

**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: 2017/2018

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

Jméno a příjmení: **Petr ČURDA**  
Osobní číslo: **E15B0044P**  
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:  
 $P = 120\text{kW}$ ,  $U = 400\text{ V}$ ,  $2p = 8$ ,  $m = 3$ , IP23,  $f=50\text{ Hz}$ .
2. Sestrojte kružnicový diagram, momentovou charakteristiku a určete další parametry stroje.
3. Nakreslete schématicky podélný a příčný řez stroje.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího  
Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran  
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická  
Seznam odborné literatury:

1. I.P.Kopylov: Stavba elektrických strojů.
2. KEV/SES1,2 Červený J.: Stavba elektrických strojů, portál ZCU, Courseware 2012.

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

Datum zadání bakalářské práce: 10. října 2017  
Termín odevzdání bakalářské práce: 7. června 2018

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



  
Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 10. října 2017

## Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na elektromagnetický návrh trojfázového asynchronního motoru s klecí nakrátko o parametrech:  $P = 120 \text{ kW}$ ,  $U = 400 \text{ V}$ ,  $2p = 8$ ,  $m = 3$ , IP23,  $f = 50 \text{ Hz}$ . Návrh stroje je proveden podle zadaných parametrů. Obsahem práce je určení hlavních parametrů stroje a geometrického uspořádání statoru a rotoru. Dále je uveden výpočet magnetického obvodu, odporů a reaktancí obou vinutí. Součástí práce je také stanovení celkových ztrát, účinnosti motoru, proudu a účinníku v chodu naprázdno a nakrátko. V závěru práce je na základě vypočtených hodnot sestrojen kružnicový diagram, z něhož je následně odvozena momentová charakteristika a určeny další parametry stroje. V příloze je schematicky nakreslen podélný a příčný řez stroje.

## Klíčová slova

Elektromagnetický návrh, vinutí, magnetický tok, elektromagnetická indukce, stator, rotor, vzduchová mezera, proudová hustota, klec nakrátko, magnetický obvod, odpor, ztráty, kružnicový diagram, momentová charakteristika

## **Abstract**

The thesis deals with electromagnetic design of the induction machine with squirrel-cage with parameters:  $P = 120 \text{ kW}$ ,  $U = 400 \text{ V}$ ,  $2p = 8$ ,  $m = 3$ , IP23,  $f = 50\text{Hz}$ . The design of the machine is made according to specified parameters. The goal of the thesis is determination of the main parameters of the machine and geometric layout of stator and rotor. In addition, the magnetic circuit, resistance and reactance of both winding types are calculated. The thesis also contains the determination of the total losses, efficiency of the motor, the current and the power factor in the idle and short run. In conclusion a circle diagram based on the calculated values is constructed and subsequently the torque characteristic and other parameters are derived from it. A schematic longitudinal and cross section of the machine is drawn in the appendix of this thesis.

## **Key words**

Electromagnetic design, winding, magnetic flux, electromagnetic induction, stator, rotor, air gap, current density, squirrel cage, magnetic circuit, resistance, losses, circle diagram, torque characteristic.

## **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 7.6.2018

Petr Čurda

## **Poděkování**

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Josefu Červenému, CSc. z katedry elektromechaniky a výkonové elektroniky za cenné rady, připomínky a čas trávený konzultacemi nad mou prací.

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>1 ZADANÉ PARAMETRY NAVRHOVANÉHO STROJE</b> .....	<b>10</b>
<b>2 URČENÍ HLAVNÍCH ROZMĚRŮ STROJE</b> .....	<b>10</b>
<b>3 POČET DRÁŽEK, POČET ZÁVITŮ A PRŮŘEZ VODIČE STATOROVÉHO VINUTÍ</b> .....	<b>12</b>
<b>4 VÝPOČET ROZMĚRŮ DRÁŽEK A ZUBŮ STATORU</b> .....	<b>15</b>
<b>5 VOLBA VZDUCHOVÉ MEZERY</b> .....	<b>18</b>
<b>6 VÝPOČET ROTORU</b> .....	<b>18</b>
<b>7 PARAMETRY MAGNETICKÉHO OBVODU</b> .....	<b>22</b>
<b>8 URČENÍ ODPORŮ A REAKTANCÍ ASYNCHRONNÍHO MOTORU</b> .....	<b>25</b>
8.1 ODPOR.....	25
8.1.1 Stator.....	25
8.1.2 Rotor.....	27
8.2 ROZPTYLOVÁ REAKTANCE.....	27
8.2.1 Stator.....	27
8.2.2 Rotor.....	29
<b>9 VÝPOČET ZTRÁT A ÚČINNOSTI MOTORU</b> .....	<b>30</b>
9.1 HLAVNÍ ZTRÁTY V ŽELEZE.....	30
9.2 DODATEČNÉ ZTRÁTY V ŽELEZE.....	31
9.2.1 Povrchové ztráty.....	31
9.2.2 Pulsní ztráty.....	32
9.3 CELKOVÉ ZTRÁTY V ŽELEZE ASYNCHRONNÍHO MOTORU.....	34
9.4 ZTRÁTY VE VINUTÍ MOTORU.....	34
9.5 MECHANICKÉ ZTRÁTY.....	34
9.6 DODATEČNÉ ZTRÁTY PŘI ZATÍŽENÍ.....	34
9.7 CELKOVÉ ZTRÁTY ASYNCHRONNÍHO STROJE S KLECÍ NAKRÁTKO.....	35
9.8 ÚČINNOST ASYNCHRONNÍHO MOTORU.....	35
<b>10 URČENÍ PROUDŮ A ÚČINÍKŮ</b> .....	<b>35</b>
10.1 CHOD NAPRÁZDNO.....	35
10.2 CHOD NAKRÁTKO.....	36
<b>11 KRUŽNICOVÝ DIAGRAM ASYNCHRONNÍHO MOTORU</b> .....	<b>36</b>
11.1 POSTUP KONSTRUKCE KRUŽNICOVÉHO DIAGRAMU.....	37
11.2 DALŠÍ PARAMETRY STROJE ODEČTENÉ Z KRUŽNICOVÉHO DIAGRAMU.....	40
<b>12 MOMENTOVÁ CHARAKTERISTIKA ASYNCHRONNÍHO MOTORU</b> .....	<b>41</b>
12.1 POSTUP KONSTRUKCE MOMENTOVÉ CHARAKTERISTIKY.....	41
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>43</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b> .....	<b>44</b>
<b>PŘÍLOHY</b> .....	<b>1-2</b>



## Úvod

Tato bakalářská práce se věnuje elektromagnetickému návrhu trojfázového asynchronního motoru s kotvou nakrátko o výkonu 120 kW, synchronní rychlosti 750 otáček za minutu, krytím IP23 a napětí 400 V.

Text je rozdělen do několika částí, přičemž největší část je věnována vlastnímu návrhu stroje včetně všech hlavních rozměrů statoru a rotoru, výpočtu magnetického obvodu, odporů, reaktancí, proudů a ztrát v motoru. Ve zbylé části je popsána konstrukce kružnicového diagramu, následné odvození momentové charakteristiky a nakreslen schematický nákres motoru v podélné a příčné poloze.

Asynchronní motor je v dnešní době nejpoužívanější točivý stroj v elektrotechnice. Má řadu výhod, například je velmi spolehlivý, téměř bezúdržbový, poměrně levný na výrobu, má jednoduchou konstrukci a dá se vyrobit ve velmi širokém rozmezí výkonů.

Skládá se ze dvou hlavních částí. Stator je netočivá část pevně spojená s kostrou stroje a je složena z tenkých navzájem odizolovaných plechů, které tvoří dutý válec. Na vnitřní straně jsou drážky, do kterých se vkládá trojfázové nebo jednofázové vinutí. Rotor je točivá část, která má drážky na vnějším povrchu. Vkládá se do nich vinutí z vodičů v případě kroužkových motorů nebo se vinutí odlévá z různého materiálu, jde-li o motory klecové.

Princip činnosti je založen na vzájemném působení dvou magnetických polí. První vzniká na statoru vlivem proudů, které protékají vinutím, a druhé je vytvořeno indukovanými proudy do rotoru. Ty vytvoří magnetický tok, který reaguje s točivým polem statoru a rotor se roztočí.

Největší nevýhodou asynchronních motorů je velmi vysoký záběrný proud, který může dosahovat čtyřnásobek až osminásobek proudu jmenovitého. Existuje několik možností, jak tento proud omezit, například: přepínač hvězda – trojúhelník, autotransformátor nebo softstartér. Mezi moderní metody patří tzv. frekvenční měnič, kterým lze měnit napájecí frekvenci statoru a dosáhnout tím plynulého rozběhu motoru. Kroužkové motory se dají rozbíhat pomocí odporů, které se přes kroužky připojují na rotor a po rozběhu se zkratují. Tato regulace je značně nevhodná, protože energie se na odporech mění na teplo.

Asynchronní motory můžeme brzdít několika způsoby. Dynamickým brzděním, které spočívá v připojení stejnosměrného proudu na statorové vinutí, nebo protiproudem, což je velmi ztrátové a protékají při tom velké proudy. Nejlepší a nejvhodnější způsob brzdění je tzv. rekuperace, při které se energie vrací zpět do napájecí sítě.

## 1 Zadané parametry navrhovaného stroje

$$P = 120 \text{ kW}$$

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

$$2p = 8$$

$$m = 3$$

krytí IP23

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

## 2 Určení hlavních rozměrů stroje

Elektromagnetický návrh asynchronního motoru začíná volbou hlavních rozměrů stroje, tedy vnitřního průměru statoru  $D$  a ideální délky vzduchové mezery  $l_i$ . Tyto rozměry jsou vázány s výkonem, úhlovou rychlostí a elektromagnetickým zatížením tzv. *strojovou konstantou*

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

kde:

$D$  je vnitřní průměr statoru (m)

$l_i$  je délka vzduchové mezery (m)

$\omega_s$  je úhlová rychlost (rad/s)

$P_i$  je vnitřní výkon stroje (W)

$A$  je lineární hustota proudu (A/m)

$B_\delta$  je indukce ve vzduchové mezeře (T)

$\alpha_\delta, k_B, k_v$  jsou činitelé.

Pro zadaný výkon a počet pólových dvojic se podle obr. 6.7b [1] zvolí předběžná výška osy  $h = 320 \text{ mm}$ . Z tabulky 6.6 [1] volím nejbližší nižší hodnotu, tedy  $h = 315 \text{ mm}$ . Vnější průměr statoru určíme ze spodního řádku tabulky 6.6 [1] tak, aby odpovídal zvolené výšce osy motoru. Vnější průměr statoru tedy potom bude  $D_e = 0,590 \text{ m}$ .

Pro určení vnitřního průměru statoru  $D$  se používají empirické závislosti, z kterých vyplývá, že výška  $j_{ha}$  statoru je přímo úměrná magnetickému toku a nepřímo úměrná počtu

pólů stroje. Koeficient  $K_D$ , který charakterizuje poměr vnitřního a vnějšího průměru statoru, volím z tabulky 6.7 [1], tedy  $K_D = 0,74$ .

Vnitřní průměr statoru potom bude

$$D = K_D D_e = 0,74 \cdot 0,590 = 0,437 \text{ m} \quad (2)$$

Pólová rozteč se stanoví ze vztahu

$$t_p = \frac{\pi D}{2p} = \frac{\pi \cdot 0,437}{8} = 0,172 \text{ m} \quad (3)$$

Vnitřní výpočtový výkon je

$$P_i = mIU_i = P_2 \frac{k_E}{\eta \cos \varphi} = 120 \cdot 10^3 \cdot \frac{0,97}{0,93 \cdot 0,86} = 145536 \text{ VA} \quad (4)$$

kde:

$P_2$  je jmenovitý výkon na hřídeli motoru (W)

$k_E$  je poměr indukovaného napětí vinutí statoru k jmenovitému napětí. Určí se z obr. 6.8 [1].

Mně pro zvolené  $D_e$  a zadaný počet pólů stroje vyšel  $k_E = 0,97$ .

Účinník  $\cos \varphi = 0,86$  a účinnost  $\eta = 0,93$  jsou pro zadaný výkon odečteny z obr. 6.10 [1].

Předběžná elektromagnetická zatížení, tj. lineární hustota proudu  $A$  (A/m) a indukce ve vzduchové mezeře  $B_\delta$  (T), se určí z obr. 6.12b [1]. Volím  $A = 46\,000 \text{ A/m}$  a  $B_\delta = 0,845 \text{ T}$ .

Činitel pólového krytí  $\alpha_\delta$  a činitel tvaru pole  $k_B$  se dostatečně přesně mohou vypočítat až po výpočtu magnetického obvodu. Proto se hodnoty těchto činitelů předběžně volí

$$\alpha_\delta = \frac{2}{\pi} \doteq 0,64 \quad (5)$$

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

Předběžná hodnota činitele statorového vinutí  $k_{vI}$  se pro dvouvrstvá vinutí s větším počtem pólů volí v rozmezí 0,91 až 0,92 [1]. Volím  $k_{vI} = 0,92$ .

Synchronní úhlová rychlost hřídele motoru  $\omega_s$  s respektováním počtu pólů motoru je dána vztahem

$$\omega_s = 2\pi \frac{f_1}{p} = 2\pi \frac{50}{4} = 78,5 \text{ rad/s} \quad (7)$$

Ideální délku vzduchové mezery s respektováním činitele pólového krytí  $\alpha_\delta$  vyjádříme z rovnice (1)

$$l_i = \frac{P_i}{D^2 \omega_s k_B k_{v1} A B_\delta} = \frac{145536}{0,437^2 \cdot 78,5 \cdot 1,11 \cdot 0,92 \cdot 46000 \cdot 0,845} = 0,245 \text{ m} \quad (8)$$

Správnost volby rozměrů  $D$  a  $l_i$  nám udává štíhlostní poměr

$$\lambda = \frac{l_i}{t_p} = \frac{0,245}{0,172} = 1,42 \quad (9)$$

Ten by se měl pohybovat v rozmezí podle obr. 6.14b [1]. Pokud by nevyšel v tomto pásmu, je potřeba zvětšit výšku osy  $h$  podle normalizované řady. V mém případě štíhlostní poměr leží v doporučeném rozmezí.

### 3 Počet drážek, počet závitů a průřez vodiče statorového vinutí

Návrh asynchronního motoru pokračuje určením počtu drážek statoru  $Q_1$  a počtu závitů v sérii jedné fáze statorového vinutí  $N_1$ . Počet závitů by měl být takový, aby lineární hustota proudu  $A$  a indukce ve vzduchové mezeře  $B_\delta$  víceméně souhlasily s hodnotami, které byly zvoleny při výpočtu hlavních rozměrů stroje. U strojů o výkonech větších než 100 kW se cívky vyrábějí z vodiče s pravoúhlým průřezem, které se potom vkládají do drážek s rovnoběžnými boky. Z tabulky 6.9 [1] zvolíme minimální a maximální hodnotu drážkové rozteče  $t_{d1min} = 17 \text{ mm}$  a  $t_{d1max} = 22 \text{ mm}$ . Rozmezí počtu statorových drážek potom bude

$$Q_{1min} \text{ až } Q_{1max} = \frac{\pi D}{t_{d1max}} \text{ až } \frac{\pi D}{t_{d1min}} = \frac{\pi \cdot 437}{22} \text{ až } \frac{\pi \cdot D}{17} = 62 \text{ až } 81 \quad (10)$$

Volím  $Q_1 = 72$ , protože počet drážek statoru musí být dělitelný počtem fází a zároveň počet drážek statoru na pól a fázi  $q = Q_1/2pm$  by měl být vyjádřen celým číslem. V mém případě

$$q = \frac{Q_1}{2pm} = \frac{72}{8 \cdot 3} = 3 \quad (11)$$

Konečná hodnota drážkové rozteče

$$t_{d1} = \frac{\pi D}{2pmq} = \frac{\pi \cdot 437}{8 \cdot 3 \cdot 3} = 19,07 \text{ mm} \quad (12)$$

Jmenovitý proud vinutím statoru

$$I_{1N} = \frac{P_2}{mU_N \eta \cos \varphi} = \frac{120000}{3 \cdot 230 \cdot 0,93 \cdot 0,86} = 217,4 \text{ A} \quad (13)$$

Počet efektivních vodičů v drážce  $V_d$  musí být celé číslo a u dvouvrstvého vinutí navíc musí být dělitelné dvěma. Proto vypočtené  $V_d$  musíme zaokrouhlit na nejbližší celé sudé číslo. Aby zaokrouhlení nebylo moc výrazné, určí se nejdříve předběžný počet efektivních vodičů v drážce  $V'_d$  pro počet paralelních větví  $a = 1$ .

$$V'_d = \frac{\pi DA}{I_{1N} Q_1} = \frac{\pi \cdot 0,437 \cdot 46000}{217,4 \cdot 72} = 4,03 \quad (14)$$

Volím hodnotu  $a = 4$  a výsledný počet efektivních vodičů v drážce potom bude

$$V_d = aV'_d = 4 \cdot 4,03 = 16,12 \doteq 16 \quad (15)$$

Konečný počet vodičů ve fázi vinutí

$$N_1 = \frac{V_d Q_1}{2am} = \frac{16 \cdot 72}{2 \cdot 4 \cdot 3} = 48 \quad (16)$$

Konečná lineární hustota proudu

$$A = \frac{2mN_1 I_{1N}}{\pi D} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 48 \cdot 217,4}{\pi \cdot 0,437} = 45606 \text{ A/m} \quad (17)$$

Při volbě typu statorového vinutí musíme brát zřetel hlavně na výkon stroje. Motory s výkonem do 12 až 15 kW mívají většinou jednovrstvé soustředné vinutí. Vinutí větších strojů a vinutí zhotovená z pásů bývají většinou dvouvrstvá. Činitel statorového vinutí  $k_{v1}$  je dán vztahem

$$k_{v1} = k_r k_y = 0,96 \cdot 0,98 = 0,94 \quad (18)$$

kde:

$k_r$  je činitel rozlohy a vypočte se ze vztahu

$$k_r = \frac{0,5}{q \sin \frac{30^\circ}{q}} = \frac{0,5}{3 \cdot \sin \frac{30^\circ}{3}} = 0,96 \quad (19)$$

$k_y$  je činitel zkrácení kroku a určí se vzorcem

$$k_y = \sin \left( \frac{y_d}{Q_p} \cdot \frac{\pi}{2} \right) = \sin \left( \frac{8}{9} \cdot \frac{\pi}{2} \right) = 0,98 \quad (20)$$

kde:

$y_d$  je cívkový krok, který volím o jednu drážkovou rozteč menší, než je počet drážek na pól, tedy  $y_d = 8$ . Činím tak zejména proto, abych omezil vliv 5., 7. a 11. harmonické. Počet drážek na pól  $Q_p$  se dá vyjádřit vztahem

$$Q_p = \frac{Q_1}{2p} = \frac{72}{8} = 9 \quad (21)$$

Zkrácení kroku  $\beta$  potom bude

$$\beta = \frac{y_d}{Q_p} = \frac{8}{9} = 0,89 \quad (22)$$

Magnetický tok

$$\Phi = \frac{k_E U_{1N}}{4k_B N_1 f_1 k_{v1}} = \frac{0,97 \cdot 230}{4 \cdot 1,11 \cdot 48 \cdot 50 \cdot 0,94} = 0,022 \text{ Wb} \quad (23)$$

Konečná magnetická indukce ve vzduchové mezeře

$$B_\delta = \frac{\Phi}{\alpha_\delta t_p l_i} = \frac{0,022}{0,64 \cdot 0,172 \cdot 0,245} = 0,816 \text{ T} \quad (24)$$

Hodnota  $A$  leží v doporučeném pásmu podle obr. 6.12b [1] a  $B_\delta$  přesahuje meze daného rozmezí pouze o 3 %, tudíž je v toleranci, která je  $\pm 5$  %.

Předběžná hustota proudu statorového vinutí

$$J'_1 = \frac{(AJ)}{A} = \frac{225 \cdot 10^9}{45606} = 4,934 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2 \quad (25)$$

kde:

( $AJ$ ) je tzv.  $AJ$ -kritérium pro asynchronní stroje různých provedení a výkonů. Hodnotu jsem odečetl z obr. 6.16e [1].

Průřez efektivního vodiče se poté určí vztahem

$$S_{ef1} = \frac{I_{1N}}{aJ'_1} = \frac{217,4}{4 \cdot 4,934 \cdot 10^6} = 11 \text{ mm}^2 \quad (26)$$

Vypočtený průřez pasového vodiče může mít poměr šířky k tloušťce různý, a proto se výsledný tvar vodiče pro vinutí volí současně s výpočtem rozměrů drážek a zubů statoru.

## 4 Výpočet rozměrů drážek a zubů statoru

Rozměry drážek se volí tak, aby plocha drážky odpovídala počtu a rozměr vodičů, které v ní budou uloženy (i s ohledem na izolaci). Při výpočtu se také musí brát ohled na rozmezí hodnot magnetických indukcí v zubech a jhu statoru. Pásové vinutí se ukládá do drážek s rovnoběžnými stěnami. Pro statorové vinutí volím otevřenou drážku typu M. Předběžná dovolená indukce jha  $B_{j1}$  a zubů  $B_{z1max}$  statoru se odečte z tabulky 6.10 [1]. Mému zadání odpovídá  $B_{j1} = 1,2 \text{ T}$  a  $B_{z1max} = 1,85 \text{ T}$ .

Výška statorového jha

$$h_{j1} = \frac{\Phi}{2B_{j1}l_{Fe1}k_{Fe}} = \frac{0,022}{2 \cdot 1,2 \cdot 0,245 \cdot 0,95} = 39,38 \text{ mm} \quad (27)$$

kde:

$l_{Fe1}$  je aktivní délka statorového svazku a pro asynchronní motory bez radiálních ventilačních kanálů platí  $l_{Fe1} = l_i = l_l$

$k_{Fe}$  je činitel plnění železa a podle tabulky 6.11[1] volím  $k_{Fe} = 0,95$ .

Šířka zubu statoru

$$b_{z1} = \frac{B_{\delta}t_{d1}l_i}{B_{z1max}l_{Fe1}k_{Fe}} = \frac{0,816 \cdot 0,01907 \cdot 0,245}{1,85 \cdot 0,245 \cdot 0,95} = 8,85 \text{ mm} \quad (28)$$

Hloubka drážky statoru

$$h_{d1} = \frac{D_e - D}{2} - h_{j1} = \frac{590 - 437}{2} - 39,38 = 37,12 \text{ mm} \quad (29)$$

Šířka statorové drážky

$$b_{d1} = t_{d1} - b_{z1} = 19,07 - 8,85 = 10,22 \text{ mm} \quad (30)$$

Šířka vodiče  $b_v$  v drážce musí být menší než šířka drážky  $b_d$  o tloušťku izolace vodičů a drážkové izolace tak, jak jsou pro dané vinutí navrženy ( $2b_i$ ), a o vůli, která se uvažuje na složení vinutí  $\Delta b_d$ . Izolace vodičů je navržena v tloušťce 0,3 mm na každou stranu, drážková izolace má tloušťku 0,4 mm, vyložení drážky je 0,15 mm a vůli na složení uvažují 0,3 mm.

$$b_{v1} = b_{d1} - 2b_i - \Delta b_d = 10,22 - 2 \cdot 0,85 - 0,3 = 8,22 \text{ mm} \quad (31)$$

Konečná šířka vodiče je volena z normalizovaných rozměrů pásu, které jsou uvedeny v tabulce D 3.2 [1]. Šířku vodiče volím  $b_v = 8 \text{ mm}$ , tomu odpovídá výška  $h_v = 1,4 \text{ mm}$  a výsledný průřez vodiče bude  $S_v = 10,99 \text{ mm}^2$ . Konečná šířka drážky potom bude  $b_d = 10 \text{ mm}$ .

Skutečná proudová hustota statorového vinutí je tedy

$$J_1 = \frac{I_{1N}}{aS_v} = \frac{217,4}{4 \cdot 10,99 \cdot 10^{-6}} = 4,945 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2 \quad (32)$$

Na bočních stranách horní části otevřené drážky je vybrání pro zasunutí drážkového klínu. Podle použitého typu klínu je hloubka a výška tohoto vybrání normalizována normou ČSN 35 0868, jejíž výpis je uveden v tabulce D 4.1d [1]. Klínu typu M odpovídají rozměry drážkového vybrání  $h_0 = 0,7 \text{ mm}$ ,  $h_1 = 4 \text{ mm}$  a  $x_1 = 1,4 \text{ mm}$ .

Aktivní hloubka drážky potom bude

$$h_{da} = h_{d1} - h_1 - h_0 = 37,12 - 4 - 0,7 = 32,42 \text{ mm} \quad (33)$$

Z tohoto rozměru je zřejmé, že při uvažování výšky všech vodičů a jejich izolací, drážkové izolace, mezivrstvé podložky, vyložení drážky a přídavku na skládání  $\Delta h_d$ , je aktivní hloubka drážky příliš malá. Proto volím konečnou hloubku drážky  $h_{d1} = 42 \text{ mm}$  a aktivní hloubka drážky potom bude  $h_{da} = 37,3 \text{ mm}$ .

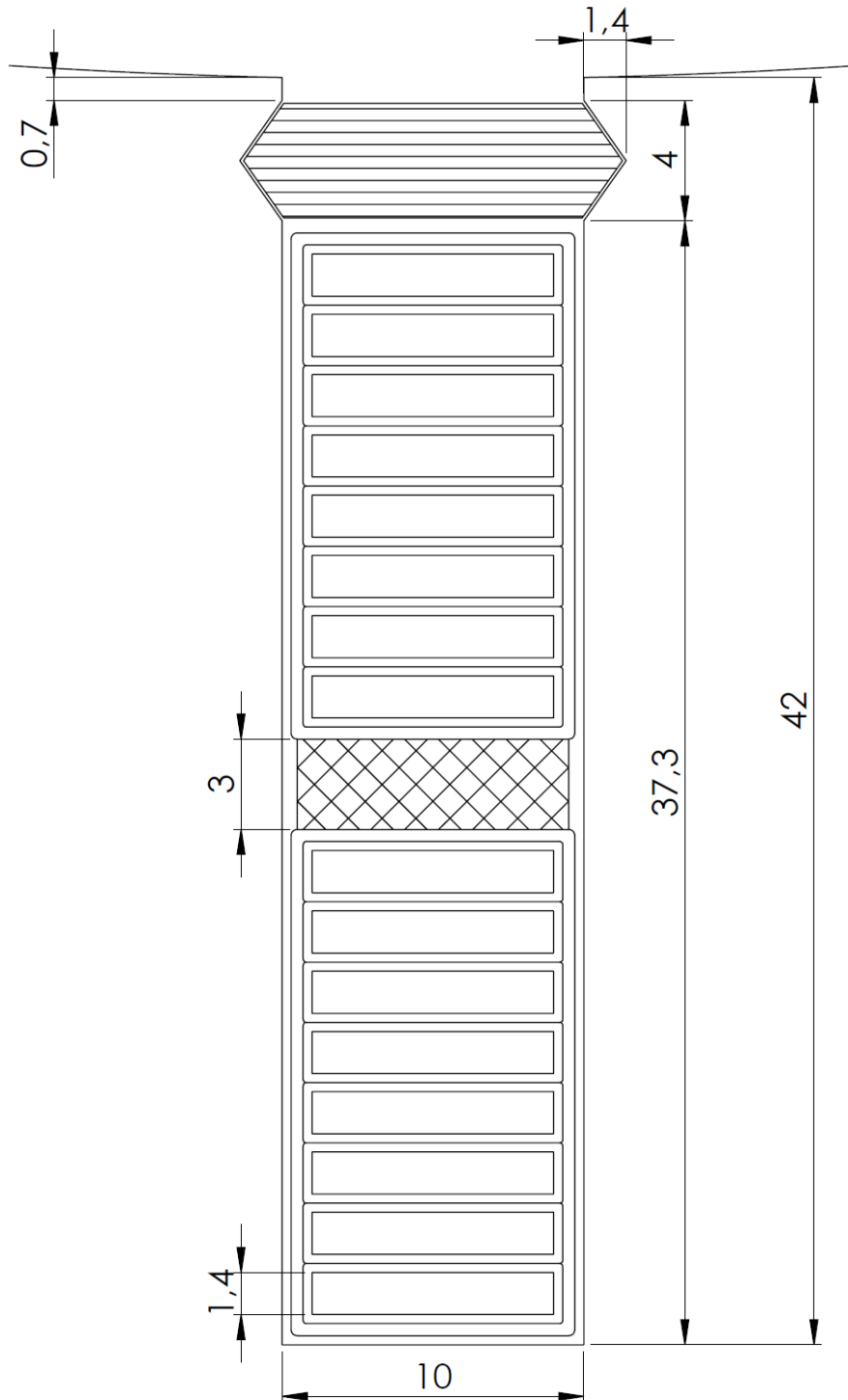
Po určení všech rozměrů statorové drážky se počítá šířka zubu  $b_{z1min}$  a  $b_{z1max}$ .

$$b_{z1min} = t_{d1} - b_d = 19,07 - 10 = 9,07 \text{ mm} \quad (34)$$



$$b_{z1max} = t_{d1} \left( 1 + \frac{2h_{d1}}{D} \right) - b_d = 19,07 \cdot \left( 1 + \frac{2 \cdot 42}{437} \right) - 10 = 12,74 \text{ mm} \quad (35)$$

Výška zubu  $h_z$  je u drážek s rovnoběžnými stěnami stejná jako hloubka drážky  $h_{d1}$ . Tedy  $h_z = h_{d1} = 42 \text{ mm}$ .



Obr. 1: Průřez statorovou drážkou

## 5 Volba vzduchové mezery

Správná šířka vzduchové mezery  $\delta$  výrazně ovlivňuje energetické vlastnosti asynchronního stroje. Čím menší vzduchová mezera je, tím menší je magnetomotorické napětí i magnetizační proud motoru. To vede k zvětšení  $\cos \varphi$  a k zmenšení ztrát ve vinutí statoru. Ovšem při neúměrném zmenšování  $\delta$  narůstají amplitudy pulsací indukce ve vzduchové mezeře a účinnost motoru klesá. Pro motory o středních a velkých výkonech se vzduchová mezera počítá podle empirického vzorce

$$\delta = \frac{D}{1,2} \left(1 + \frac{9}{2p}\right) 10^{-3} = \frac{437}{1,2} \cdot \left(1 + \frac{9}{8}\right) \cdot 10^{-3} = 0,77 \text{ mm} \quad (36)$$

Šířku vzduchové mezery zaokrouhluji na nejbližší rozměr zaokrouhlený na desetiny milimetru, tedy  $\delta = 0,8 \text{ mm}$ .

## 6 Výpočet rotoru

Rotorové vinutí nakrátko obvykle nemá určitý počet fází a pólů, jak je tomu u všech ostatních vinutí. U asynchronních motorů se obvykle doporučuje volit  $Q_2 < Q_1$ . Počet nenatočených drážek rotorového vinutí volím  $Q_2 = 58$  podle doporučení v tabulce 6.15 [1].

Vnější průměr rotoru

$$D_2 = D - 2\delta = 0,437 - 2 \cdot 0,0008 = 0,4354 \text{ m} \quad (37)$$

Délka rotoru je stejná jako délka statoru nebo jako vzduchové mezery, tedy  $l_2 = l_1 = l_i = 0,245 \text{ m}$ .

Drážková rozteč rotoru

$$t_{d2} = \frac{\pi D_2}{Q_2} = \frac{\pi \cdot 435,4}{58} = 23,58 \text{ mm} \quad (38)$$

Vnitřní průměr rotoru je stejný jako průměr hřídele, protože rotorový svazek je přímo nasazen na hřídel.

$$D_i = D_h = k_h D_e = 0,23 \cdot 0,590 = 0,1357 \text{ m} \doteq 136 \text{ mm} \quad (39)$$

kde:

$k_h$  je činitel zvolený z tabulky 6.16 [1] v závislosti na počtu pólů a výšce osy motoru.

Činitel přepočtu proudů pro výpočet proudu v jedné tyči je

$$p_i = \frac{2m_1 N_1 k_{v1}}{Q_2} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 48 \cdot 0,94}{58} = 4,668 \quad (40)$$

Proud rotorovou tyčí potom bude

$$I_2 = k_i I_1 p_i = 0,89 \cdot 217,4 \cdot 4,668 = 903,19 \text{ A} \quad (41)$$

kde:

$k_i$  je činitel odečtený z obr. 6.22 [1] pro  $\cos \varphi = 0,86$ .

Rotorová proudová hustota  $J_2$  se u tyčí odlévaných z hliníku volí u uzavřených motorů v rozmezí  $(2,5 \text{ až } 3,5) \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$  a u otevřených ještě o 10 až 15 % větší. Pro velké stroje se doporučuje volit hustotu proudu na dolní hranici, proto volím  $J_2 = 2,5 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$ .

Průřez rotorové tyče se pak určí ze vztahu

$$S_t = \frac{I_2}{J_2} = \frac{903,19}{2,5 \cdot 10^6} = 361,28 \text{ mm}^2 \quad (42)$$

Pro rotor volím uzavřenou drážku typu V podle obr. 6.27b [1] s rozměry  $b_0 = 1,5 \text{ mm}$ ,  $h_0 = 0,7 \text{ mm}$  a výška můstku nad drážkou pro stroje s  $2p \geq 4$  r  $h_0' = 0,3 \text{ mm}$ . Další rozměry drážky se počítají z průřezu tyče  $S_t$ .

Šířka rotorového zubu je omezena dovolenou magnetickou indukcí  $B_{z2}$ , která je uvedena v tabulce 6.10 [1]. Volím  $B_{z2} = 1,89 \text{ T}$ .

$$b_{z2} = \frac{B_{z2} t_{d2} l_2}{B_{z2} l_{Fe2} k_{Fe}} = \frac{0,816 \cdot 0,02358 \cdot 0,245}{1,89 \cdot 0,245 \cdot 0,95} = 10,72 \text{ mm} \quad (43)$$

Průměr horního zaoblení

$$b_1 = \frac{\pi(D_2 - 2h_0 - 2h_0') - Q_2 b_{z2}}{\pi + Q_2} = \frac{\pi(435,4 - 2 \cdot 0,7 - 2 \cdot 0,3) - 58 \cdot 10,72}{\pi + 58} = 12,1 \text{ mm} \quad (44)$$

Průměr spodního zaoblení

$$b_2 = \sqrt{\frac{b_1^2 \left( \frac{Q_2}{\pi} + \frac{\pi}{2} \right) - 4S_t}{\frac{Q_2}{\pi} - \frac{\pi}{2}}} = \sqrt{\frac{12,1^2 \cdot \left( \frac{58}{\pi} + \frac{\pi}{2} \right) - 4 \cdot 361,28}{\frac{58}{\pi} - \frac{\pi}{2}}} = 9,4 \text{ mm} \quad (45)$$

Vzdálenost mezi středy zaoblení

$$h_1 = (b_1 - b_2) \frac{Q_2}{2\pi} = (12,1 - 9,4) \cdot \frac{58}{2\pi} = 24,9 \text{ mm} \quad (46)$$

Celková hloubka drážky

$$h_{d2} = h'_0 + h_0 + \frac{b_1}{2} + h_1 + \frac{b_2}{2} = 0,3 + 0,7 + \frac{12,1}{2} + 24,9 + \frac{9,4}{2} = 36,65 \text{ mm} \quad (47)$$

Konečný průřez rotorové tyče po zaokrouhlení rozměrů drážek je

$$\begin{aligned} S_t &= \frac{\pi}{8} (b_1^2 + b_2^2) + \frac{1}{2} (b_1 + b_2) h_1 = \\ &= \frac{\pi}{8} (12,1^2 + 9,4^2) + \frac{1}{2} (12,1 + 9,4) \cdot 24,9 = 359,87 \text{ mm}^2 \end{aligned} \quad (48)$$

Konečná proudová hustota v rotorové tyči

$$J_t = \frac{I_2}{S_t} = \frac{903,19}{359,87 \cdot 10^{-6}} = 2,51 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2 \quad (49)$$

Proud tekoucí kruhem nakrátko

$$I_{kn} = \frac{I_2}{\Delta} = \frac{903,19}{0,43} = 2100,4 \text{ A} \quad (50)$$

kde:

$$\Delta = 2 \sin \frac{\pi p}{Q_2} = 2 \sin \frac{\pi \cdot 4}{58} = 0,43 \quad (51)$$

Proudová hustota  $J_{kn}$  v kruhu nakrátko se obvykle volí o 15 až 20 % menší než hustota v tyčích rotoru.  $J_{kn} = 0,85 \cdot J_t = 0,85 \cdot 2,51 \cdot 10^6 = 2,13 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$ .

Příčný průřez kruhu nakrátko

$$S_{kn} = \frac{I_{kn}}{J_{kn}} = \frac{2100,4}{2,13 \cdot 10^6} = 986,1 \text{ mm}^2 \quad (52)$$

Rozměry kruhu nakrátko klecového motoru znázorněné na obr. 6.26b [1] budou

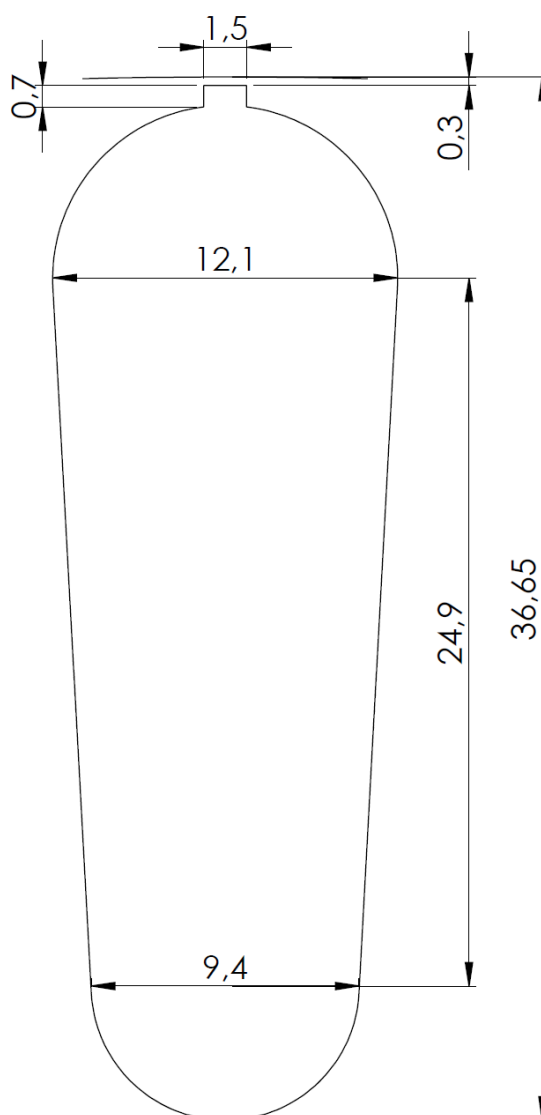
$$a_{kn} = 1,25 h_{d2} = 1,25 \cdot 36,65 = 45,81 \text{ mm} \quad (53)$$

$$b_{kn} = \frac{S_{kn}}{a_{kn}} = \frac{986,1}{45,81} = 21,53 \text{ mm} \quad (54)$$

Průměr rotorového kruhu nakrátko

$$D_{kn} = D_2 - b_{kn} = 435,4 - 21,53 = 413,87 \text{ mm} \quad (55)$$

U motorů s výškou osy  $h$  větší než 250 mm se do rotorového svazku razí axiální ventilační kanály pro zlepšení chlazení rotoru a zmenšení jeho hmotnosti a momentu setrvačnosti. V motorech s výškou osy  $h = 280$  až 355 mm se do jedné řady umísťuje 12 kanálů o průměru  $d_{vk2} = 20$  až 30 mm. Já volím  $d_{vk2} = 25$  mm.



Obr. 2: Průřez rotorovou drážkou

## 7 Parametry magnetického obvodu

Magnetický obvod se počítá pro chod naprázdno asynchronního motoru, protože je při něm poměrně silné nasycení zubů rotoru a statoru.

Magnetické indukce v jednotlivých částech zubu statoru

$$B_{z1min} = \frac{B_{\delta} t_{d1} l_i}{b_{z1min} l_{Fe1} k_{Fe}} = \frac{0,816 \cdot 0,01907 \cdot 0,245}{0,00907 \cdot 0,245 \cdot 0,95} = 1,81 \text{ T} \quad (56)$$

$$B_{z1max} = \frac{B_{\delta} t_{d1} l_i}{b_{z1max} l_{Fe1} k_{Fe}} = \frac{0,816 \cdot 0,01907 \cdot 0,245}{0,01274 \cdot 0,245 \cdot 0,95} = 1,29 \text{ T} \quad (57)$$

$$B_{z1av} = \frac{B_{z1min} + B_{z1max}}{2} = \frac{1,81 + 1,29}{2} = 1,55 \text{ T} \quad (58)$$

Magnetická indukce v zubu rotoru

$$B_{z2} = \frac{B_{\delta} t_{d2} l_i}{b_{z2} l_{Fe2} k_{Fe}} = \frac{0,816 \cdot 0,02358 \cdot 0,245}{0,01072 \cdot 0,245 \cdot 0,95} = 1,89 \text{ T} \quad (59)$$

Magnetická indukce ve jhu statoru

$$B_{j1} = \frac{\Phi}{2h'_{j1} l_{Fe1} k_{Fe}} = \frac{0,022}{2 \cdot 0,03938 \cdot 0,245 \cdot 0,95} = 1,2 \text{ T} \quad (60)$$

kde:

$h_{j1}'$  je výpočtová výška jha statoru a pro motory bez axiálních kanálů platí  $h_{j1}' = h_{j1}$ .

Magnetická indukce ve jhu rotoru

$$B_{j2} = \frac{\Phi}{2h'_{j2} l_{Fe2} k_{Fe}} = \frac{0,022}{2 \cdot 0,0964 \cdot 0,245 \cdot 0,95} = 0,49 \text{ T} \quad (61)$$

kde:

$h_{j2}'$  je výpočtová výška jha rotoru a určí se ze vztahu

$$\begin{aligned} h'_{j2} &= \frac{D_2 - D_i}{2} - h_{d2} - \frac{2}{3} d_{vk2} m_{vk2} = \\ &= \frac{0,4354 - 0,136}{2} - 0,03665 - \frac{2}{3} \cdot 0,025 \cdot 1 = 0,0964 \text{ m} \end{aligned} \quad (62)$$

Činitel vzduchové mezery, tzv. Carterův činitel

$$k_c = \frac{t_{d1} + 10\delta}{b_{d1} + 10\delta} = \frac{19,07 + 10 \cdot 0,8}{10 + 10 \cdot 0,8} = 1,5 \quad (63)$$

Magnetické napětí vzduchové mezery

$$U_\delta = \frac{2}{\mu_0} B_\delta \delta k_c = \frac{2}{4\pi \cdot 10^{-7}} \cdot 0,816 \cdot 0,0008 \cdot 1,5 = 1558,45 \text{ A} \quad (64)$$

kde:

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$$

Pro magnetický obvod volím ocel 2013 a z tabulky D 2.7 [1] jsem odečetl hodnoty  $H_{z1min} = 1570 \text{ A/m}$ ,  $H_{z1max} = 479 \text{ A/m}$  a  $H_{z1av} = 777 \text{ A/m}$ . Podle Simpsonova pravidla se intenzita při proměnném průřezu zubu statoru  $H_{z1}$ , tj. pro obdélníkové drážky, vypočte

$$H_{z1} = \frac{1}{6} (H_{z1max} + 4H_{z1av} + H_{z1min}) = \frac{1}{6} (479 + 4 \cdot 777 + 1570) = 859,5 \text{ A/m} \quad (65)$$

Magnetické napětí zubu statoru

$$U_{z1} = 2h_{z1}H_{z1} = 2 \cdot 0,042 \cdot 859,5 = 72,2 \text{ A} \quad (66)$$

kde:

$h_{z1}$  je výpočtová výška statorového zubu a u motorů s rovnoběžnými stěnami drážek platí

$$h_{z1} = h_d = 42 \text{ mm.}$$

Magnetické napětí zubu rotoru

$$U_{z2} = 2h_{z2}H_{z2} = 2 \cdot 0,03571 \cdot 2010 = 143,55 \text{ A} \quad (67)$$

kde:

$h_{z2}$  je výpočtová výška zubu rotoru a určí se ze vztahu  $h_{z2} = h_{d2} - 0,1b_2 = 36,65 - 0,1 \cdot 9,4 = 35,71 \text{ mm}$ .

$H_{z2} = 2010 \text{ A/m}$  je intenzita v zubu rotoru odečtená z tabulky D 2.7 [1].

Činitel nasycení zubů motoru

$$k_z = 1 + \frac{U_{z1} + U_{z2}}{U_\delta} = 1 + \frac{72,2 + 143,55}{1558,45} = 1,138 \quad (68)$$

Doporučená hodnota činitele nasycení je 1,2 až 1,5. Je-li  $k_z$  větší než 1,5, zuby jsou přesycovány, pokud je  $k_z$  menší než 1,2, železo zubů je nevyužito nebo je vzduchová mezera příliš velká. Má vypočtená hodnota se od doporučeného pásma liší o 5,2 %, což je v pořádku.

Střední délka indukční čáry ve jhu statoru

$$l_{j1} = \frac{\pi(D_e - h_{j1})}{2p} = \frac{\pi(590 - 39,38)}{8} = 216,23 \text{ mm} \quad (69)$$

Magnetické napětí jha statoru potom bude

$$U_{j1} = l_{j1}H_{j1} = 0,21623 \cdot 262 = 56,65 \text{ A} \quad (70)$$

kde:

$H_{j1} = 262 \text{ A/m}$  je intenzita magnetického pole jha statoru určená z tabulky D 2.6 [1]

Délka střední indukční čáry rotorového jha

$$l_{j2} = \frac{\pi(D_h + h_{j2})}{2p} = \frac{\pi(136 + 113,05)}{8} = 97,8 \text{ mm} \quad (71)$$

kde:

$h_{j2}$  je výška jha rotoru a určí se ze vztahu

$$h_{j2} = \frac{D_2 - D_i}{2} - h_{d2} = \frac{435,4 - 136}{2} - 36,65 = 113,05 \text{ mm} \quad (72)$$

Magnetické napětí jha rotoru se vypočte

$$U_{j2} = l_{j2}H_{j2} = 0,0978 \cdot 62 = 6,06 \text{ A} \quad (73)$$

kde:

$H_{j2} = 62 \text{ A/m}$  je intenzita magnetického pole jha rotoru určená z tabulky D 2.6 [1]

Celkové magnetické napětí na jednu pólovou dvojici je

$$\begin{aligned} F_m &= U_\delta + U_{z1} + U_{z2} + U_{j1} + U_{j2} = \\ &= 1558,45 + 72,2 + 143,55 + 56,65 + 6,06 = 1836,91 \text{ A} \end{aligned} \quad (74)$$



Činitel nasycení magnetického obvodu motoru

$$k_{\mu} = \frac{F_m}{U_{\delta}} = \frac{1836,91}{1558,45} = 1,18 \quad (75)$$

Magnetizační proud motoru

$$I_{\mu} = \frac{pF_m}{0,9m_1N_1k_{v1}} = \frac{4 \cdot 1836,91}{0,9 \cdot 3 \cdot 48 \cdot 0,94} = 60,31 \text{ A} \quad (76)$$

Poměrný magnetizační proud vztažený k proudu jmenovitému

$$i_{\mu} = \frac{I_{\mu}}{I_{1N}} = \frac{60,31}{217,4} = 0,28 \quad (77)$$

## 8 Určení odporů a reaktancí asynchronního motoru

### 8.1 Odpor

#### 8.1.1 Stator

Střední šířka cívky

$$b_c = \frac{\pi(D + h_d)}{2p} \beta_1 = \frac{\pi(0,437 + 0,042)}{8} \cdot 0,89 = 0,167 \text{ m} \quad (78)$$

kde:

$\beta_1$  je poměrné zkrácení kroku vinutí statoru a podle rovnice (22)  $\beta_1 = \beta = 0,89$ .

Délka čela cívky

$$l_{\xi} = K_{\xi} b_c + 2B + h_d = 1,25 \cdot 0,167 + 2 \cdot 0,025 + 0,042 = 0,3 \text{ m} \quad (79)$$

kde:

$B = 0,025 \text{ m}$  je délka přímé části cívky při výstupu z drážky. Určí se z tabulky 6.20 [1].

$K_{\xi}$  je činitel počítán podle vztahu

$$K_{\xi} = \frac{1}{\sqrt{1 - m^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 - 0,603^2}} = 1,25 \quad (80)$$

kde:

$m$  se vypočte vzorcem

$$m = \frac{(b + S)}{t_{d1}} = \frac{(0,008 + 0,0035)}{0,01907} = 0,603 \text{ m} \quad (81)$$

kde:

$b$  je šířka mědi cívky v čele a je stejná jako šířka vodiče v drážce statoru  $b_v$

$S$  je přípustná vzdálenost mezi mědi vodičů sousedních cívek a je dána tabulkou 6.20 [1].

Střední délka závitu

$$l_{av} = 2(l_d + l_{\xi}) = 2 \cdot (0,245 + 0,3) = 1,1 \text{ m} \quad (82)$$

kde:

$$l_d = l_l = l_i = 0,245 \text{ m}$$

Vyložení čel vinutí statoru

$$l_v = K_v b_c + B - 0,5h_d = 0,38 \cdot 167 + 25 - 0,5 \cdot 0,042 = 67,5 \text{ mm} \quad (83)$$

kde:

$K_v$  je činitel počítán vztahem

$$K_v = \frac{1}{2} K_{\xi} m = \frac{1}{2} \cdot 1,25 \cdot 0,603 = 0,38 \quad (84)$$

Výsledná délka vodičů jedné fáze vinutí statoru

$$L_1 = l_{av} N_1 = 1,1 \cdot 48 = 52,8 \text{ m} \quad (85)$$

Odpor statorového vinutí

$$R_1 = \rho_{Cu75} \frac{L_1}{S_v a} = \frac{10^{-6}}{47} \cdot \frac{52,8}{10,99 \cdot 10^{-6} \cdot 4} = 0,026 \Omega \quad (86)$$

kde:

$\rho_{Cu75}$  je rezistivita mědi pro provozní teplotu 75° C. Tato teplota se uvažuje pro výpočty vinutí, jejichž mezní tepoty odpovídají tepelné izolační třídě B. Hodnotu  $\rho_{Cu75} = 10^{-6}/47 \Omega m$  jsem odečetl z tabulky 4.1 [1].

Poměrná hodnota odporu se určí vztahem

$$r_1 = R_1 \frac{I_{1N}}{U_{1N}} = 0,026 \cdot \frac{217,4}{230} = 0,025 \quad (87)$$

### 8.1.2 Rotor

Odpor jedné tyče

$$R_t = \rho_{Al75} \frac{l_2}{S_t} = \frac{10^{-6}}{24} \cdot \frac{0,245}{359,87 \cdot 10^{-6}} = 28,37 \cdot 10^{-6} \Omega \quad (88)$$

kde:

$\rho_{Al75}$  je rezistivita hliníku pro provozní teplotu 75°C Tato teplota se uvažuje pro výpočty vinutí, jejichž mezní teploty odpovídají tepelné izolační třídě B. Hodnotu  $\rho_{Al75} = 10^{-6}/24 \Omega m$  jsem určil z tabulky 4.1 [1].

Odpor kruhu nakrátko

$$R_{kn} = \rho_{Al75} \frac{\pi D_{kn}}{Q_2 S_{kn}} = \frac{10^{-6}}{24} \cdot \frac{\pi \cdot 0,41387}{58 \cdot 986,1 \cdot 10^{-6}} = 0,947 \cdot 10^{-6} \Omega \quad (89)$$

Odpor jedné fáze rotoru

$$R_2 = R_t + 2 \frac{R_{kn}}{\Delta^2} = 28,37 \cdot 10^{-6} + 2 \cdot \frac{0,947 \cdot 10^{-6}}{0,43^2} = 38,61 \cdot 10^{-6} \Omega \quad (90)$$

Odpor rotorové fáze přepočtený počet závitů vinutí statoru

$$R'_2 = R_2 4m_1 \frac{(N_1 k_{v1})^2}{Q_2} = 38,61 \cdot 10^{-6} \cdot 4 \cdot 3 \cdot \frac{(48 \cdot 0,94)^2}{58} = 0,0163 \Omega \quad (91)$$

Poměrná hodnota se vypočte vzorcem

$$r'_2 = R'_2 \frac{I_{1N}}{U_{1N}} = 0,0163 \cdot \frac{217,4}{230} = 0,0154 \Omega \quad (92)$$

## 8.2 Rozptylová reaktance

### 8.2.1 Stator

Činitel magnetické vodivosti drážky  $\lambda_{d1}$  má podle tabulky 6.22 [1] tvar

$$\begin{aligned} \lambda_{d1} &= \frac{h_2 - h_m}{3b_d} k_\beta + \frac{h_1}{b_d} k'_\beta + \frac{h_m}{4b_d} = \\ &= \frac{36,45 - 4,4}{3 \cdot 10} \cdot 0,939 + \frac{4,7}{10} \cdot 0,918 + \frac{4,4}{4 \cdot 10} = 1,54 \end{aligned} \quad (93)$$

kde:

$$\text{činitel } k_{\beta}' = 0,25(1+3\beta) = 0,25 \cdot (1+3 \cdot 0,89) = 0,918$$

$$\text{činitel } k_{\beta} = 0,25(1+3k_{\beta}') = 0,25 \cdot (1+3 \cdot 0,918) = 0,939$$

Činitel magnetické vodivosti čel  $\lambda_{\xi 1}$  se vyjádří vztahem

$$\lambda_{\xi 1} = 0,34 \frac{q}{l_i} (l_{\xi} - 0,64\beta t_p) = 0,34 \cdot \frac{3}{0,245} (0,3 - 0,64 \cdot 0,89 \cdot 0,172) = 0,84 \quad (94)$$

Činitel magnetické vodivosti diferenčního rozptylu  $\lambda_{dif1}$

$$\lambda_{dif1} = \frac{t_{d1}}{12\delta k_c} \xi = \frac{19,07}{12 \cdot 0,8 \cdot 1,5} \cdot 0,71 = 0,94 \quad (95)$$

kde:

$\xi$  je činitel vypočtený podle vzorce

$$\begin{aligned} \xi &= \left( 2 \frac{t_{d2}}{t_{d1}} - \frac{t_{d1}}{t_{d2}} \Delta_{z1} \right) k_{\beta} - k_{v1} \left( \frac{t_{d2}}{t_{d1}} \right)^2 = \\ &= \left( 2 \cdot \frac{23,58}{19,07} - \frac{19,07}{23,58} \cdot 0,23 \right) \cdot 0,939 - 0,94 \cdot \left( \frac{23,58}{19,07} \right)^2 = 0,71 \end{aligned} \quad (96)$$

kde:

$\Delta_{z1} = 0,23$  je činitel určený z křivky na obr. 6.39a [1]

Rozptylová reaktance jedné fáze vinutí statoru

$$\begin{aligned} X_{1\sigma} &= 15,8 \frac{f_1}{100} \left( \frac{N_1}{100} \right)^2 \frac{l_i}{pq} (\lambda_{d1} + \lambda_{\xi 1} + \lambda_{dif1}) = \\ &= 15,8 \cdot \frac{50}{100} \cdot \left( \frac{48}{100} \right)^2 \cdot \frac{0,245}{4 \cdot 3} \cdot (1,54 + 0,84 + 0,94) = 0,123 \Omega \end{aligned} \quad (97)$$

Hodnota poměrné rozptylové reaktance

$$x_{1\sigma} = X_{1\sigma} \frac{I_{1N}}{U_{1N}} = 0,123 \cdot \frac{217,4}{230} = 0,116 \quad (98)$$

### 8.2.2 Rotor

Činitel magnetické vodivosti drážkového rozptylu  $\lambda_{d2}$  bude podle tabulky 6.23 [1]

$$\begin{aligned}\lambda_{d2} &= \left[ \frac{h_1}{3b_1} \left( 1 - \frac{\pi b_1^2}{8S_t} \right)^2 + 0,66 - \frac{b_0}{2b_1} \right] k_d + \frac{h_0}{b_0} + 1,12 \left( \frac{h'_0}{I_t} \right) 10^6 = \\ &= \left[ \frac{24,9}{3 \cdot 12,1} \cdot \left( 1 - \frac{\pi \cdot 12,1^2}{8 \cdot 359,87} \right)^2 + 0,66 - \frac{1,5}{2 \cdot 12,1} \right] \cdot 1 + \frac{0,7}{1,5} \\ &\quad + 1,12 \cdot \left( \frac{0,0003}{903,19} \right) \cdot 10^6 = 1,92\end{aligned}\quad (99)$$

kde:

$k_d = 1$  pro jmenovitý chod stroje

Činitel magnetické vodivosti rozptylu čel  $\lambda_{\epsilon 2}$

$$\lambda_{\epsilon 2} = \frac{2,3D_{kn}}{Q_2 l_i \Delta^2} \log \frac{4,7D_{kn}}{2a_{kn} + b_{kn}} = \frac{2,3 \cdot 413,87}{58 \cdot 245 \cdot 0,43^2} \cdot \log \frac{4,7 \cdot 413,87}{2 \cdot 45,81 + 21,53} = 0,45 \quad (100)$$

Činitel magnetické vodivosti diferenčního rozptylu klecového rotorového vinutí  $\lambda_{dif2}$

$$\lambda_{dif2} = \frac{t_{d2}}{12\delta k_c} \xi = \frac{23,58}{12 \cdot 0,8 \cdot 1,5} \cdot 1 = 1,64 \quad (101)$$

kde:

$\xi$  je činitel určený vzorcem

$$\xi = 1 + \frac{1}{5} \left( \frac{\pi p}{Q_2} \right)^2 - \frac{\Delta_{z2}}{1 - \left( \frac{p}{Q_2} \right)^2} = 1 + \frac{1}{5} \cdot \left( \frac{\pi \cdot 4}{58} \right)^2 - \frac{0,01}{1 - \left( \frac{4}{58} \right)^2} \approx 1 \quad (102)$$

kde:

$\Delta_{z2} = 0,01$  je činitel určený z křivky na obr. 6.39a [1]

Rozptylová reaktance pro jednu fázi rotorového klecového vinutí

$$\begin{aligned}X_{2\sigma} &= 7,9f_1 l_i (\lambda_{d2} + \lambda_{\epsilon 2} + \lambda_{dif2}) \cdot 10^{-6} = \\ &= 7,9 \cdot 50 \cdot 0,245 \cdot (1,92 + 0,45 + 1,64) \cdot 10^{-6} = 388 \cdot 10^{-6} \Omega\end{aligned}\quad (103)$$

Rozptylová reaktance jedné fáze rotoru přepočtená na počet závitů vinutí statoru

$$X'_{2\sigma} = X_{2\sigma} 4m_1 \frac{(N_1 k_{v1})^2}{Q_2} = 388 \cdot 10^{-6} \cdot 4 \cdot 3 \cdot \frac{(48 \cdot 0,94)^2}{58} = 0,163 \Omega \quad (104)$$

Hodnota poměrné rozptylové reaktance

$$x'_{2\sigma} = X'_{2\sigma} \frac{I_{1N}}{U_{1N}} = 0,163 \cdot \frac{217,4}{230} = 0,154 \quad (105)$$

## 9 Výpočet ztrát a účinnosti motoru

Ztráty v asynchronních motorech můžeme rozdělit na ztráty v železe, které obsahují hlavní a dodatečné ztráty, dále na ztráty ve vinutí, též nazývané Jouleovy, mechanické ztráty, ventilační ztráty a dodatečné ztráty při zatížení stroje.

### 9.1 Hlavní ztráty v železe

Hmotnost železa jha statoru

$$\begin{aligned} m_{j1} &= \pi(D_e - h_{j1})h_{j1}l_{Fe1}k_{Fe}\gamma_{Fe} = \\ &= \pi \cdot (0,590 - 0,03938) \cdot 0,03938 \cdot 0,245 \cdot 0,95 \cdot 7,8 \cdot 10^3 = \\ &= 123,67 \text{ kg} \end{aligned} \quad (106)$$

kde:

$\gamma_{Fe}$  je hustota oceli a při výpočtu se uvažuje  $\gamma_{Fe} = 7,8 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$

Hmotnost železa zubů statoru

$$\begin{aligned} m_{z1} &= h_{z1}b_{z1av}Q_1l_{Fe1}k_{Fe}\gamma_{Fe} = \\ &= 0,042 \cdot 0,01091 \cdot 72 \cdot 0,245 \cdot 0,95 \cdot 7,8 \cdot 10^3 = 59,9 \text{ kg} \end{aligned} \quad (107)$$

kde:

$b_{z1av}$  je střední šířka zubu statoru a je dána vztahem

$$b_{z1av} = \frac{b_{z1max} + b_{z1min}}{2} = \frac{12,74 + 9,07}{2} = 10,91 \text{ mm} \quad (108)$$

Hlavní ztráty v železe asynchronního motoru

$$\begin{aligned} \Delta P_{Feh} &= \Delta p_{1,0} \left(\frac{f_1}{50}\right)^2 (k_{dj}B_{j1}^2 m_{j1} + k_{dz}B_{z1av}^2 m_{z1}) = \\ &= 2,6 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1,5} (1,6 \cdot 1,2^2 \cdot 123,67 + 1,8 \cdot 1,55^2 \cdot 59,9) = \\ &= 1414,33 \text{ W} \end{aligned} \quad (109)$$

kde:

$\Delta p_{1,0}$  jsou měrné ztráty v železe a pro ocel 2013 dle tabulky 6.24 [1] je  $\Delta p_{1,0} = 2,6 \text{ W/kg}$

$\beta$  je exponent závislý na použité oceli a podle tabulky 6.24 [1] volím  $\beta = 1,5$

$k_{dj}$ ,  $k_{dz}$  jsou činitele uvažující vliv nerovnoměrnosti rozložení toku v částech magnetického obvodu a vliv technologie výroby statorového svazku. Pro stroje o výkonu do 250 kW jsou přibližně  $k_{dj} \approx 1,6$  a  $k_{dz} \approx 1,8$  [1].

## 9.2 Dodatečné ztráty v železe

Vznikají při chodu naprázdno a dají se ještě rozdělit na ztráty povrchové, které vznikají v povrchové vrstvě hlav zubů statoru a rotoru od pulsací indukce ve vzduchové mezeře, a pulsní ztráty v železe zubů, které jsou dány pulsací indukce v zubech.

### 9.2.1 Povrchové ztráty

Amplituda pulsací indukce ve vzduchové mezeře nad hlavami zubů statoru

$$B_{01} = \beta_{01} k_c B_\delta = 0,1 \cdot 1,5 \cdot 0,816 = 0,12 \text{ T} \quad (110)$$

kde:

$\beta_{01} = f(b_{02}/\delta)$  a pro poměr  $1,5/0,8 = 1,88$  jsem z obr. 6.41 [1] odečetl hodnotu  $\beta_{01} = 0,1$

Hustota povrchových ztrát statoru potom bude

$$\begin{aligned} p_{\delta p1} &= 0,5 k_{01} \left( \frac{Q_2 n}{10000} \right)^{1,5} (B_{01} t_{d2} 10^3)^2 = \\ &= 0,5 \cdot 1,6 \cdot \left( \frac{58 \cdot 750}{10000} \right)^{1,5} \cdot (0,12 \cdot 0,02358 \cdot 10^3)^2 = \\ &= 58,11 \text{ W/m}^2 \end{aligned} \quad (111)$$

kde:

$k_{01}$  je činitel, který respektuje vliv opracování povrchu hlav zubů statoru a pro motory do výkonu 160 kW, u kterých se povrch neopracovává, bývá  $k_{01} \approx 1,4$  až  $1,8$ . Volím  $k_{01} = 1,6$ .

$n$  jsou otáčky motoru

Celkové povrchové ztráty ve statoru

$$\Delta P_{\delta p1} = p_{\delta p1} (t_{d1} - b_{01}) Q_1 l_{Fe1} = 58,11 \cdot (0,01907 - 0,01) \cdot 72 \cdot 0,245 = 9,3 \text{ W} \quad (112)$$

Amplituda pulsací indukce ve vzduchové mezeře nad hlavami zubů rotoru

$$B_{02} = \beta_{02} k_c B_\delta = 0,42 \cdot 1,5 \cdot 0,816 = 0,51 \text{ T} \quad (113)$$

kde:

$\beta_{02} = f(b_{01}/\delta)$  a pro poměr  $10/0,8 = 12,5$  jsem z obr. 6.41 [1] odečetl hodnotu  $\beta_{02} = 0,42$

Hustota povrchových ztrát rotoru potom bude

$$\begin{aligned} p_{\delta p2} &= 0,5 k_{02} \left( \frac{Q_1 n}{10000} \right)^{1,5} (B_{02} t_{d1} 10^3)^2 = \\ &= 0,5 \cdot 1,6 \cdot \left( \frac{72 \cdot 750}{10000} \right)^{1,5} \cdot (0,51 \cdot 0,01907 \cdot 10^3)^2 = \\ &= 949,56 \text{ W/m}^2 \end{aligned} \quad (114)$$

kde:

$k_{02}$  je činitel, který respektuje vliv opracování povrchu hlav zubů rotoru a pro motory do výkonu 160 kW, u kterých se povrch neopracovává, bývá  $k_{02} \approx 1,4$  až  $1,8$ . Volím  $k_{02} = 1,6$ .

$n$  jsou otáčky motoru

Celkové povrchové ztráty v rotoru

$$\begin{aligned} \Delta P_{\delta p2} &= p_{\delta p2} (t_{d2} - b_{02}) Q_2 l_{Fe2} = \\ &= 949,56 \cdot (0,02358 - 0,0015) \cdot 58 \cdot 0,245 = 297,93 \text{ W} \end{aligned} \quad (115)$$

## 9.2.2 Pulsní ztráty

Amplituda pulsací indukce ve středním průřezu zubu statoru

$$B_{p1} = \frac{\gamma_2 \delta}{2 t_{d1}} B_{z1av} = \frac{0,51 \cdot 0,0008}{2 \cdot 0,01907} \cdot 1,55 = 0,017 \text{ T} \quad (116)$$

kde:

$\gamma_2$  se určí vztahem

$$\gamma_2 = \frac{\left( \frac{b_{02}}{\delta} \right)^2}{5 + \frac{b_{02}}{\delta}} = \frac{\left( \frac{1,5}{0,8} \right)^2}{5 + \frac{1,5}{0,8}} = 0,51 \quad (117)$$



Pulsní ztráty v zubech statoru

$$\Delta P_{p1} = 0,11 \left( \frac{Q_2 n}{1000} B_{p1} \right)^2 m_{z1} = 0,11 \cdot \left( \frac{58 \cdot 750}{1000} \cdot 0,017 \right)^2 \cdot 59,9 = 3,6 \text{ W} \quad (118)$$

kde:

$m_{z1}$  je hmotnost zubů statoru vypočtená rovnicí (107)

Amplituda pulsací indukce ve středním průřezu zubu rotoru

$$B_{p2} = \frac{\gamma_1 \delta}{2t_{d2}} B_{z2} = \frac{1,94 \cdot 0,8}{2 \cdot 23,58} \cdot 1,89 = 0,062 \text{ T} \quad (119)$$

kde:

$\gamma_1$  se určí vztahem

$$\gamma_1 = \frac{\left( \frac{b'_{01}}{\delta} \right)^2}{5 + \frac{b'_{01}}{\delta}} = \frac{\left( \frac{3,39}{0,8} \right)^2}{5 + \frac{3,39}{0,8}} = 1,94 \quad (120)$$

kde:

$b'_{01}$  je náhradní otevření drážky statoru

$$b'_{01} = \frac{b_{01}}{3} \left( 1 + \frac{0,5t_{d1}}{t_{d1}b_{01}\kappa_\delta} \right) = \frac{10}{3} \cdot \left( 1 + \frac{0,5 \cdot 19,07}{19,07 \cdot 10 \cdot 3,05} \right) = 3,39 \text{ mm} \quad (121)$$

kde:

$\kappa_\delta$  je činitel, který se v závislosti na poměru  $b_d/\delta$  pro otevřené drážky určuje z křivky na obr. 6.42 [1].  $\kappa_\delta$  pro poměr  $10/0,8 = 12,5$  odpovídá hodnotě 3,05.

Hmotnost zubů rotoru

$$\begin{aligned} m_{z2} &= h_{z2} b_{z2} Q_2 l_{Fe2} k_{Fe} \gamma_{Fe} = \\ &= 0,03571 \cdot 0,01072 \cdot 58 \cdot 0,245 \cdot 0,95 \cdot 7,8 \cdot 10^3 = \\ &= 40,31 \text{ kg} \end{aligned} \quad (122)$$

Pulsní ztráty v zubech rotoru

$$\begin{aligned} \Delta P_{p2} &= 0,11 \left( \frac{Q_1 n}{1000} B_{p2} \right)^2 m_{z2} = 0,11 \cdot \left( \frac{72 \cdot 750}{1000} \cdot 0,062 \right)^2 \cdot 40,31 = \\ &= 49,7 \text{ W} \end{aligned} \quad (123)$$

Dodatečné ztráty v železe

$$\begin{aligned}\Delta P_{Fed} &= \Delta P_{\delta p1} + \Delta P_{\delta p2} + \Delta P_{p1} + \Delta P_{p2} = 9,3 + 297,93 + 3,6 + 49,7 \\ &= 360,53 \text{ W}\end{aligned}\quad (124)$$

### 9.3 Celkové ztráty v železe asynchronního motoru

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_{Feh} + \Delta P_{Fed} = 1414,33 + 360,53 = 1774,86 \text{ W} \quad (125)$$

### 9.4 Ztráty ve vinutí motoru

Jouleovy ztráty ve vinutí statoru

$$\Delta P_{j1} = m_1 R_1 I_1^2 = 3 \cdot 0,026 \cdot 217,4^2 = 3686,5 \text{ W} \quad (126)$$

Jouleovy ztráty v klecovém vinutí rotoru nakrátko

$$\Delta P_{j2} = Q_2 R_2 I_2^2 = 58 \cdot 38,61 \cdot 10^{-6} \cdot 903,19^2 = 1826,78 \text{ W} \quad (127)$$

### 9.5 Mechanické ztráty

Pro motory velkých výkonů ( $0,5 < D_e < 0,9$ ) jsou mechanické ztráty dány vztahem

$$\Delta P_{mech} = K_T (10D_e)^3 = 0,35 \cdot (10 \cdot 0,590)^3 = 71,88 \text{ W} \quad (128)$$

kde:

$K_T$  je činitel závislý na počtu pólových dvojic motoru a je uveden v tabulce 6.25 [1]. Osmipólovému stroji odpovídá  $K_T = 0,35$ .

### 9.6 Dodatečné ztráty při zatížení

Dodatečné ztráty při jmenovitém zatížení stroje, které vznikají působením rozptylových toků v prostoru čel vinutí, jsou normou stanoveny na 0,5 % z jmenovitého výkonu motoru.

$$\Delta P_d = 0,005 P_{1N} = 0,005 \frac{P_{2N}}{\eta} = 0,005 \cdot \frac{120000}{0,93} = 645,16 \text{ W} \quad (129)$$

## 9.7 Celkové ztráty asynchronního stroje s klecí nakrátko

$$\begin{aligned}\Delta P &= \Delta P_{Fe} + \Delta P_{j1} + \Delta P_{j2} + \Delta P_{mech} + \Delta P_d = \\ &= 1774,86 + 3686,5 + 1826,78 + 71,88 + 645,16 = \\ &= 8005,18 \text{ W}\end{aligned}\quad (130)$$

## 9.8 Účinnost asynchronního motoru

$$\eta = \frac{P_{2N}}{P_p} = \frac{P_{2N}}{P_{2N} + \Delta P} = \frac{120000}{120000 + 8005,18} = 0,937 = 93,7\% \quad (131)$$

## 10 Určení proudů a účinníků

### 10.1 Chod naprázdno

Jouleovy ztráty ve vinutí statoru jsou

$$\Delta P_{j0} = m_1 R_1 I_\mu^2 = 3 \cdot 0,026 \cdot 60,31^2 = 283,71 \text{ W} \quad (132)$$

Činná složka proudu naprázdno

$$I_{0\check{c}} = \frac{\Delta P_{Fe} + \Delta P_{mech} + \Delta P_{j0}}{m_1 U_{1N}} = \frac{1774,86 + 71,88 + 283,71}{3 \cdot 230} = 3,1 \text{ A} \quad (133)$$

Jalová složka proudu naprázdno přibližně odpovídá magnetizačnímu proudu ( $I_{0j} = I_\mu = 60,31 \text{ A}$ ).

Celkový proud naprázdno se určí jako

$$I_0 = \sqrt{I_{0\check{c}}^2 + I_{0j}^2} = \sqrt{3,1^2 + 60,31^2} = 60,39 \text{ A} \quad (134)$$

Účinník naprázdno je dán vztahem

$$\cos \varphi_0 = \frac{I_{0\check{c}}}{I_0} = \frac{3,1}{60,39} = 0,051 \quad (135)$$

## 10.2 Chod nakrátko

Impedance nakrátko

$$Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_k^2} = \sqrt{0,0423^2 + 0,286^2} = 0,289 \Omega \quad (136)$$

kde:

$$R_k = R_1 + R_2' = 0,026 + 0,0163 = 0,0423 \Omega$$

$$X_k = X_{1\sigma} + X_{2\sigma}' = 0,123 + 0,163 = 0,286 \Omega$$

Proud nakrátko

$$I_k = \frac{U_{1N}}{Z_k} = \frac{230}{0,289} = 795,8 \text{ A} \quad (137)$$

Účinnost nakrátko

$$\cos \varphi_k = \frac{R_k}{Z_k} = \frac{0,0423}{0,289} = 0,146 \quad (138)$$

## 11 Kružnicový diagram asynchronního motoru

Kružnicový diagram asynchronního stroje je zobrazení polohy koncového vektoru proudu do komplexní roviny a platí pro motory s vinutou kotvou a jednoduchou klecí nakrátko. Pro motory se složitější kotvou, jako je například vírová či Boucherotova klec, přechází kružnice na křivky vyšších řádů a kružnicový diagram pro takovéto motory platí pouze v lineární části momentové charakteristiky. Existuje několik možností jak tento diagram sestavit. Metoda, kterou jsem zvolil pro konstrukci kružnicového diagramu, spočívá v určení měřítek proudu, výkonu a momentu a postupném vynášení úseček z již dříve vypočtených hodnot.

Pro konstrukci musíme znát několik základních hodnot:

Proud naprázdno:	$I_0 = 60,39 \text{ A}$
Účinnost naprázdno (úhel):	$\cos \varphi_0 = 0,051 \ (\varphi_0 = 87,1^\circ)$
Proud nakrátko:	$I_k = 795,8 \text{ A}$
Účinnost nakrátko (úhel):	$\cos \varphi_k = 0,146 \ (\varphi_k = 81,6^\circ)$
Odpor statorového vinutí:	$R_1 = 0,026 \Omega$
Odpor rotoru přepočtený na počet závitů vinutí statoru:	$R_2' = 0,0163 \Omega$

## 11.1 Postup konstrukce kružnicového diagramu

1. Než začneme vytvářet kružnicový diagram, je zapotřebí si zvolit měřítko proudu  $m_I$ . Volí se jednak podle velikosti plochy, na kterou budeme kružnicový diagram umisťovat, a jednak podle proudu nakrátko  $I_k$ , který je ze všech vypočtených veličin největší. Metoda, kterou jsem pro konstrukci kružnicového diagramu zvolil, spočívá v rýsovací části na papír, kam budu postupně vynášet jednotlivé úsečky odpovídající veličinám, které jsou vynásobeny příslušným měřítkem. Volím měřítko proudu  $m_I = 4,5 \text{ A/mm}$ .
2. Následně se volí rovina, ve které bude kružnicový diagram vytvořen. Tou je komplexní rovina, kde se na vodorovnou (imaginární) osu vynášejí jalové složky proudu  $I_j$  a svislá osa představuje reálnou část, na které jsou stupnice výkonu  $P$ , momentu  $M$ , napětí  $U$  a činné složky proudu  $I_c$ .
3. Poté do komplexní roviny ve zvoleném měřítku  $m_I$  zakreslíme proudy  $I_0$  pod úhlem  $\varphi_0$  a proud  $I_k$  pod úhlem  $\varphi_k$ , přičemž úhly se odměřují od svislé, tedy reálné osy. Koncový bod proudu  $I_0$  nám vytvoří bod  $A_0$  a konec proudu  $I_k$  nám určí bod  $A_k$ .
4. Nyní uděláme spojnicí bodů  $A_0$  a  $A_k$ , která bude reprezentovat **přímku výkonů**. Z bodu  $A_0$  nakreslíme pomocnou přímku rovnoběžnou s imaginární osou, na které bude ležet střed kružnice  $S$ .
5. Úsečku  $A_0A_k$  rozdělíme na dvě poloviny a v ose vytvoříme kolmici směrem k pomocné přímce. Průsečík kolmice a pomocné přímky nám udá střed kružnice  $S$ . Nyní už můžeme nakreslit kružnici, která protíná body  $A_0$  a  $A_k$ .
6. Následně spustíme kolmici z bodu  $A_k$  k pomocné přímce. Tím vytvoříme bod  $V_0$ . Úsečku  $A_kV_0$  rozdělíme v poměru odporů  $R_1$  a  $R_2'$ , čímž získáme bod  $V$ . Platí, že úsečka  $VA_k$  odpovídá poměrné velikosti odporu  $R_2'$  a úsečka  $VV_0$  je reprezentována poměrným odporem  $R_1$ .
7. Z bodu  $A_0$  vytvoříme přímku procházející bodem  $V$  až ke kružnici, kde vznikne bod  $A_\infty$ . Přímka propojující tyto body se nazývá **přímka momentů**.

8. Na závěr se ještě konstruuje **přímka skluzu**. Tu vytvoříme tak, že prodloužíme přímku výkonů a v libovolné vzdálenosti nad přímkou výkonů sestrojíme rovnoběžku s přímkou momentů. Ovšem vzdálenost nesmí být moc velká, aby se nám kružnicový diagram vešel na kreslicí plochu. Průsečík této rovnoběžky a prodloužené přímky výkonů je bod, ve kterém je skluz motoru  $s = 1$ . Z bodu  $A_0$  vedeme tečnu ke kružnici směrem k přímce skluzu a kde se nám protnou, vznikne bod odpovídající kluzu  $s = 0$ . Úsečku mezi body  $s = 0$  a  $s = 1$  rovnoměrně rozdělíme na jednotlivé úseky skluzu.

Z kružnicového diagramu můžeme odečíst řadu významných hodnot asynchronního motoru. Jedná se především o velikost záběrného, maximálního a jmenovitého momentu  $M_z$ ,  $M_{max}$  a  $M_N$ . Dále můžeme určit maximální a jmenovitý výkon stroje  $P_{max}$  a  $P_N$  a pro jmenovitý výkon odečíst hodnotu skluzu  $s_N$  a jmenovitý účinník  $\cos \varphi_N$ . Pro správné vyčíslení všech veličin je zapotřebí ještě určit měřítko výkonu  $m_P$  a měřítko momentu  $m_M$ .

Měřítko výkonu

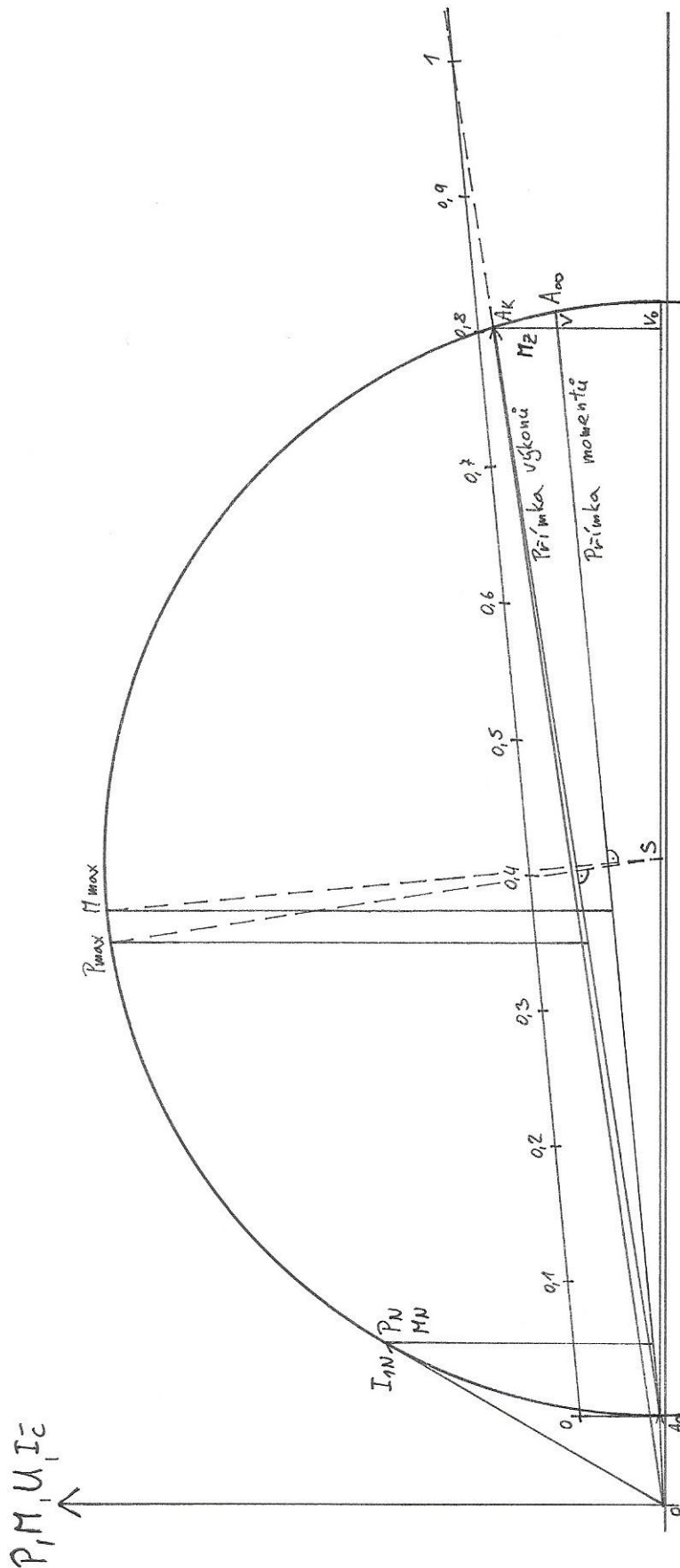
$$m_P = 3U_{1N}m_I = 3 \cdot 230 \cdot 4,5 = 3105 \text{ W/mm} \quad (139)$$

Měřítko momentu

$$m_M = \frac{m_P}{\omega_s} = \frac{3105}{78,5} = 39,55 \text{ Nm/mm} \quad (140)$$

K zjištění maximálního výkonu  $P_{max}$  prodloužíme kolmicí procházející středem  $S$  směrem ke kružnici. Průsečík nám vytvoří bod  $P_{max}$ , ze kterého spustíme přímkou směrem k přímce výkonů. Velikost maximálního výkonu získáme tak, že délku úsečky mezi bodem  $P_{max}$  a přímkou výkonů vynásobíme měřítkem výkonů. Podobně můžeme určit i maximální moment  $M_{max}$ . Ze středu  $S$  směrem ke kružnici uděláme přímkou, která je kolmá na přímkou momentů. Z průsečíku  $M_{max}$ , vedeme přímkou směrem k přímce momentů. Hodnotu maximálního momentu spočteme tak, že vzdálenost mezi bodem  $M_{max}$  a přímkou momentů vynásobíme měřítkem momentů

Pomocí kružnicového diagramu můžeme sestrojít i momentovou charakteristiku, když postupně pro zvolené hodnoty skluzu odečteme velikosti odpovídajících momentů.



Obr. 3: Kružnicový diagram asynchronního motoru

## 11.2 Další parametry stroje odečtené z kružnicového diagramu

Záběrný moment

$$M_z = 379,68 \text{ Nm}$$

Maximální moment

$$M_{max} = 2966,25 \text{ Nm}$$

Maximální výkon

$$P_{max} = 220455 \text{ W}$$

Záběrný proud

$$I_z = I_k = 795,8 \text{ A}$$

Skluz při maximálním momentu

$$s_{max} = 0,06 \text{ (6 \%)}$$

Pro jmenovitý proud  $I_{IN} = 217,4 \text{ A}$  jsem určil následující parametry:

Jmenovitý moment

$$M_N = 1562,23 \text{ Nm}$$

Jmenovitý výkon

$$P_N = 121095 \text{ W}$$

Jmenovitý fázový posuv

$$\varphi_N = 30^\circ$$

Jmenovitý účinník

$$\cos \varphi_N = 0,866$$

Jmenovitý skluz

$$s_N = 0,018 \text{ (1,8 \%)}$$



## 12 Momentová charakteristika asynchronního motoru

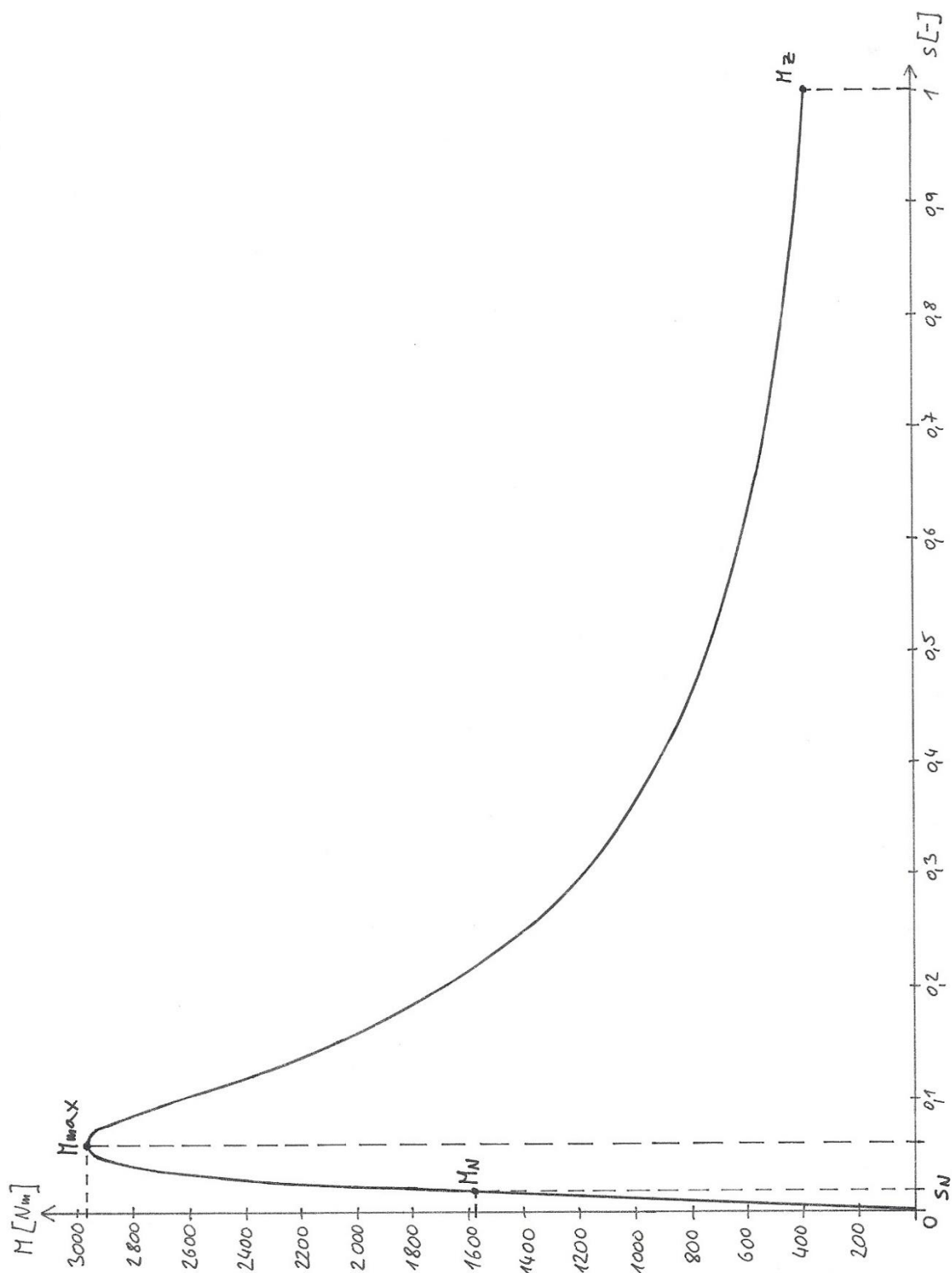
Momentová charakteristika vyjadřuje závislost točivého momentu asynchronního motoru  $M$  na skluzu stroje  $s$ . Někdy se také udává jako závislost momentu  $M$  na otáčkách  $n$ .

### 12.1 Postup konstrukce momentové charakteristiky

1. Nakreslíme počátek souřadného systému, kde na vodorovnou osu budeme vynášet skluz motoru  $s$  a na svislou osu příslušný točivý moment stroje  $M$ .
2. Hodnotu momentu odečteme z kružnicového diagramu tak, že spojíme bod  $A_0$  s příslušným skluzem, ve kterém chceme daný moment zjistit. Průsečík této úsečky s kružnicí nám vytvoří bod, ze kterého vedeme kolmicí směrem k přímce momentů. Velikost této úsečky vynásobíme měřítkem momentů a vypočtenou hodnotu zapíšeme do tabulky. Postup opakujeme pro další hodnoty skluzu, přičemž v oblasti maximálního momentu je vhodné hodnoty odečítat pro velmi jemný krok skluzu, abychom následně dobře určili velikost maximálního momentu  $M_{max}$ .
3. Na závěr z odečtených hodnot sestrojíme grafickou závislost momentu na skluzu.

skluz $s$ [-]	moment $M$ [Nm]
0	0
0,02	1839,1
0,04	2748,7
0,06	2966,3
0,08	2847,6
0,1	2669,6
0,125	2333,5
0,15	2076,4
0,175	1858,9
0,2	1680,9
0,25	1384,3
0,3	1186,5
0,4	909,7
0,6	613
0,8	474,6
1	379,7

Tab 1: Odečtené hodnoty momentu odpovídající příslušnému skluzu



Obr. 4: Momentová charakteristika asynchronního stroje

## Závěr

Obsahem této bakalářské práce je elektromagnetický návrh trojfázového asynchronního motoru s klecí nakrátko o výkonu 120 kW. Celý návrh je velmi časově náročný, poněvadž vypočtené hodnoty se musí kontrolovat s doporučenými, případně dříve vypočtenými hodnotami.

Výpočet začíná volbou hlavních rozměrů stroje, kterými jsou délka železného svazku, vnitřní a vnější průměr statoru. Následuje určení počtu a rozměrů drážek statoru. Vzhledem k vyššímu výkonu motoru byla zvolena otevřená drážka typu M, do které se ukládá měděné pasové vinutí s pravoúhlým průřezem. Okótovaný průřez drážky je součástí výpočtu statoru. Dále je určena vzduchová mezera o rozměru 0,8 mm, počet a rozměry drážek rotoru. Na rotoru byla zvolena uzavřená drážka typu V. Do ní se z hliníku odlije rotorové vinutí, které je na koncích spojené kruhy nakrátko. Nákres průřezu drážky je uveden u výpočtu rotoru. Návrh pokračuje výpočtem magnetického obvodu z dovolených indukcí v jednotlivých částech motoru. Nedílnou součástí návrhu je také určení odporů, rozptylových reaktancí, účinnosti a celkových ztrát motoru, které můžeme rozdělit na ztráty v železe, Jouleovy ztráty ve vinutí, mechanické ztráty a dodatečné ztráty při zatížení. V závěru jsou určeny hodnoty proudů a účinníků v chodu naprázdno a nakrátko.

Z vypočtených hodnot je sestrojen kružnicový diagram, z něhož lze vyčíst například hodnotu maximálního momentu, která vyšla  $M_{max} = 2966,25 Nm$ , dále třeba záběrný moment  $M_z = 379,68 Nm$  nebo jmenovitý moment stroje, který by měl být přibližně poloviční než je moment maximální. Mně vyšel  $M_N = 1562,23 Nm$ , což odpovídá teoretickým předpokladům. Z kružnicového diagramu je následně odvozena momentová charakteristika, která vyjadřuje závislost momentu stroje na skluzu.

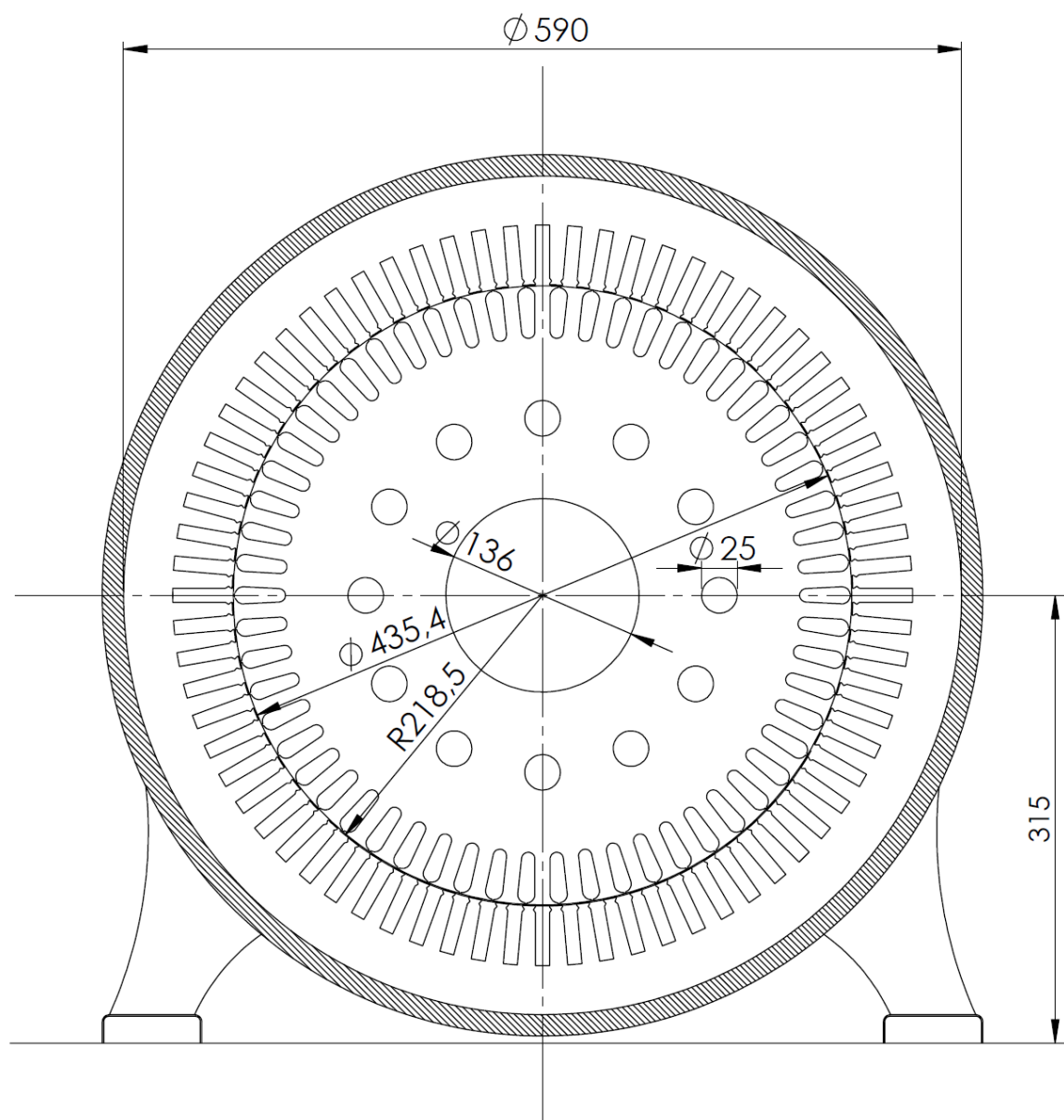
V příloze je schematicky nakreslen příčný a podélný řez stroje.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] KOPYLOV, Igor Petrovič a kol. *Stavba elektrických strojů*, 1. vyd. Praha: SNTL, 1988, 688 s.
- [2] CIGÁNEK, Ladislav. *Stavba elektrických strojů*, Praha: SNTL, 1958.
- [3] DUPAL, Petr. *Návrh asynchronního motoru s kotvou nakrátko*, Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni, 2011.
- [4] <https://portal.zcu.cz/portal/studium/courseware/kev/ses1/prednasky.html>  
[Cit. 15.5.2018].
- [5] <http://home.zcu.cz/~khruska/cz/diagram.html> [Cit. 15.5.2018].

## Přílohy

### Příloha A – Příčný řez navrhovaného asynchronního stroje



**Příloha B – Podélný řez navrhovaného asynchronního motoru**

