182 \cdot 0,116 \cdot 130} = 65 \text{ }^\circ\text{C} \quad 183$$

kde činitel $K = 0,2$ (tab. 6.30 [1]), součinitel přestupu tepla z povrchu $\alpha_1 = 130$ (obr. 6.60a [1]).

Teplotní spád v izolaci drážkové části statorového vinutí

$$\begin{aligned}\Delta \mathcal{G}_{id1} &= \frac{\Delta P'_{jd1}}{Q_1 Q_{d1} l_1} \left(\frac{b_{i1}}{\lambda_{ekv}} + \frac{b_1 + b_2}{16 \lambda'_{ekv}} \right) = \\ &= \frac{439}{48 \cdot 0,063 \cdot 0,116} \cdot \left(\frac{0,4 \cdot 10^{-3}}{0,16} + \frac{(10 + 7,4) \cdot 10^{-3}}{16 \cdot 1,1} \right) = 4,4 \text{ } ^\circ\text{C}\end{aligned}\quad 184$$

kde výpočtový obvod statorové drážky

$$Q_{d1} = 2h_d + b_1 + b_2 = 2 \cdot 22,6 + 10 + 7,4 = 63 \text{ mm} \quad 185$$

střední ekvivalentní tepelná vodivost drážkové izolace $\lambda_{ekv} = 0,16 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, střední tepelná vodivost vnitřní izolace cívky pro $d/d_{vi} = 1,18/1,275 = 0,93$ je $\lambda'_{ekv} = 1,1 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ (obr. 6.62 [1]), jednostranná tloušťka izolace v drážce $b_{i1} = 0,4 \text{ mm}$ (tab. 3.8 [1]).

Teplotní spád na tloušťce izolace čel

$$\begin{aligned}\Delta \mathcal{G}_{i\check{c}1} &= \frac{\Delta P'_{j\check{c}1}}{2Q_1 O_{\check{c}1} l_{\check{c}1}} \left(\frac{b_{i\check{c}1}}{\lambda_{ekv}} + \frac{h_{d1}}{12 \lambda'_{ekv}} \right) = \\ &= \frac{794}{2 \cdot 48 \cdot 0,063 \cdot 0,116} \left(\frac{0}{0,16} + \frac{22,6 \cdot 10^{-3}}{12 \cdot 1,1} \right) = 1,1 \text{ } ^\circ\text{C}\end{aligned}\quad 186$$

kde ztráty v čelech cívek

$$\Delta P'_{j\check{c}1} = k_\rho \Delta P_{j1} \frac{2l_{\check{c}1}}{l_{av1}} = 1,07 \cdot 1153 \cdot \frac{2 \cdot 0,209}{0,65} = 794 \text{ W} \quad 187$$

obvod chladičícího povrchu čel jedné cívky $O_{\check{c}1} \approx O_{d1}$, čela nejsou izolována proto jednostranná tloušťka izolace čel cívky $b_{i\check{c}1} = 0$.

Oteplení vnějšího povrchu izolace čel vinutí nad teplotu vzduchu uvnitř stroje

$$\Delta \mathcal{G}_{pov\check{c}1} = \frac{K \Delta P'_{j\check{c}1}}{2\pi D l_{v1} \alpha} = \frac{0,8 \cdot 794}{2\pi \cdot 0,182 \cdot 0,064 \cdot 130} = 66 \text{ } ^\circ\text{C} \quad 188$$

Střední oteplení statorového vinutí nad teplotu vzduchu uvnitř stroje

$$\begin{aligned}\Delta \mathcal{G}'_1 &= \frac{(\Delta \mathcal{G}_{pov1} + \Delta \mathcal{G}_{id1}) 2l_1}{l_{av1}} + \frac{(\Delta \mathcal{G}_{i\check{c}1} + \Delta \mathcal{G}_{pov\check{c}1}) 2l_{\check{c}1}}{l_{av1}} = \\ &= \frac{(65 + 4,4) \cdot 2 \cdot 0,116}{0,65} + \frac{(1,1 + 66) \cdot 2 \cdot 0,209}{0,65} = 68 \text{ } ^\circ\text{C}\end{aligned}\quad 189$$

Oteplení vzduchu uvnitř stroje nad teplotu okolního prostředí

$$\Delta \mathcal{G}_v = \frac{\sum \Delta P'_v}{S_{tel} \alpha_v} = \frac{2203}{0,21 \cdot 1000} = 10,6 \text{ } ^\circ\text{C} \quad 190$$

kde součinitel přestupu tepla $\alpha_v = 1000$ (obr. 6.60a [1]), součet ztrát odváděných do vzduchu uvnitř stroje

$$\begin{aligned} \sum \Delta P'_v &= \sum \Delta P + (k_\rho - 1)(\Delta P_{j1} + \Delta P_{j2}) - (1 - K)(\Delta P_{j\dot{c}1} + \Delta P_{Feh}) = \\ &= 2290 + (1,07 - 1) \cdot (1153 + 610) - (1 - 0,8) \cdot (794 + 259) = 2203 \text{ W} \end{aligned} \quad 191$$

ekvivalentní ochlazovací povrch stroje

$$S_{tel} = \pi D_e (l_1 + 2l_{v1}) = \pi \cdot 0,272 \cdot (0,116 + 2 \cdot 0,064) = 0,21 \text{ m}^2 \quad 192$$

Střední oteplení statorového vinutí nad teplotu okolí

$$\Delta \mathcal{G}_1 = \Delta \mathcal{G}'_1 + \Delta \mathcal{G}_v = 68 + 10,6 = 78,6 \text{ } ^\circ\text{C} \quad 193$$

Požadovaný průtok vzduchu

$$Q_v = \frac{\sum \Delta P'_v}{1100 \Delta \mathcal{G}'_v} = \frac{2203}{1100 \cdot 10,6} = 0,09 \text{ m}^3 / \text{s} \quad 194$$

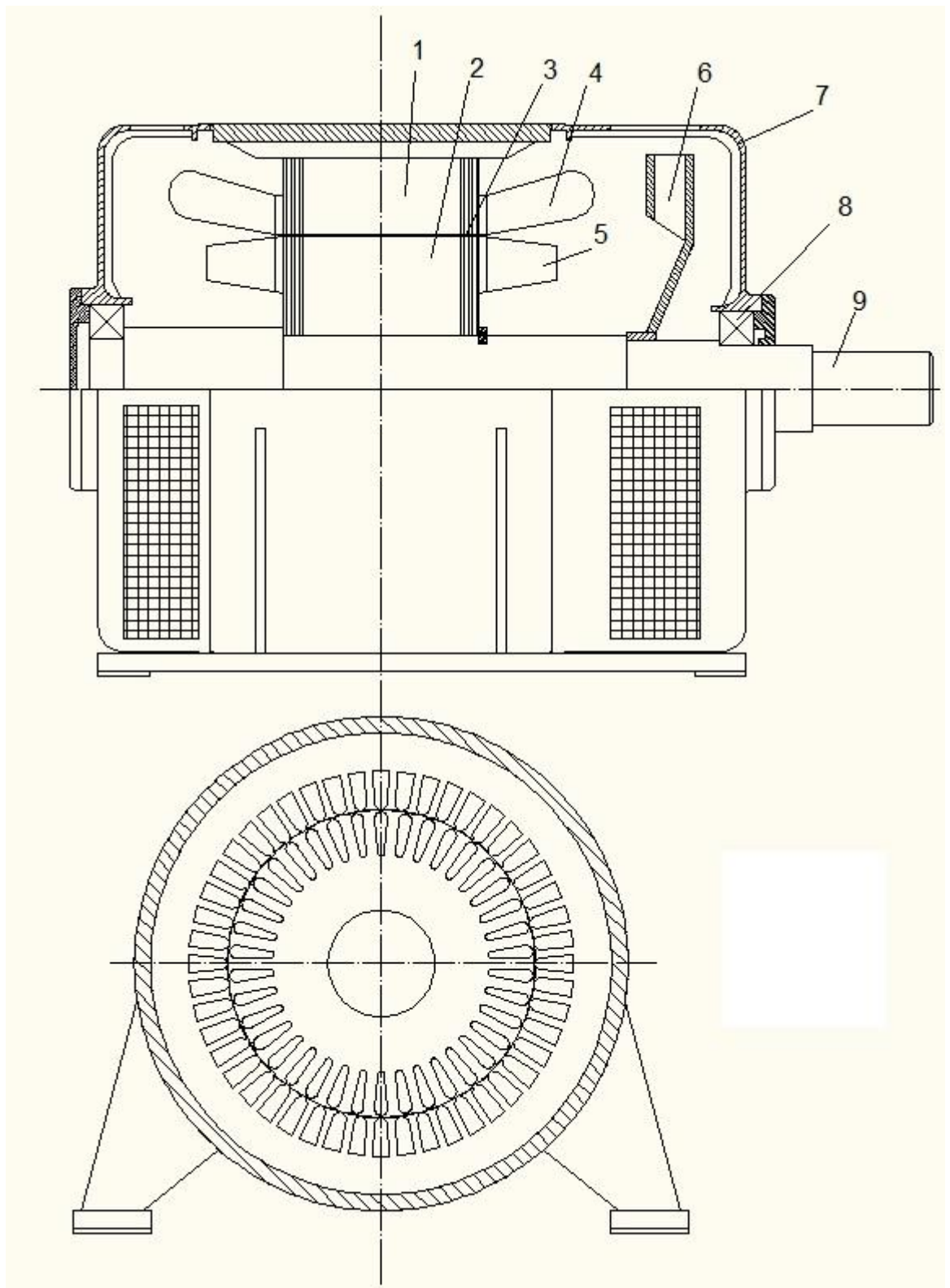
Průtok vzduchu při daných rozměrech stroje

$$Q'_v = 0,1m \frac{n}{100} D_e^2 = 0,1 \cdot 3,15 \cdot \frac{1500}{100} \cdot 0,272^2 = 0,35 \text{ m}^3 / \text{s} \quad 195$$

kde činitel $m = 3,15$ [1].

Výsledné působení všech ventilačních elementů v motoru je větší než požadovaný průtok vzduchu.

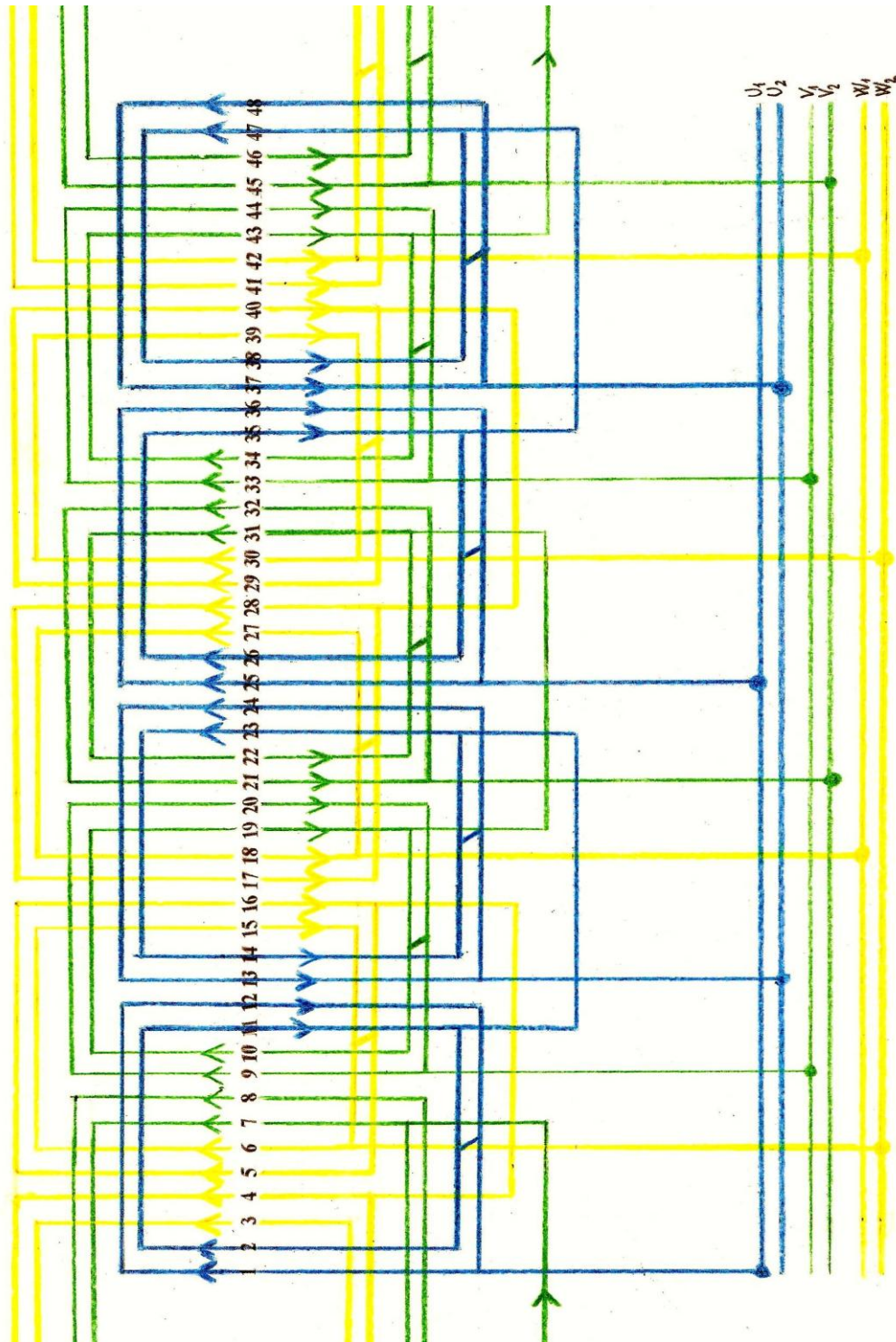
12 Schematický podélný a příčný řez stroje



Obrázek 1. Podélný a příčný řez stroje, 1 – satorový svazek, 2 – rotorový svazek, 3 – vzduchová mezera, 4 – čelo satorového vinutí, 5 – kruh nakrátko, 6 – ventilátor, 7 – ložiskový štít, 8 – ložisko, 9 - hřídel

13 Popis statorového vinutí

Při návrhu motoru bylo použito jednovrstvé soustředné vinutí. Rozvinuté schéma je znázorněno na obrázku 2.



Obrázek 2. Rozvinuté schéma statorového vinutí

Závěr

Při návrhu asynchronního motoru s klecí nakrátko je začátek spojen s určením hlavních rozměrů. Určují se z výkonové rovnice, avšak jeden rozměr je potřeba zvolit pomocí tabulek. Takto se získá délka železného svazku, vnější a vnitřní průměr statoru. Další důležitou součástí je určení rozměrů drážek statoru. V návrhu byla zvolena polozavřená drážka typu L pro vsypávané měděné vinutí. Je třeba dbát na to, aby byl konečný činitel plnění drážky v určených mezích. Dále je určena vzduchová mezera s rozměrem 0,45 mm a výpočet rozměrů drážek rotoru, rotorových tyčí a kruhů nakrátko, které se určují pomocí vhodně zvolené proudové hustoty. Bylo použito lité hliníkové vinutí a drážky typu V. Ve výpočtu magnetického obvodu se vychází z předběžně určených indukci v zubech a jhu jak statoru tak rotoru. Měřítkem správnosti těchto výpočtů je činitel nasycení zubů a magnetizační proud vztažený na proud jmenovitý.

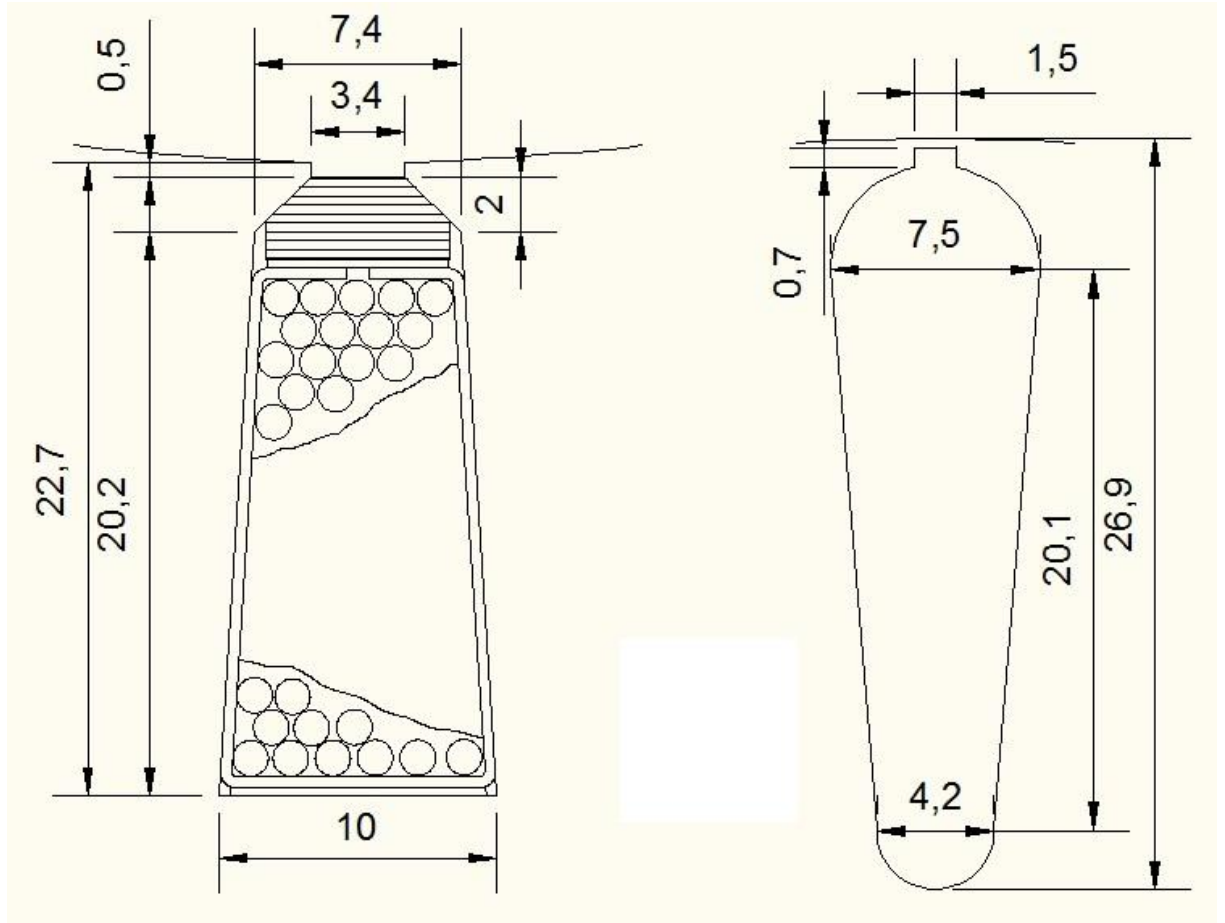
Důležitou součástí návrhu asynchronního motoru je výpočet odporu a rozptylové reaktance statoru a rotoru, výpočet ztrát a výpočet zatěžovacích a rozběhových charakteristik. Ztráty jsou rozděleny na ztráty v železe, povrchové ztráty, pulsní ztráty v zubech, mechanické a dodatečné ztráty. Zatěžovací charakteristiky je možné určit z kružnicového diagramu. V této práci jsou ale určeny pomocí výpočtů a jejich průběhy jsou přiloženy v příloze. Podobně jsou počítány i charakteristiky rozběhové, jejichž grafická znázornění jsou rovněž přiloženy v příloze. Tepelný výpočet je uveden pouze zjednodušeně. V posledních kapitolách je schematický podélný a příčný řez stroje a podrobnější popis statorového vinutí.

Seznam literatury

- [1] Kopylov, I. P. a kol.: Stavba elektrických strojů. Praha 1988.
- [2] Cigánek, L.: Stavba elektrických strojů. Praha 1958.

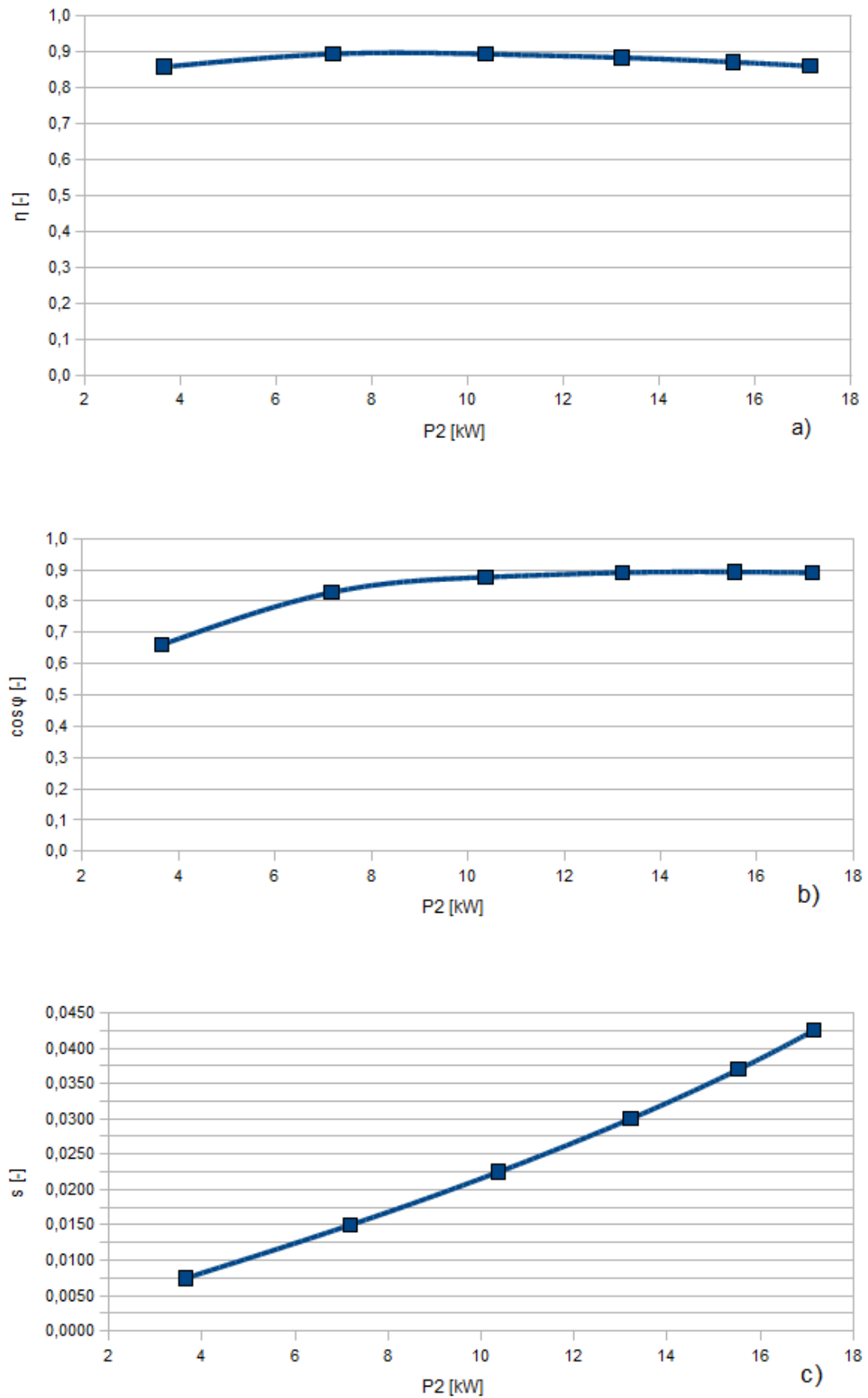
Přílohy

Příloha A

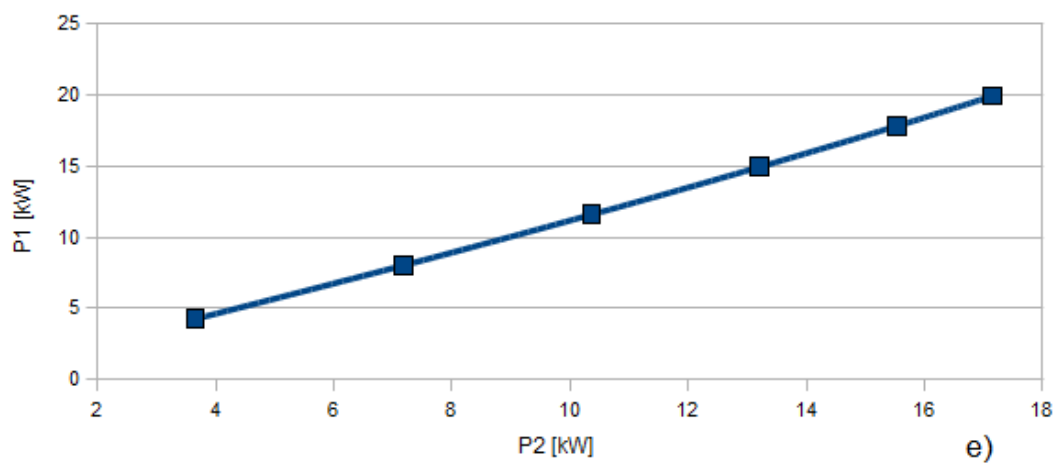
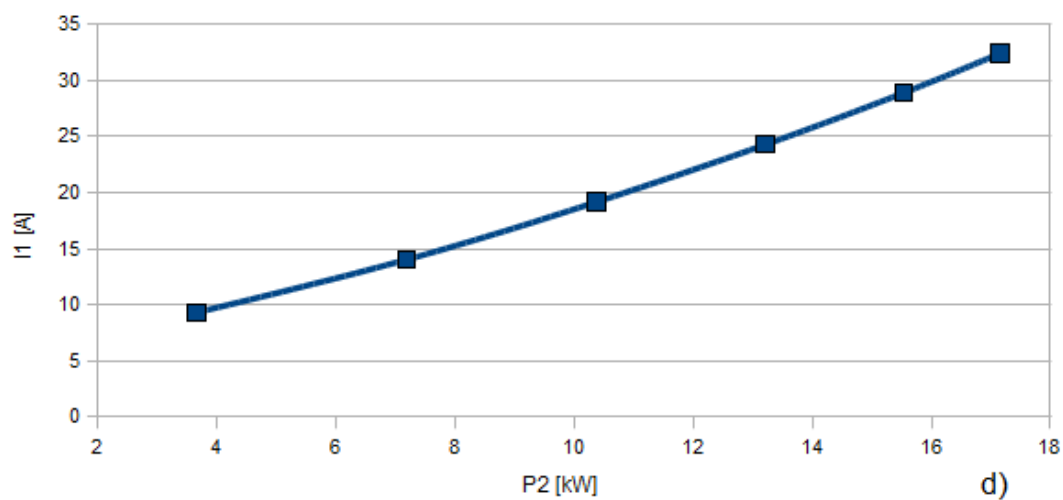


Obrázek 3. Průřez statorové a rotorové drážky

Příloha B

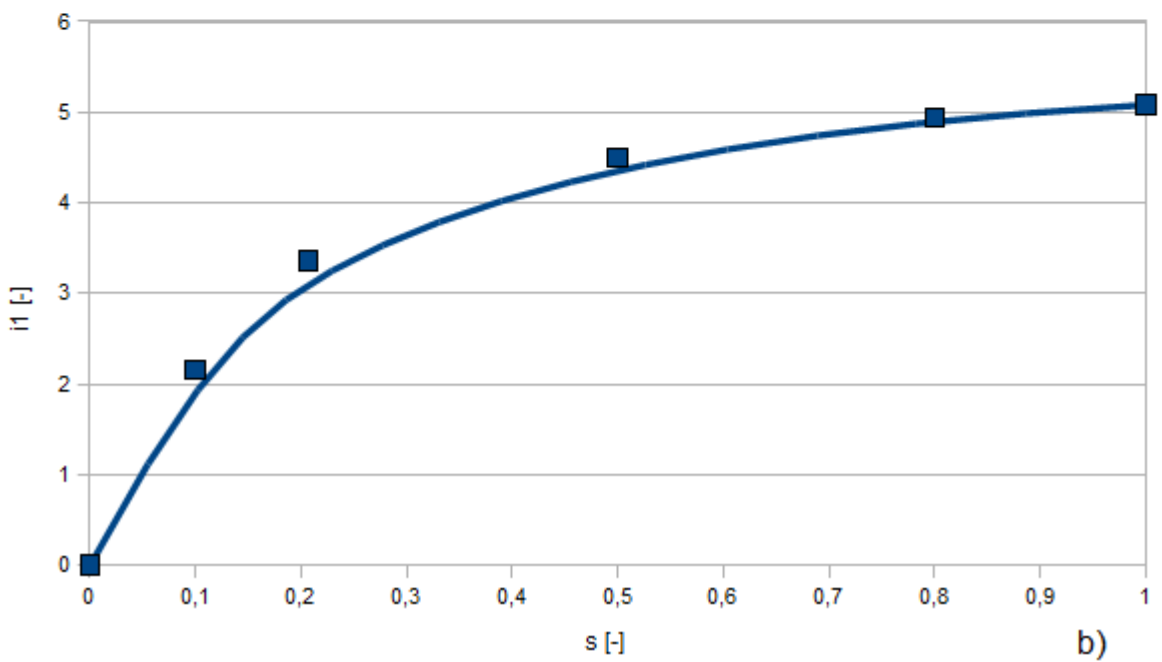
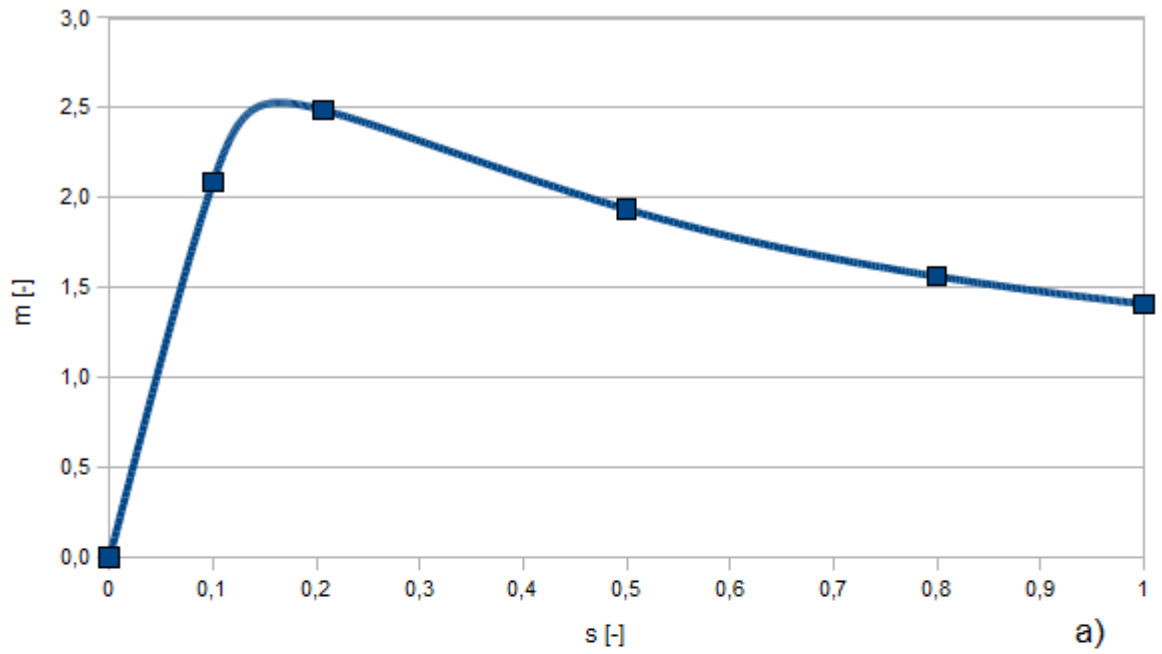


Obrázek 4. Zatěžovací charakteristiky



Obrázek 4. Pokračování

Příloha C



Obrázek 5. Rozběhové charakteristiky