

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**

**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Návrh asynchronního motoru s kotvou nakrátko

autor: Jakub Štěpán

Plzeň 2009

vedoucí práce: Ing. Pavel Jarolím

## **Prohlášení**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci vypracovanou na závěr bakalářského studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne: 12.5.2012

.....

Jakub Štěpán

## **Poděkování**

Tímto bych chtěl poděkovat všem, kteří mi velmi pomohli s vytvořením této práce. Chtěl bych tedy poděkovat panu Doc. Ing. Josefu Červenému, CSc., za jeho pomoc a odborné rady a vedoucímu této bakalářské práce Ing. Pavlu Jarolímovi.

## **Anotace**

Téma bakalářské práce je elektromagnetický návrh asynchronního motoru s kotvou nakrátko s parametry:  $P = 20 \text{ kW}$ ,  $U = 3 \times 400/230 \text{ V}$ ,  $\omega_s = 1500 \text{ ot/min}$ ,  $m = 3$ , IP 23,  $f = 50 \text{ Hz}$ . Dále nákres kružnicového diagramu, odvození momentové charakteristiky  $M(s)$  a schématický nákres vinutí statoru.

## **Klíčová slova**

asynchronní motor, kotva nakrátko, elektromagnetický návrh, volba hlavních rozměrů, výpočet statoru, výpočet rotoru, výpočet magnetického obvodu, kružnicový diagram, schéma vinutí statoru

## **Anotation**

Theme of my work is describing and constructing electric engine with these parameters:

$P = 20 \text{ kW}$ ,  $U = 3 \times 400/230 \text{ V}$ ,  $\omega_s = 1500 \text{ turns per second}$ ,  $m = 3$ , IP 23,  $f = 50 \text{ Hz}$ .

Next deal is draw circle diagram and diagram of the stator winding.

## **Key words**

induction motor, squirrel-cage, electromagnetic design, calculate the rotor, calculate the stator, calculate of the magnetic circuit, diagram of the stator winding, choice of main dimensions

## Obsah

Obsah.....	12
Návrh motoru.....	2
Návrh hlavních rozměrů.....	2
Výška osy.....	2
Vnější průměr.....	3
Vnitřní průměr statoru.....	3
Pólová rozteč a výpočtový vnitřní výkon .....	4
Elektromagnetická zatížení.....	5
.....	5
Výpočet činitelů $\alpha\delta$ , $k_B$ a $k_{V1}$ .....	5
Synchronní úhlová rychlost hřídele $\omega_s$ .....	6
Ideální délka vzduchové mezery $l_i$ .....	6
.....	7
Výpočet statoru.....	7
Drážky statoru.....	7
Počet drážek na pól a fázi.....	8
Jmenovitý proud statoru.....	9
Počet efektivních vodičů v drážce.....	9
Počet závitů ve fázi.....	9
Proudová hustota.....	9
Určení statorového vinutí.....	10
Činitel vinutí.....	10
Činitel rozlohy.....	11
Magnetický tok.....	11
Magnetická indukce ve vzduchové mezeře.....	12
Lineární hustota proudu.....	12
Efektivní průřez vodiče.....	12
Rozměry drážek a zubů statoru.....	14
.....	14
Výška $j_{ha}$ statoru.....	14

Šířka zubu.....	15
Hloubka drážky.....	16
Otevření drážky .....	17
Plocha příčného průřezu drážky.....	17
Světlé rozměry drážky.....	17
Volba vzduchové mezery .....	19
Určení rotoru .....	19
Hlavní rozměry .....	19
Tyč rotoru.....	20
Rozměr drážky.....	21
Kruh nakrátko.....	22
Výpočet magnetického obvodu.....	23
Hodnoty indukcí .....	23
Magnetické napětí.....	24
Odpory a reaktance.....	27
Odpor jedné fáze statorového vinutí .....	27
Rozptylová reaktance fáze statorového vinutí.....	28
Poměrné hodnoty odporů a reaktancí.....	32
Návrh vinutí.....	32
Obr.19 Schéma vinutí.....	34
Výpočet ztrát.....	34
Kružnicový diagram.....	38
Výpočet momentové charakteristiky.....	39
Tepelný a ventilační výpočet asynchronního motoru.....	40
Ventilační výpočet.....	43
Přehled vypočtených hodnot.....	43
Příloha:.....	51





## Úvod

Historie asynchronních motorů odstartoval objev Nikola Tesly roku 1888. Tento velikán zjistil, že natočením 2 cívek do pravého úhlu lze vytvořit točivé magnetické pole. Podmínkou vzniku pole je fázový posuv taktéž o  $90^\circ$ . [1]

Princip asynchronního motoru je přeměna elektrické energie vstupního střídavého napětí na mechanickou energii a naopak. Tato přeměna je umožněna díky magnetické indukci mezi statorem a rotorem. To dělá z asynchronních motorů jedny z nejjednodušších elektrických motorů z hlediska spolehlivosti, údržby, konstrukce a ekonomické stránky. Z hlediska provedení napájení známe motory jednofázové a trojfázové. Asynchronní motory se vyrábí ve velkém rozsahu výkonů od několika wattů až po 20 MW. Motory je možné charakterizovat i podle otáček, které mohou být od několika desítek po 100 000 otáček za minutu. [2]

Asynchronní motory se dále dělí podle provedení rotoru. Nejčastějším typem rotoru je kotva nakrátko, kdy rotor je tvořen z masivních tyčí, spojenými nakrátko kruhy, které jsou přivařeny na konce tyčí. Materiály pro tyče jsou hliník, měď a mosaz. Další možností provedení rotoru je vinutá kotva, která má vinutí na rotoru. Vinutí je spojení do hvězdy a vyvedeno na sběrací kroužky, přivařené na hřídel. Poslední typ je speciální provedení.

Základní popis asynchronního motoru je velmi jednoduchý. Stator je tvořen ze statorových plechů připevněných na kostru motoru do tvaru dutého válce. V těchto plechách jsou vytvořeny drážky pro vložení rotorového vinutí. [3] Ve statoru se střídavým vstupním napětím tvoří točivé magnetické pole, které působí na rotor motoru, kde se indukuje napětí a stroj se roztáčí. Regulace momentu hřídele závisí na typu kotvy. U rotorů s vinutou kotvou je regulování otáček umožněno díky kluzným kontaktům. U rotoru s klecí nakrátko není umožněné řízení otáček z důvodu konstrukce kotvy, rychlost otáčení rotoru se úpravou napájecího napětí na statoru. Točivý moment u asynchronního motoru vzniká indukci napětí. Proud v rotoru vzniklý indukci vyvolá moment, který otáčí hřídel. Z tohoto důvodu má rotor zpoždění za točivým polem statoru. Zpoždění rotoru za točivým polem se nazývá skluz. Existence skluzu u asynchronních motorů je podmínkou pro provoz těchto strojů, jelikož pokud by byl skluz 0, což by znamenalo, že se rotor otáčí stejnou rychlostí jako točivé pole statoru, a proto se v něm neindukuje žádné napětí a motor nemá moment.

Způsoby rozběhů asynchronních motorů se liší podle výkonu stroje. Stroje malých výkonů, řádově jednotek wattů, se spouští přímým připojením na síť, zatímco u výkonnějších strojů je již potřeba regulace. Důvodem jsou záběrné proudy, které mohou být 4 - 8 násobek jmenovitého proudu. [4]

## Návrh motoru

Samotný návrh stroje začíná určením hlavních rozměrů. Mezi tyto parametry se řadí vnitřní průměr statoru  $D$ , ideální délka vzduchové mezery  $l_i$ . Tyto veličiny jsou ovšem vázány s výkonem, úhlovou rychlostí  $\omega_s$  a elektromagnetickým zatížením tzv. strojovou konstantou.[5]

**Základní rovnice:[5]**

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

kde

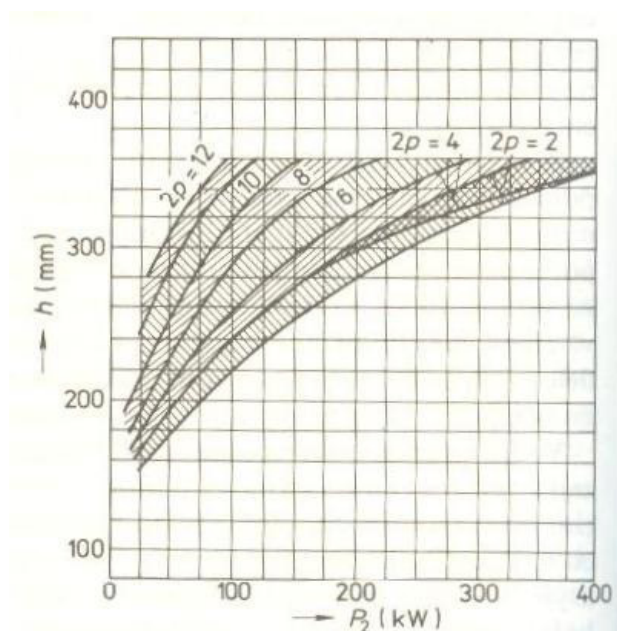
$P_i$ .... vnitřní výkon [W]

$A$ .... lineární proudová hustota [ $A \cdot m^{-1}$ ]

$B_\delta$ .... indukce ve vzduchové mezeře [T]

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

## Návrh hlavních rozměrů



### Výška osy

Výška osy stroje se určuje v závislosti na výkonu  $P_2$  z tabulek na obr.1. Jako důležité parametry pro správné určení hledané hodnoty jsou počet pólů  $2p$  a stupeň krytí.[5] Pro náš stroj jsme zvolili hodnotu  $h = 0,18$  m. Musíme brát na zřetel, že hodnota velikosti výšky  $h$  musí odpovídat hodnotám z normalizovaných řad výšek os.[5]

Obr.1 Výšky os v závislosti na výkonu a otáčkách pro motory s krytím IP 23

## Vnější průměr

Vnější průměr  $D_e$  odečítáme z tabulky 1, ve které jsou normalizované velikosti výšek os v závislosti na vnějším průměru  $D_e$ . [5]

h[mm]	53	63	71	80	90	100	112	132
$D_e$ [m]	0,089	0,1	0,116	0,131	0,149	0,168	0,191	0,225
h[mm]	160	180	200	225	250	280	315	355
$D_e$ [m]	0,272	0,313	0,349	0,392	0,437	0,53	0,59	0,66

Tab.1 Výšky os elektrických strojů a jim odpovídající vnější průměry satorových plechů pro asynchronní motory řady 4A[5]

$$D_e=0,313 \text{ m}$$

## Vnitřní průměr statoru

Vnitřní průměr statoru lze snadno určit z vnějšího průměru  $D_e$ , výšky  $j_{ha}$  a hloubky drážky zubů statoru  $h_{d1}$ . Tento předpoklad však nelze použít v této fázi výpočtu. Důvodem je prozatím neznalost hodnot výšky  $j_{h1}$  a hloubku drážky zubu statoru  $h_{d1}$ . Proto určování těchto hodnot je založeno na empirickém zkoumání a na úvaze, kdy při stejné indukci v jednotlivých úsecích magnetického obvodu elektrických strojů se stejným  $D$  bude  $j_{ha}$  statoru úměrné magnetickému toku, pólové rozteči a nepřímo úměrná počtu pólů. Po této úvaze dostáváme přibližný vztah:

$$D = K_D \cdot D_e \quad (3)$$

Přičemž hodnoty koeficientů jsou uvedeny v tabulce 2. Tyto koeficienty charakterizují poměry vnitřních a vnějších průměrů statorů. [5]

2p	2	4	6	8	10 – 12
$K_D$	0,52 – 0,57	0,62 – 0,68	0,7 – 0,72	0,74 – 0,75	0,75 – 0,77

Tab. 2 Poměr  $K_D = \frac{D}{D_e}$  pro různé počty pólů asynchronních motorů řady 4A[5]

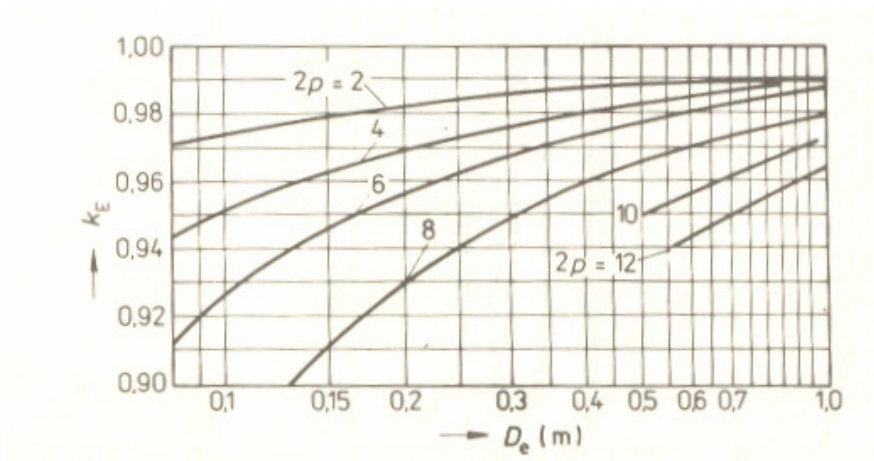
$$K_D=0,64 \text{ a } D = 0,64 \cdot 0,31 = 0,2m$$

### Pólová rozteč a výpočtový vnitřní výkon

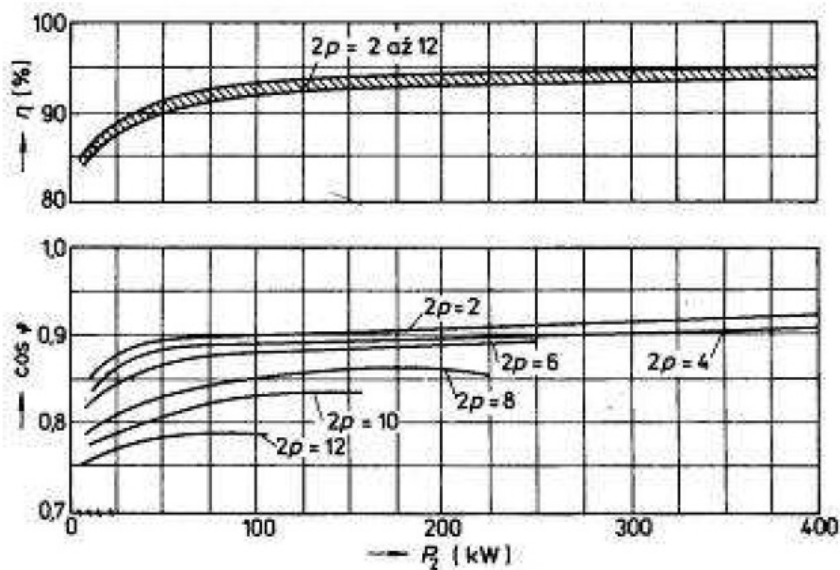
$$t_p = \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot p} = 0,16m \tag{4}$$

$$P_i = m \cdot I \cdot U_i = P_2 \cdot \frac{k_E}{\eta \cdot \cos \varphi} = 25,86kVA \tag{5}$$

kdy  $k_E$  je poměr indukovaného napětí vinutí statoru ku jmenovitému napětí, který se určí z obr.2 a  $P_2$  je výkon na hřídeli motoru.[5]



Obr.2 Hodnoty činitele  $k_E$ [5]

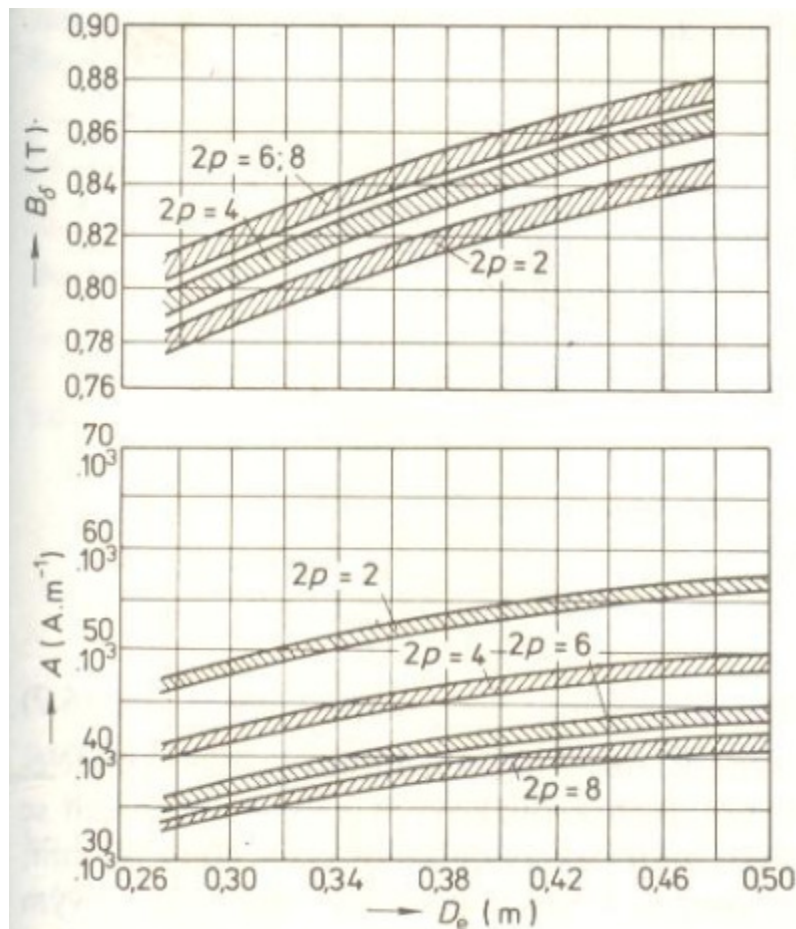


Obr.3 Přibližné hodnoty účinnosti a účiníku v závislosti na výkonu  $P_2$  pro motory s krytím IP 23[5]

Hodnoty  $\eta$  a  $\cos \varphi$  nejsou zadány, avšak je lze snadno určit z grafů na obr.3, kde jsou vyobrazeny závislosti účinnosti a účiníku na výkonu  $P_2$ . [5]

## Elektromagnetická zatížení

Při návrhu elektromagnetického zatížení, to znamená indukce ve vzduchové mezeře  $B_\delta$  a lineární proudové hustoty  $A$ , je nutné postupovat velmi pečlivě. Ze vztahu (1) je vidět, že hlavní rozměry stroje závisí na součinu  $A$  a  $B_\delta$  a jsou ovlivněny i vzájemným poměrem mezi těmito dvěma veličinami. V obr.4 jsou uvedené veličiny vyneseny v grafech v závislosti na vnějším průměru statoru  $D_e$ . Tyto závislosti jsou vytvořeny z údajů naměřených na vyrobených motorech s vlastnosti odpovídající normám ČSN.[5]



Obr.4 Závislosti lineární proudové hustoty a magnetické indukce ve vzduchové mezeře na vnějším průměru statoru pro motory s krytím IP 23[5]

$$B_\delta = 0,81 \text{ T}$$

$$A = 42500 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$$

### Výpočet činitelů $\alpha_\delta$ , $k_B$ a $k_{V1}$

Vlivem nasycení zubů statoru ve vzduchové mezeře se křivka magnetického pole zplošťuje.

Toto udává činitele pólového krytí  $\alpha_\delta$  a tvaru pole  $k_B$ . Přesné hodnoty těchto činitelů lze stanovit až po výpočtu magnetického obvodu. Pro zjednodušení předpokladů je výhodnější uvažovat pole sinusové.[5]

$$\alpha_\delta = \frac{2}{\pi} \cong 0,64 \quad (6)$$

$$k_B = \frac{\pi}{2 \cdot \sqrt{2}} \cong 1,11 \quad (7)$$

Hodnota činitele  $k_{v1}$  se volí podle typu vinutí zatím jako předběžná a pro dvouvrstvá a jedno-dvouvrstvá vinutí je velikost  $k_{v1}=0,91 - 0,92$ . [5]

$$k_{v1}=0,92$$

### **Synchronní úhlová rychlost hřídele $\omega_s$**

Vztah pro výpočet  $\omega_s$ : [5]

$$\omega_s = 2 \cdot \pi \cdot \frac{f_1}{p} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{n_1}{60} [\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (8)$$

kdy

$n_1$ ..... jsou synchronní otáčky [ $\text{min}^{-1}$ ]

$f_1$ ..... je napájecí frekvence [Hz]

$p$ .....počet pólových dvojic

$$\omega_s=157 [\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}]$$

### **Ideální délka vzduchové mezery $l_i$**

Ze vztahu (1) s uvažováním činitele  $\alpha_\delta$  lze rovnici pro výpočet ideální délky vzduchové mezery psát: [5]

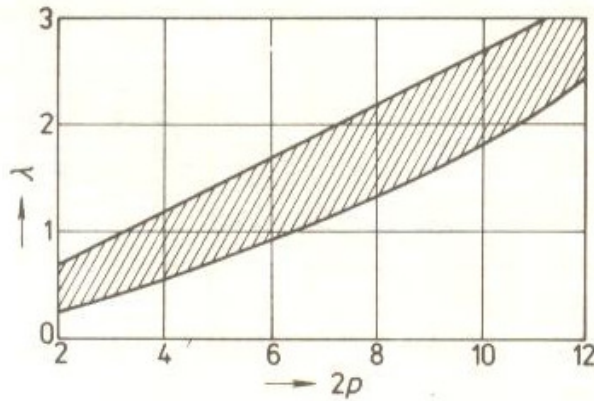
$$l_i = \frac{P_i}{D^2 \cdot \omega_s \cdot k_B \cdot k_{v1} \cdot A \cdot B_\delta} [m] \quad (9)$$

$$l_i=0,01\text{m}$$

Důležitým parametrem pro správnou volbu  $D$  a  $l_i$  je štíhlostní poměr: [5]

$$\lambda = \frac{l_i}{t_p} \quad (10)$$

Tento poměr je však omezen křivkami na obr.5. Pokud poměr vychází jiný, než jakou dovoluje oblast mezi křivkami, je nutné pozměnit výšku h.[5]



Obr.5 Štíhlostní poměr  $\lambda = \frac{l_i}{t_p}$  pro asynchronní motory s krytím IP 23[5]

$$\lambda = 0,09$$

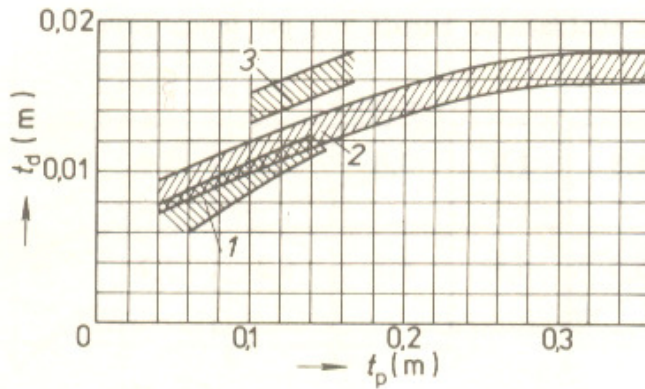
Tímto určením hlavních rozměrů končí. Jsou určeny základní parametry jako pólová rozteč, výška osy, vnitřní a vnější průměr statoru a délka vzduchové mezery.[5]

### Výpočet statoru

Pro další výpočty je nutné určit počet drážek statoru  $Q_1$  a počet závitů v sérii jedné fáze statorového vinutí  $N_1$ . Počet závitů ve fázi musí být natolik veliké, aby lineární proudová hustota a magnetická indukce ve vzduchové mezeře co možno nejvíce souhlasily s hodnotami zvolenými v předchozích výpočtech a  $Q_1$  musí být schopné svou velikostí zajistit dostatečně rovnoměrné rozložení vinutí.[5]

### Drážky statoru

Před výpočtem počtu drážek statoru se nejprve volí drážková rozteč  $t_{d1}$  dle typu vinutí, jmenovitého napětí a pólové rozteče. U strojů s rovnoměrně rozloženým vinutím je velký počet drážek a drážková rozteč je malá. Hodnoty  $t_{d1}$  určit z grafů na obr.6, kde jsou vyznačeny 3 oblasti. Oblast 1 vyznačuje hodnoty  $t_{d1}$  pro motory s  $h \leq 90$  mm, plocha 2 je pro  $250 \geq h \geq 90$  mm a oblast 3 vymezuje mnoho-pólové stroje s  $h \geq 280$  mm se vsypávaným vinutím.[5]



Obr.6 Drážková rozteč statoru se vsypávaným vinutím[5]

Pak je hodnota  $t_{d1min}=0,012$  m a  $t_{d1max}= 0,014$  m.

Vzorec pro výpočet počtu drážek  $Q_1$ : [5]

$$Q_{1min} = \frac{\pi \cdot D}{t_{d1min}} = 44,93 \quad (11)$$

$$Q_{2max} = \frac{\pi \cdot D}{t_{d1max}} = 52,42 \quad (12)$$

Volím tedy  $t_{d1}=0,013$ m a poté  $Q_1=48$ .

Počet drážek na statoru musí být číslo dělitelné počtem fází.[5]

### Počet drážek na pól a fázi

Počet drážek na pól a fázi musí být pro většinu asynchronních motorů číslo celé. Při porušení tohoto pravidla hrozí nesymetrie magnetomotorického napětí.[5]

Vztah pro výpočet  $q$ : [5]

$$q = \frac{Q_1}{2 \cdot p \cdot m} = 4 \quad (13)$$

Pro konečnou volbu je nutné udělat kontrolu, kdy  $q$  je zpětně dosazené do vzorce: [5]

$$t_{d1} = \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot p \cdot m \cdot q} = 0,0131 \text{ m} \quad (14)$$

Tato vypočtená hodnota se nesmí lišit o více jak 10 % od již dříve počtené  $t_{d1}$ . [5]



## Jmenovitý proud statoru

$$I_{1N} = \frac{P_2}{m \cdot U_N \cdot \eta \cdot \cos \varphi} \quad (15)$$

$$I_{1N} = 38,32 \text{ A}$$

## Počet efektivních vodičů v drážce

Pro počet efektivních vodičů v drážce platí pravidlo, že  $V_d$  musí být číslo celé a pro dvouvrstvá vinutí musí být toto číslo dělitelné 2. Nedodržení tohoto pravidla se dovoluje jen ve výjimečných případech a velmi to komplikuje technologii výroby. Proto se vypočtené  $V_d$  zaokrouhlí na nejbližší sudé či celé číslo, dle druhu vinutí.[5]

Aby chyba zaokrouhlení byla nejmenší, provádí se předběžný výpočet  $V'_d$ : [5]

$$V'_d = \frac{\pi \cdot D \cdot A}{I_{1N} \cdot Q_1} = 14,54 \quad (16)$$

Následné dopočetní  $V_d$  je dohledání takového počtu paralelních větví, aby konečná hodnota splňovala výše zmíněné požadavky: [5]

$$V_d = a \cdot V'_d \quad (17)$$

Zvolil jsem dvouvrstvé vinutí, tedy  $a = 2$ . Vyjde  $V_d = 29,07$ , a aby bylo splněny požadavky je tato hodnota zaokrouhlena na  $V_d = 30$ .

## Počet závitů ve fázi

Konečný počet závitů  $N_1$ : [5]

$$N_1 = \frac{V_d \cdot Q_1}{2 \cdot a \cdot m} = 120 \quad (18)$$

## Proudová hustota

Konečná hodnota  $A$  se smí od dříve vypočtené hodnoty lišit jen velmi nepatrně, protože tato hodnota je ovlivněna pouze efektivním počtem vodičů v drážce  $V_d$ . Konečnou hodnotu je třeba srovnat s hodnotami vymezenými v grafem na obr.4.[5]

Vztah pro výpočet: [5]

$$A = \frac{2 \cdot m \cdot N_1 \cdot I_{1N}}{\pi \cdot D} = 43\,858,17 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$$

## Určení statorového vinutí

Typ vinutí se u strojů volí s ohledem na konstrukci a předpokládanou technologii výroby. Motory do 15 kW se mají většinou jednovrstvé soustředné vinutí. Vinutí dvouvrstvá se vyskytují převážně u větších strojů a jsou zhotovena z pásků.[5]

## Činitel vinutí

Činitel vinutí  $k_v$  je hodnota, která zvažuje zmenšení indukovaného napětí ve fázi vinutí uloženého v drážkách oproti napětí, které by se indukovalo do stejného počtu závitů vinutí, ale s plným krokem. Vztah pro výpočet:[5]

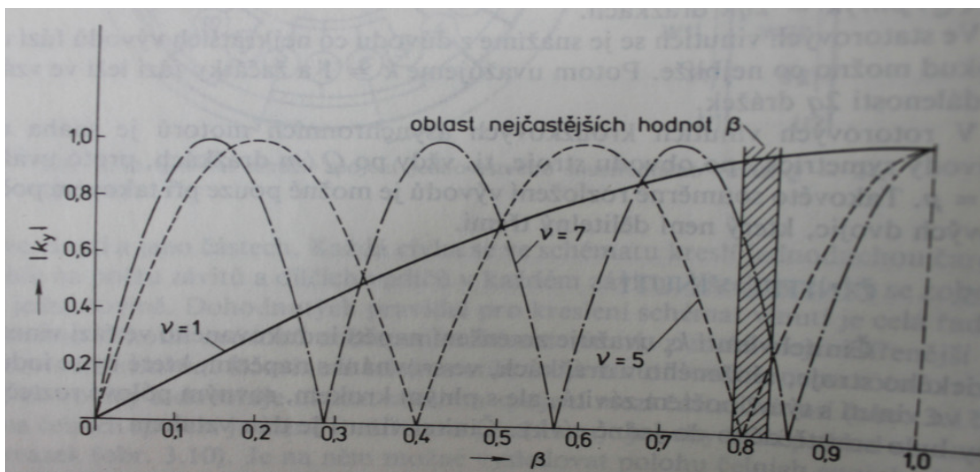
$$k_v = k_y \cdot k_r = 0,97 \quad (19)$$

kdy

$k_y$ ..... činitel zkrácení kroku, který se vypočte vztahem:[5]

$$k_y = \sin \left( \frac{y}{t_p} \cdot \frac{\pi}{2} \right) = 0,97 \quad (20)$$

Hodnota zkrácení kroku  $\beta$  se u střídavých strojů pohybuje v rozmezí 0,79 až 0,833, což odpovídá vyznačené ploše na obr.7 a tomu odpovídají hodnoty  $k_y$ . [5]



Obr.7 Velikost činitele zkrácení kroku v závislosti na zkrácení kroku pro 1., 5. a 7. harmonickou[5]

## Činitel rozlohy

Vinutí fáze je většinou rozprostřeno ve více než 2 drážkách, indukované napětí v každém závitě cívky má určité zpoždění, které odpovídá prostorovému posunu závitů cívky podél obvodu stroje. Jednotlivá napětí je pak potřeba sčítat pouze fázorově. Výsledný fázorový součet je menší nebo roven algebraickému součtu napětí jednotlivých závitů.[6]

Proto se zavádí činitel rozlohy  $k_r$ , který respektuje snížení indukovaného napětí:[6]

$$k_r = \frac{\sin\left(\frac{q}{Q_p} \cdot \frac{\pi}{2}\right)}{q \cdot \sin\left(\frac{1}{Q_p} \cdot \frac{\pi}{2}\right)} \quad (21)$$

$$k_r = 0,999986595$$

## Magnetický tok

Dle vztahu:[5]

$$\phi = \frac{k_E \cdot U_{1N}}{4 \cdot k_B \cdot N_1 \cdot f_1 \cdot k_{v1}} = 0,0087 \text{ Wb} \quad (22)$$

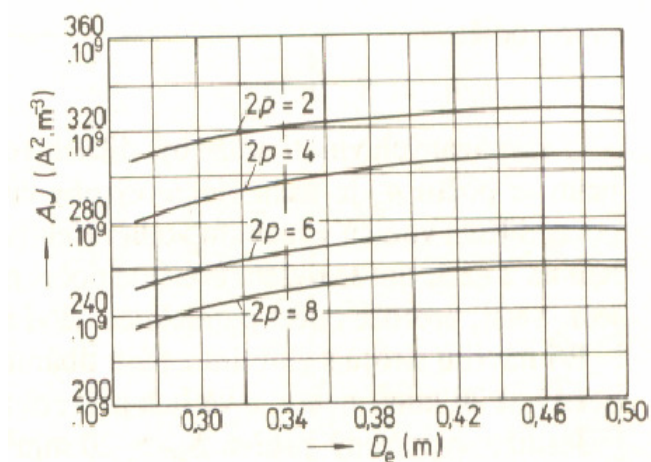
## Magnetická indukce ve vzduchové mezeře

Dle vztahu:[5]

$$B_{\delta} = \frac{p \cdot \phi}{D \cdot l_i} = 0,8087 \text{ T} \quad (23)$$

## Lineární hustota proudu

Z hlediska největšího využití aktivních materiálů je hustota proudu vysoká, avšak s tím se objevuje efekt vyšších ztrát ve vinutí a s tím spojená vyšší pracovní teplota a nižší účinnost motoru. Proto se zavádí kritérium, tzv. A-J kritérium, jehož grafické znázornění je vidět na obr.8.[5]



Obr.8 Střední hodnoty součinu A J u asynchronních motorů[5]

Pro náš návrh je  $AJ = 295 \cdot 10^9 \text{ A} \cdot \text{m}^2$

Vztah pro výpočet:[5]

$$J = \frac{AJ}{A} = 6,726 \cdot 10^6 \text{ A} \cdot \text{m}^2 \quad (24)$$

## Efektivní průřez vodiče

Vztah pro výpočet:[5]

$$S_{ef1} = \frac{I_{1N}}{a \cdot J_1} = 2,849 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \quad (25)$$

Dle tabulky na obr.9 navrhne konečnou podobu měděného izolovaného drátu dle norem ČSN 34 73.[5]

Průměr jádra (mm)	Průřez jádra (mm <sup>2</sup> )	Střední odpor při 20 °C (Ω · km <sup>-1</sup> )	Největší oboustranný izolační přírůstek (mm)						
			2B	L2H	2KT	2KS	T	2T	2I
1,06	0,882	19,880							
1,12	0,985	17,807							
1,18	1,094	16,042							
1,25	1,227	14,296	0,27		0,27	0,27	0,095	0,14	0,14
1,32	1,369	12,820							
1,40	1,539	11,397							
1,50	1,767	9,927 8							
1,60	2,011	8,725 6							
1,70	2,270	7,729 1	0,275	—					
1,80	2,545	6,895 0							
1,90	2,835	6,187 6							
2,00	3,142	5,584 3			0,3	0,3	0,12	0,18	—
2,12	3,530	4,969 9	0,325						
2,24	3,941	4,451 7							
2,36	4,374	4,010 6							
2,50	4,909	3,574 1							
2,65	5,515	3,180 7	0,335						
2,80	6,158	2,849 1			0,345	0,365	0,15	0,24	
3,00	7,069	2,481 9	0,385						
3,15	7,793	1,962 0							
Tepelná třída izolace			A	A	F	H	B	B	F

Obr.9 Tabulka pro měděné izolované dráty vinutí dle normy ČSN 33 73[5]

Dle uvedených hodnot v tabulce je konečný návrh vodičů:  $d = 3 \text{ mm}$

$$S = 7,069 \text{ mm}^2$$

$$R_{\text{stř}, 20^\circ\text{C}} = 2,4819 \text{ } \Omega \cdot \text{km}^{-1}$$

Ke zvoleným hodnotám je důležité uvažovat oboustranný izolační přírůstek  $d_i = 0,385 \text{ mm}$ . [5]

Pro ruční zakládání drátů do drážek je maximální průměr drátu 1,7 mm. Toto kritérium námi navržený drát nesplňuje, proto ho rozdělíme na 2 dílčí vodiče  $n_p = 2$ . [5]

Kdy dílčí vodič má parametry:

$$d = 1,5 \text{ mm}$$

$$S = 1,767 \text{ mm}^2$$

$$R_{\text{stř}, 20^\circ\text{C}} = 9,927 \text{ } \Omega \cdot \text{km}^{-1}$$

$$d_i = 0,27 \text{ mm}$$

Pro konečné určení proudové hustoty  $J$ : [5]

$$J_1 = \frac{I_{1N}}{a \cdot S_v \cdot n_p} = 5,42 \cdot 10^6 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2} \quad (26)$$

## Rozměry drážek a zubů statoru

Rozměry drážky je nutné volit v závislosti na rozměrech vodičů vinutí a jejich izolace. Tvar drážek a zubů je dán výkonem stroje a typem vinutí. Výpočet vychází z dovolených indukcií, které jsou uvedeny v tabulce na obr.10.[5]

Část magnetického obvodu	Označení	IP 44					IP 23					
		2p	2	4	6	8	10 a 12	2	4	6	8	10
Jho statoru	$B_{j1}$	1,4 až 1,6			1,15 až 1,35	1,1 až 1,2	1,45 až 1,6			1,2 až 1,4		1,1, až 1,3
Zuby statoru s rovnoběžnými stěnami (vsypávané vinutí, drážky S, L)	$B_{z1}$	1,7 až 1,9			1,6 až 1,8	1,9 až 2,1	1,8 až 2,0			1,7 až 1,9		
Zuby statoru v nejužším průřezu drážky polozavřené F drážky otevřené N, M	$B_{z1max}$	1,75 až 1,95			1,9 až 2,1		1,8 až 2,0					
		1,6 až 1,8			1,7 až 1,9							

Obr.10 Dovolené hodnoty B [T] pro různé části motoru[5]

Zvolené hodnoty:

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

$$B_{z1} = 1,8 \text{ T}$$

## Výška jha statoru

Kdy:[5]

$$h_{j1} = \frac{\phi}{2 \cdot B_{j1} \cdot l_i \cdot k_{Fe}} = 0,027 \text{ m} \quad (27)$$

Koeficient  $k_{FE}$  vybereme v tabulce na obr.11, kde jsou uvedeny i doporučené způsoby izolace.[5]

h (mm)	U (V)	Stator		Rotor nakrátko	
		způsob izolace	$k_{Fe}$	způsob izolace	$k_{Fe}$
50 až 250	< 660	vrstva oxidu	0,97	vrstva oxidu	0,97
280 až 355	< 660	lakování	0,95	lakování	0,95
400 až 560	6000	lakování	0,95	lakování	0,95

Obr.11 Doporučené způsoby izolace a koeficient  $k_{Fe}$  pro stator a rotor[5]

$$k_{Fe} = 0,97$$

### Šířka zubu

Nejprve musíme upravit vrtání statoru  $D$  o klínovou část. Podle tabulky D 4.1 z [5] je tato výška  $h_1 = 2,5$  mm.[5]

Vztah pro výpočet upraveného vrtání statoru  $D_1$ : [5]

$$D_1 = D + 2 \cdot h_1 = 0,2 + 2 \cdot 0,0025 = 0,2025 \text{ m} \quad (28)$$

Výpočet upravené drážkové rozteče  $t'_{d1}$ : [5]

$$t'_{d1} = \frac{\pi \cdot D_1}{Q_1} = 0,01325 \text{ m} \quad (29)$$

Následně předběžná šířka zubu  $b_{z1}$ : [5]

$$b_{z1} = \frac{B_\delta \cdot t'_{d1} \cdot l_i}{B_{z1} \cdot l_i \cdot k_{Fe}} = 0,00615 \text{ m} \quad (30)$$

Šířka drážky v horní části zubu získáme ze vzorce: [5]

$$b_1 = t'_{d1} - b_{z1} = 0,0071 \text{ m} \quad (31)$$

Výsledná hodnota se zaokrouhlí na nejbližší normovanou hodnotu dle tabulky D 4.1 na obr.12.[5]

$b_{1z}$	Drážka S a L					Drážka V			Drážka K			
	$b_0$	$h_0$	$h_1$	$u_1$	$\lambda_z$	$b_0$	$h_0$	$\lambda_z$	$d$	$b_0$	$h_0$	$\lambda d$
2,6								1,435	3			
2,8								1,460	3,3			
3								1,484	3,5	0,8	0,5	1,248
3,2	—	—	—	—	—	0,8	0,5	1,505	3,7			
3,4								1,524	4			
3,6								1,542	4,2			
3,8								1,558	4,4			
4			0,90	1,50	0,561			1,573	4,6			
4,2	2,2		1,00	1,40	0,587			1,595	5	1,0		1,323
4,4			0,95	1,55	0,517			1,610	5,2			
4,6	2,5		1,05	1,45	0,540			1,623	5,5		0,7	
4,8			1,15	1,35	0,562			1,636	6			
5			1,25	1,25	0,583	1,0	0,7	1,648	6,5			
5,2			1,35	1,15	0,603			1,659	7			
5,5			1,35	1,25	0,553			1,674	7,5			1,090
5,8	2,8	0,5	1,50	1,10	0,580			1,689	8			
6			1,50	1,00	0,550			1,697	8,5			
6,2			1,60	0,90	0,567			1,357	9	1,5		
6,5	3,0		1,75	0,75	0,590			1,372	9,5			
6,8			1,90	0,60	0,613			1,385	10			
7			1,90	0,50	0,585			1,394	10,5		1,0	1,290
7,2	3,2		2,00	0,40	0,599		0,7	1,402	11			
7,5			1,60	1,40	0,477	(1,5)		1,414	11,5			
7,8	3,5		1,72	1,28	0,493			1,425	12			
8			1,80	1,20	0,503			1,433	12,5			

Obr. 12 Rozměry drážek dle vinutí

$$b_1 = 7,2 \text{ mm}$$

### Hloubka drážky

Hloubka drážky:[5]

$$h_{d1} = \frac{D_e - D}{2} - h_{j1} = 0,028 \text{ m} \quad (32)$$

Hloubka části jen pro vodiče s vyloučením klínové části:[5]

$$h_2 = h_d - h_1 = 0,028 - 0,0025 = 0,0255 \text{ m} \quad (33)$$

Šířka drážky v horní části:[5]



$$b_2 = \frac{\pi \cdot (D_1 + 2 \cdot h_2) - Q_1 \cdot b_{z1}}{Q_1} = 0,01 \text{ m} \quad (34)$$

## Otevření drážky

Otevření drážky  $b_0$  je normalizovaná hodnota. Velikost této veličiny závisí na průměru izolovaného vodiče s přičtením 1,5-2 mm. Obvyklá hodnota bývá u malých strojů 1,8 mm a velkých motorů až 4 mm. Střední hodnoty  $b_0$  najdeme v tabulce 3 v závislosti na  $2p$  a  $h$ . [5]

h[mm]	počet pólů 2p					
	2	4	6	8	10	12
50-63	1,8	1,8	1,8			
71	2	2	2			
80-90	3	3	2,7			
100-112	3,5	3,5	3			
132	4	3,5	3,5			
160-250	4	3,7	3,7			
280-315					4	4

Tab.3 Střední hodnoty otevření polozavřených drážek  $b_0$  [mm][5]

$$b_0 = 3,7 \text{ mm}$$

## Plocha příčného průřezu drážky

Dle vztahu:[5]

$$S_d = \frac{b_1 + b_2}{2} h_2 = \frac{0,0072 + 0,01}{2} \cdot 0,0255 = 0,000219 \text{ m} \quad (35)$$

## Světlé rozměry drážky

Pro výpočet činitele je nutné znát plochu drážky, kterou zaujímá izolace a plochu izolační vložky v drážce a je nutné znát i vůle na složení plechů  $\Delta b_d$  a  $\Delta h_d$ , které odečteme v tabulce 4, světlých rozměrů drážky  $b'_1$  a  $b'_2$ . [5]

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

Tab.4 Vůle plechů  $\Delta b_d$  a  $\Delta h_d$  v závislosti na výšce osy h [5]

$$\Delta b_d = 0,2 \text{ mm}$$

$$\Delta h_d = 0,2 \text{ mm}$$

Pak vztahy pro dopočet světlých ploch bude:[5]

$$b'_1 = b_1 - \Delta b_d = 0,0072 - 0,0002 = 0,007 \text{ m} \quad (36)$$

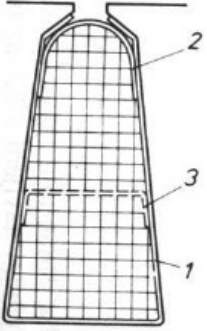
$$b'_2 = b_2 - \Delta b_d = 0,01 - 0,0002 = 0,0998 \text{ m} \quad (37)$$

$$h'_2 = h_2 - \Delta h_d = 0,0255 - 0,0002 = 0,0253 \text{ m} \quad (38)$$

Plocha drážky pro drážkovou izolaci:[5]

$$S_i = b_i \cdot (2 \cdot h_d + b_1 + b_2) = 0,0004 \cdot (2 \cdot 0,028 + 0,0072 + 0,01) = 0,000029 \text{ m}^2 \quad (39)$$

kdy  $b_i$  je jednostranná tloušťka izolace v drážce, kterou nalezneme na obr.12.

Vinutí	Typ vinutí	$h$ (mm)	Pozice	Tloušťka (mm)	Počet vrstev	Jednostranná tloušťka izolace (mm)
	jednovrstvá	50 až 80	1 2	0,2 0,3	1 1	0,2 0,3
		90 až 132	1 2	0,25 0,35	1 1	0,25 0,35
		160	1 2	0,4 0,5	1 1	0,4 0,5
	dvouvrstvá	180 až 250	1 2 3	0,4 0,5 0,4	1 1 1	0,4 0,5 0,4

Obr.12 Izolace vsypávaných vinutí asynchronních motorů[5]

Plocha drážky zbývající pro vinutí se určí vztahem:[5]

$$S'_d = \frac{b'_1 + b'_2}{2} \cdot h'_2 - S_i - S_{vl} = \frac{0,007 + 0,0988}{2} \cdot 0,0253 - 0,000029 - 0,01188 = 0,00071 \text{ m} \quad (40)$$

kdy  $S_{vl}$  je plocha vložek mezi vrstvami vinutí v drážce pro motory a  $h = 180-250 \text{ mm}$ :[5]

$$S_{vl} = (0,4 \cdot b_1 + 0,9 \cdot b_2) = 0,01188 \text{ m}^2 \quad (41)$$

## Volba vzduchové mezery

Šířka vzduchové mezery velmi ovlivňuje energetické ukazatele stroje. Na velikosti mezery závisí magnetický odpor a s tím magnetického napětí, které vytváří magnetomotorické napětí stroje. Se zmenšením  $\delta$  se zmenšuje magnetomotorické napětí a tím i magnetizační proud motoru. Při návrhu se vychází z minima výsledných ztrát, protože s navyšující se  $\delta$  rostou i ztráty ve vinutí, avšak ztráty pulzní a povrchové klesají. Tyto výpočty se provádějí v simulačních programech. Pro návrh použijí empirických vztahů:[5]

$$\delta \approx (0,25 + D) \cdot 10^{-3} = (0,25 + 0,2) \cdot 10^{-3} = 0,45 \text{ mm} \quad (42)$$

Tato hodnota se zaokrouhluje na 0,05 mm pokud je  $\delta < 0,5$  mm.[5] Výsledná hodnota  $\delta$  je 0,45 mm.

## Určení rotoru

Dle zadání bude v navrhovaném motoru rotor nakrátko. Tento specifický rotor je tvořen měděnými tyčemi spojenými na koncích mosaznými kruhy.[7] Toto vinutí rotoru nemá určitý počet fází a pólů. Tento fakt dovoluje použití jednoho typu rotoru u strojů navržených pro různý počet pólů.[5] Počet drážek na rotoru  $Q_2$  volí podle doporučených hodnot z tabulky na obr.13. Platí, že  $Q_2 < Q_1$ . [5]

Volím tedy drážky nenatočené a  $Q_2 = 34$ .

## Hlavní rozměry

Vnější průměr rotoru:[5]

$$D_2 = D - 2\delta = 0,2 - 2 \cdot 0,00045 = 0,1991 \text{ m} \quad (43)$$

Délka rotoru:[5]

$$l_d = l_1 = l_2 = l_{Fel} = l_i = 0,11 \text{ m} \quad (44)$$

Drážková rozteč:[5]

$$t_{d2} = \frac{\pi \cdot D_2}{Q_2} = \frac{\pi \cdot 0,1991}{34} = 0,0184 \text{ m} \quad (45)$$

Vnitřní průměr rotoru:[5]

Vnitřní průměr závisí na vnitřním průměru hřídele  $D_e$  a činiteli  $k_h$ , který je uveden v tab. 4.

[5]

h[mm]	71-250
2p	2 až 8
$k_h$	0,23

Tab.4 činitel  $k_h$  pro výpočet průměru hřídele

$$k_h = 0,23$$

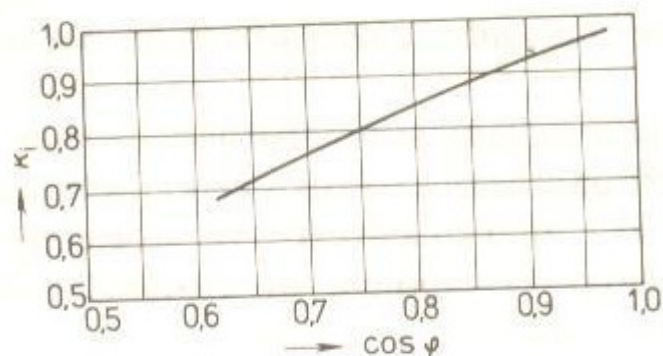
$$D_h \approx k_h \cdot D_e = 0,0713 \text{ m} \quad (46)$$

### Tyč rotoru

Proud tyčí:[5]

$$I_2 = k_i \cdot I_1 \cdot p_i = 0,89 \cdot 38,34 \cdot 19,48 = 664,36 \text{ A} \quad (47)$$

kdy  $k_i$  je činitel uvažující vliv magnetizačního proudu a odporů na poměr  $\frac{I_1}{I_2}$ . Tento činitel získáme z obr.14 a  $p_i$  je koeficient přepočtu proudů.[5]



Obr.14 Činitel  $k_i$  v závislosti na  $\cos \varphi$ [5]

$$k_i = 0,89$$

Koeficient  $p_i$  se vypočítá ze vztahu:[5]

$$p_i = \frac{m_1 \cdot N_1 \cdot k_{v1}}{m_2 \cdot N_2 \cdot k_{v2}} = \frac{2 \cdot m_1 \cdot N_1 \cdot k_{v1}}{Q_2} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 120 \cdot 0,92}{34} = 19,48 \quad (48)$$

Proudová hustota:[5]

$$J_2 = 3 \cdot 10^{-6} \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$$

Proudová hustota se pro zavřené odlévané rotory volí mezi  $(2,5 \text{ až } 3,5) \cdot 10^{-6} \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$ . [5]

Průřez tyče:[5]

$$S_t = \frac{I_2}{J_2} = \frac{664,36}{3 \cdot 10^6} = 2,21 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \quad (49)$$

## Rozměr drážky

V asynchronních motorech s výškou osy  $h$  160 až 250 mm se používají zavřené drážky s rozměry  $b_0 = 1,5 \text{ mm}$ ,  $h_0 = 0,7 \text{ mm}$  a u motorů s  $2p \geq 4$  je výška můstku nad drážkou  $h'_0 = 0,3 \text{ mm}$ . Další rozměry zjistíme z průřezu tyče  $S_t$ . [5]

Šířka zubu rotoru:[5]

$$b_{z2} = \frac{B_\delta \cdot t_{d2} \cdot l_2}{B_{z2} \cdot l_{Fe2} \cdot k_{Fe}} = \frac{0,81 \cdot 0,0184 \cdot 0,11}{1,9 \cdot 0,11 \cdot 0,97} = 0,008086 \text{ m} \quad (50)$$

Kdy  $B_{z2}$  je magnetická indukce v zubech rotoru. Její hodnotu určíme z tab na obr. 10.

$$B_{z2} = 1,9 \text{ T}$$

Průměr zaoblení horní části:[5]

$$b_1 = \frac{\pi(D_2 - 2h_0 - 2h'_0) - Q_2 b_{z2}}{\pi + Q_2} = \frac{\pi(0,1991 - 2 \cdot 0,7 - 2 \cdot 0,3) - 34 \cdot 0,0080686}{\pi + 34} = 0,00927 \text{ m} \quad (51)$$

Průměr zaoblení dolní části:[5]

$$b_2 = \sqrt{\frac{b_1^2 \cdot \left(\frac{Q_2 + \pi}{\pi} + \frac{\pi}{2}\right) - 4S_t}{\frac{Q_2}{\pi} - \frac{\pi}{2}}} = \sqrt{\frac{0,00927^2 \cdot \left(\frac{34}{\pi} + \frac{\pi}{2}\right) - 4 \cdot 0,000221}{\frac{34}{\pi} - \frac{\pi}{2}}} = 0,00442 \text{ m} \quad (52)$$

Vzdálenost středů zaoblení:[5]

$$h_1 = (b_1 - b_2) \frac{Q_2}{2\pi} = (0,00927 - 0,00442) \frac{34}{2\pi} = 0,0262 \text{ m} \quad (53)$$

Nyní provedeme přesnější dopočet průřezu tyče:[5]

$$S_t = \frac{\pi}{8}(b_1^2 + b_2^2) + \frac{1}{2}(b_1 + b_2)h_1 = 0,000221 \text{ m} \quad (54)$$

### Upřesnění šířky zubu

Protože velikostí šířek  $b_1$  a  $b_2$  jsou zaokrouhlené, je nutné provést dopočet výsledné šířky zubu ve 2 průřezech. Výsledné velikosti jsou již definitivní.[5]

Vztah pro první průřez:[5]

$$b_2' = \pi \frac{D_2 - 2h_0 - b_1}{Q_2} - b_1 = \pi \frac{0,1991 - 2 \cdot 0,0007 - 0,00927}{34} - 0,00927 = 0,0174 \text{ m} \quad (55)$$

Vztah pro druhý průřez:[5]

$$b_{z2}'' = \pi \frac{D_2 - 2h_{d2} - b_2}{Q_2} - b_2 = \pi \frac{0,1991 - 2 \cdot 0,033745 - 0,00442}{34} - 0,00442 = 0,00733 \text{ m} \quad (56)$$

kdy  $h_{d2}$  je hloubka drážky:[5]

$$h_{d2} = \frac{1}{2}(b_1 + b_2) + h_1 + h_0 = \frac{1}{2}(0,00927 + 0,00442) + 0,0262 + 0,0007 = 0,033745 \text{ m} \quad (57)$$

Konečnou šířku zubu upravíme pro další výpočty na hodnotu  $b_{z2} = 0,00733 \text{ m}$ .

### Kruh nakrátko

Proud kruhem získáme ze vztahu:[5]

$$I_{kn} = \frac{I_2}{\Delta} = \frac{664,36}{0,3696} = 1797,5 \text{ A} \quad (58)$$

$$\text{kdy } \Delta = 2 \sin \frac{p \cdot \pi}{Q_2} = 2 \sin \frac{2 \cdot \pi}{34} = 0,3696 \quad (59)$$

Proudová hustota:[5]

$$J_{kn} = 0,8 \cdot J_2 = 0,8 \cdot 3000000 = 2400000 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2} \quad (60)$$

Proudová hustota se v kruzích volí z důvodu zlepšení rozběhových charakteristik. Kruhy v rotoru fungují i jako ventilátor. Proudová hustota se v tyčích volí o 15 až 20 % menší než  $J$  v tyčích.

[5]

Následný výpočet průřezu kruhu nakrátko:[5]

$$S_{kn} = \frac{I_{kn}}{J_{kn}} = \frac{1797,5}{2400000} = 0,000749 \text{ m}^2 \quad (61)$$

Kruh nakrátko má tvar nepravidelného lichoběžníka. Střední výška bývá větší nebo rovna výšce drážky rotoru s přidáním 25 % výšky drážky:[5]

$$a_{kn} = 1,25 \cdot h_{d2} = 1,25 \cdot 0,033745 = 0,042 \text{ m} \quad (62)$$

Ze vztahu pro výpočet průřezu kruhu:[5]

$$S_{kn} = a_{kn} \cdot b_{kn} = 0,0007476 \text{ [m}^2\text{]} \quad (63)$$

Vzorec upravíme pro výpočet šířky kruhu nakrátko:[5]

$$b_{kn} = \frac{S_{kn}}{a_{kn}} = \frac{0,000749}{0,042} = 0,0178 \text{ m} \quad (64)$$

Střední průměr kruhu nakrátko:[5]

$$D_{kn} = D_2 - a_{kn} = 0,1571 \text{ m} \quad (65)$$

## Výpočet magnetického obvodu

Při výpočtu magnetického obvodu se uvažuje chod motoru naprázdno. Při tomto ději je typické pro asynchronní stroje velké sycení zubů jak statoru, tak i rotoru. To má za následek zploštění křivky pole ve vzduchové mezeře.

### Hodnoty indukci

Zub statoru:[5]

$$B_{z1} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{d1} \cdot l_i}{b_{z1} \cdot l_{Fe} \cdot k_{Fe}} = \frac{0,81 \cdot 0,013 \cdot 0,11}{0,00615 \cdot 0,11 \cdot 0,97} = 1,77 \text{ T} \quad (66)$$

Zub rotoru:[5]

$$B_{z2} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{d2} \cdot l_i}{b_{z2} \cdot l_{Fe} \cdot k_{Fe}} = \frac{0,81 \cdot 0,0184 \cdot 0,11}{0,008086 \cdot 0,11 \cdot 0,97} = 1,9 \text{ T} \quad (67)$$

Jho statoru:[5]

$$B_{j1} = \frac{\phi}{2h'_{j1} \cdot l_{Fe1} \cdot k_{Fe}} = \frac{0,0087}{2 \cdot 0,027 \cdot 0,11 \cdot 0,97} = 1,51 \text{ T} \quad (68)$$

kde  $h'_{j1}$  je dáno vztahem:[5]

$$h'_{j1} = \frac{D_e - D}{2} - h_{d1} = \frac{0,31 - 0,2}{2} - 0,028 = 0,027 \text{ m} \quad (69)$$

Jho rotoru:[5]

$$B_{j2} = \frac{\phi}{2h'_{j2} \cdot l_{Fe2} \cdot k_{Fe}} = \frac{0,0087}{2 \cdot 0,0411 \cdot 0,11 \cdot 0,97} = 0,99 \text{ T} \quad (70)$$

kde  $h'_{j2}$  je dáno vztahem:[5]

$$h'_{j2} = \frac{2+p}{3,2p} \left( \frac{D_2}{2} - h_{d2} \right) = \frac{2+2}{3,2 \cdot 2} \left( \frac{0,1991}{2} - 0,033745 \right) = 0,0411 \text{ m} \quad (71)$$

## Magnetické napětí

Výpočet Cartelova činitele:[5]

$$k_c = \frac{t_{d1}}{t_{d1} - \gamma \cdot \delta} = \frac{0,013}{0,013 - 5,11 \cdot 0,00045} = 1,21 \quad (72)$$

$$\text{kdy } \gamma = \frac{\left( \frac{b_0}{\delta} \right)^2}{5 + \frac{b_0}{\delta}} = \frac{\left( \frac{0,0037}{0,00045} \right)^2}{5 + \frac{0,0037}{0,00045}} = 5,11 \quad (73)$$

Magnetické napětí ve vzduchové mezeře je dáno vztahem:[5]

$$U_\delta = \frac{2}{\mu_0} \cdot B_\delta \cdot \delta \cdot k_c = \frac{2}{4\pi \cdot 10^{-7}} \cdot 0,8087 \cdot 0,00045 \cdot 1,21 = 701,26 \text{ A} \quad (74)$$

Magnetické napětí na zubu statoru vypočítáme:[5]

$$U_{z1} = 2h_{z1} \cdot H_{z1} = 2 \cdot 0,028 \cdot 1400 = 78,4 \text{ A} \quad (75)$$

kdy  $h_{z1}$  je výpočtová výška statoru, kterou získáme ze vztahu:[5]

$$h_{z1} = h_1 + h_2 = 0,0025 + 0,0255 = 0,028 \text{ m} \quad (76)$$

a  $H_{z1}$  odečteme z tabulky magnetické charakteristiky ocelí na obr. 15.[5]



B (T)	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H (A · m <sup>-1</sup> )									
0,4	124	127	130	133	136	138	141	144	147	150
0,5	154	157	160	164	167	171	174	177	180	184
0,6	188	191	194	198	201	205	208	212	216	220
0,7	223	226	229	233	236	240	243	247	250	253
0,8	256	259	262	265	268	271	274	277	280	283
0,9	286	290	293	297	301	304	308	312	316	320
1,0	324	329	333	338	342	346	350	355	360	365
1,1	370	375	380	385	391	396	401	406	411	417
1,2	424	430	436	442	448	455	461	467	473	479
1,3	486	495	504	514	524	533	543	554	564	575
1,4	586	598	610	622	634	646	658	670	683	696
1,5	709	722	735	749	763	777	791	805	820	835
1,6	850	878	906	934	962	990	1 020	1 050	1 080	1 110
1,7	1 150	1 180	1 220	1 250	1 290	1 330	1 360	1 400	1 440	1 480
1,8	1 520	1 570	1 620	1 670	1 720	1 770	1 830	1 890	1 950	2 010
1,9	2 070	2 160	2 250	2 340	2 430	2 520	2 640	2 760	2 890	3 020
2,0	3 150	3 320	3 500	3 680	3 860	4 040	4 260	4 480	4 700	4 920
2,1	5 140	5 440	5 740	6 050	6 360	6 670	7 120	7 570	8 020	8 470
2,2	8 920	9 430	9 940	10 460	10 980	11 500	12 000	12 600	13 200	13 800
2,3	14 400	15 100	15 800	16 500	17 200	18 000	18 800	19 600	20 500	21 400

Obr. 15 Magnetická charakteristika oceli 2013 pro zuby motoru[5]

$$H_{z1(B=1,77\text{ T})} = 1400 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$$

Magnetické napětí na zubu statoru získáme ze vztahu:[5]

$$U_{z2} = 2h_{z2} \cdot H_{z2} = 2 \cdot 0,033745 \cdot 2070 = 139,7 \text{ A} \quad (77)$$

kdy  $h_{z2}=h_{d2}=0,033745 \text{ m}$  je výpočtová výška zubu rotoru a  $H_{z2}$  je magnetická intenzita zubu rotoru, kterou odečteme z tabulky na ob. 15.[5]

$$H_{z2} = 2070 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$$

Činitel nasycení zubů:[5]

$$k_z = 1 + \frac{U_{z1} + U_{z2}}{U_\delta} = 1 + \frac{78,4 + 139,7}{701,26} = 1,3 \quad (78)$$

Výsledná hodnota činitele by se měla pohybovat mezi 1,2 až 1,5. Pokud by byla výsledná hodnota vyšší, značí to buď přesycování zubů nebo malou vzduchovou mezeru. Kdyby hodnota vycházela menší, železo v zubech je málo syceno nebo vzduchová mezera je příliš úzká.

Magnetické napětí jha statoru:[5]

$$U_{j1} = l_{j1} \cdot H_{j1} = 0,222 \cdot 722 = 160,28 \text{ A} \quad (79)$$

kdy  $H_{j1}$  určíme z tabulky na obr. 15 a hodnota  $l_{j1}$  je délka magnetické indukční čáry, kterou určíme podle vztahu:[5]

$$l_{j1} = \frac{\pi(D_e - h_{j1})}{2p} = \frac{\pi(0,31 - 0,027)}{4} = 0,222 \text{ m} \quad (80)$$

$$H_{j1} = 722 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$$

Magnetické napětí jha rotoru:[5]

$$U_{j2} = l_{j2} \cdot H_{j2} = 0,0323 \cdot 320 = 10,33 \text{ A} \quad (81)$$

kdy  $H_{j2}$  určíme z tabulky na obr. 15 a hodnota  $l_{j2}$  je délka magnetické indukční čáry, kterou určíme podle vztahu:[5]

$$l_{j2} = \frac{\pi(D_h - h_{j2})}{2p} = \frac{\pi(0,0713 - 0,0302)}{4} = 0,0323 \text{ m} \quad (82)$$

$$\text{kde } h_{j2} = \frac{D_2 - D_i}{2} - h_{d2} = \frac{0,1991 - 0,0713}{2} - 0,033745 = 0,0302 \text{ m} \quad (83)$$

$$H_{j2} = 320 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$$

Konečné magnetické napětí na jednu pólovou dvojici je dáno vztahem:[5]

$$F_m = U_\delta + U_{z1} + U_{z2} + U_{j1} + U_{j2} = 1089,96 \text{ A} \quad (84)$$

Činitel nasycení magnetického obvodu je dle vztahu:[5]

$$k_\mu = \frac{F_m}{U_\delta} = \frac{1089,96}{701,26} = 1,55 \quad (85)$$

Magnetizační proud je dán vztahem:[5]

$$I_\mu = \frac{p \cdot F_m}{0,9 \cdot m_1 \cdot N_1 \cdot k_{v1}} = \frac{2 \cdot 1089,96}{0,9 \cdot 3 \cdot 120 \cdot 0,92} = 7,31 \text{ A} \quad (86)$$

Poměrný magnetizační proud:[5]

$$i_\mu = \frac{I_\mu}{I_{1N}} = \frac{7,31}{38,32} = 0,2 \quad (87)$$

Tato poměrná veličina by se měla svou hodnotou pohybovat v rozmezí 0,2 až 0,35 pro čtyřpólové

stroje.[5]

## Odpor a reaktance

### Odpor jedné fáze statorového vinutí

Střední šířka cívký je dána vztahem

$$b_c = \frac{\pi(D + h_{d1})}{2p} \beta = \frac{\pi(0,2 + 0,028)}{4} = 0,1787 \text{ m} \quad (89)$$

kde  $\beta$  je poměrný činitel zkrácení kroku vinutí statoru. Pro dvouvrstvá a vsypávaná vinutí je uvažován  $\beta_1 = 1$ . [5]

Délku čela vypočítáme ze vztahu:[5]

$$l_c = K_c \cdot b_c + 2B = 1,3 \cdot 0,1787 + 2 \cdot 0,01 = 0,2523 \text{ m} \quad (90)$$

kdy B u vsypávaných vinutí uvažujeme  $B=0,01$  a činitele  $K_c$  odečteme z tabulky na obr. 16.[5]

$$K_c = 1,3$$

počet pólů 2p	cívky statoru			
	čela neizolovaná		čela izolovaná páskou	
	$K_c$	$K_v$	$K_c$	$K_v$
2	1,2	0,26	1,45	0,44
4	1,3	0,4	1,55	0,5

Tab. 5 Koeficienty cívek statoru k výpočtu rozměrů čel[5]

střední délka závitu je dána vztahem:[5]

$$l_{av} = 2(l_d + l_c) = 2(0,11 + 0,2523) = 0,7246 \text{ m} \quad (91)$$

kde  $l_d$  je délka drážkové části, která je rovna délka statorového svazku:[5]

$$l_d = l_1 = l_2 = l_i \quad (92)$$

Celková délka vodičů jedné fáze vinutí:[5]

$$L = l_{av} \cdot N = 86,95 \text{ m} \quad (93)$$

Celková odpor jedné fáze vinutí:[5]

$$R_1 = \rho_v \cdot \frac{L}{S_v \cdot a} = \rho_v \cdot \frac{L}{S_v \cdot a} = \frac{1,22 \cdot 10^{-6}}{56} \cdot \frac{94,55}{1,539 \cdot 10^{-6} \cdot 2} = 0,669 \Omega \quad (94)$$

Pracovní teplota je 75°C, avšak rezistivita mědi se uvádí pro 20°C a má hodnotu  $\rho_{20^\circ} = \frac{1}{56} \mu\Omega \cdot m$

Přepočítáním na požadovanou rezistivitu pro pracovní teplotu stroje:[5]

$$\rho_{75^\circ} = \rho_{20^\circ} \cdot 1,22 \quad (95)$$

### Odpor fáze rotorového vinutí

Odpor tyče je dán vztahem:[5]

$$R_t = \rho_t \frac{l_2}{S_t} = \frac{1,22 \cdot 10^{-6}}{56} \cdot \frac{0,11}{0,000221} = 1,08 \cdot 10^{-5} \Omega \quad (96)$$

Velikost odporu kruhu nakrátko získáme ze vztahu:[5]

$$R_{kn} = \rho_{kn} \frac{\pi \cdot D_{kn}}{Q_2 \cdot S_{kn}} = \frac{1,22 \cdot 10^{-6}}{56} \cdot \frac{\pi \cdot 0,1571}{34 \cdot 0,0007476} = 4,23 \cdot 10^{-7} \Omega \quad (97)$$

Odpor jedné fáze rotorového vinutí:[5]

$$R_2 = R_t + 2 \frac{R_{kn}}{\Delta^2} = 1,08 \cdot 10^{-5} + 2 \frac{4,23 \cdot 10^{-7}}{0,3696^2} = 1,699 \cdot 10^{-5} \Omega \quad (98)$$

Odpor jedné fáze statorového vinutí po přepočítání na počet závitů je dán vztahem:[5]

$$R'_2 = R_2 \cdot 4 \cdot m_1 \cdot \frac{(N_1 \cdot k_{v1})^2}{Q_2} = 1,699 \cdot 10^{-5} \cdot 4 \cdot 3 \cdot \frac{(120 \cdot 0,92)^2}{34} = 0,073 \Omega \quad (99)$$

### Rozptylová reaktance fáze statorového vinutí

Činitel magnetické vodivosti drážky získáme ze vztahu:[5]

$$\lambda_{d1} = \frac{h_2 - u}{3b_1} \cdot k_\beta + \left( \frac{u}{b_1} + \frac{3h_a}{b_1 + 2b_0} + \frac{h_b}{b_0} \right) \cdot k' \beta \quad (100)$$

$$\lambda_{d1} = \frac{0,0255 - 0,0004}{3 \cdot 0,0072} \cdot 0,812 + \left( \frac{0,0004}{0,0072} + \frac{3 \cdot 0,002}{0,0072 + 2 \cdot 0,0032} + \frac{0,0005}{0,0032} \right) \cdot 0,7495 = 2,25$$

$$\text{kde } k'_\beta = 0,25 \cdot (1 + 3\beta) = 0,25 \cdot (1 + 3 \cdot 0,666) = 0,7495 \quad (101)$$

$$\text{když } \beta = \frac{y_{1d}}{Q_1} = \frac{8}{12} = 0,25 \quad (102)$$

$$k_\beta = 0,25 \cdot (1 + 3k'_\beta) = 0,25 \cdot (1 + 3 \cdot 0,7495) = 0,812 \quad (103)$$

Koeficienty  $u$ ,  $h_a$ ,  $h_b$  udávají rozměry klínu a klínové drážky. Velikosti těchto hodnot jsou uvedeny na obr.12.[5]

Činitel magnetické vodivosti rozptylu čel je dán vztahem:[5]

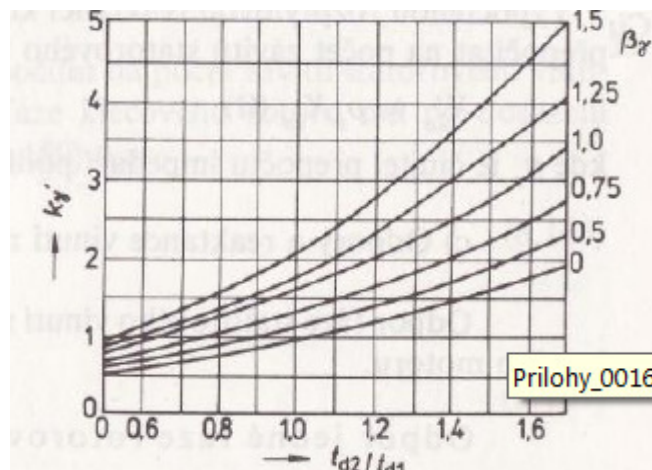
$$\lambda_{\varepsilon 1} = 0,34 \cdot \frac{q}{l_i} (l_{\varepsilon} - 0,64\beta \cdot t_p) = 0,34 \cdot \frac{4}{0,11} (0,2523 - 0,64 \cdot 0,666 \cdot 0,16) = 2,28 \quad (104)$$

Činitel magnetické vodivosti diferenčního rozptylu čel je dán vztahem:[5]

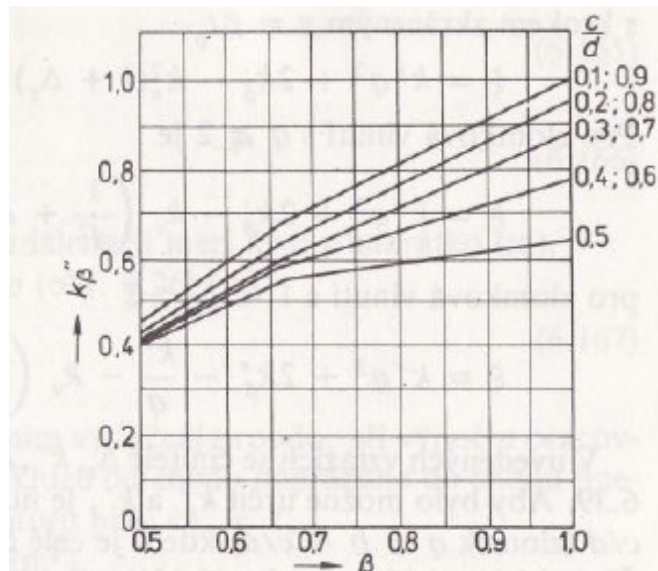
$$\lambda_{dif1} = \xi \cdot \frac{t_{d1}}{12 \cdot \delta \cdot k_c} = \frac{0,131}{12 \cdot 0,0045 \cdot 1,21} \cdot 0,13 = 2,61 \quad (105)$$

$$\text{kde } \xi = 2 \cdot k'_{\gamma} \cdot k_{\beta} - k_{v1}^2 \cdot \left( \frac{t_{d2}}{t_{d1}} \right)^2 \cdot (1 + \beta_{\gamma}^2) = 2 \cdot 1,5 \cdot 0,6 - 0,92^2 \cdot \left( \frac{0,0184}{0,0131} \right)^2 \cdot (1 + 0^2) = 0,13 \quad (106)$$

činitel  $k'_{\gamma} = 2,5$  a určíme ho z tabulky na obr. 16, kde je vykreslena závislost poměrů drážkových roztečí na  $k'_{\gamma}$ . Konečnou hodnotu získáme zvolením křivky  $\beta_{\gamma} = 1$ . Koeficient  $k_{\beta}$  odečítáme z grafické závislosti na obr. 17.[5]



Obr. 16 Činitel  $k'_{\gamma}$  v závislosti na poměru drážkových roztečí



Obr. 17 Závislost  $k_\beta$  na  $\beta$

Rozptylová reaktance jedné fáze statorového vinutí je dána vztahem:[5]

$$X_{1\sigma} = 15,8 \cdot \frac{f}{100} \cdot \left(\frac{N_1}{100}\right)^2 \cdot \frac{l_2}{pq} \cdot (\lambda_{d1} + \lambda_{e1} + \lambda_{dif1}) \quad (107)$$

$$X_{1\sigma} = 15,8 \cdot \frac{50}{100} \cdot \left(\frac{120}{100}\right)^2 \cdot \frac{0,11}{2 \cdot 4} \cdot (2,25 + 2,28 + 2,61) = 1,117 \Omega \quad (108)$$

### Rozptylová reaktance fáze rotorového vinutí

Činitel magnetické vodivosti drážkového rozptylu:[5]

$$\lambda_{d2} = \left[ \frac{h_1}{3b_1} \cdot \left(1 - \frac{\pi \cdot b_1^2}{8S_1}\right)^2 + 0,66 - \frac{b_0}{2b_1} \right] \cdot k_d + \frac{h_0}{b_0} \quad (109)$$

$$\lambda_{d2} = \left[ \frac{0,0262}{3 \cdot 0,00927} \cdot \left(1 - \frac{\pi \cdot 0,00927^2}{8 \cdot 0,000221}\right)^2 + 0,66 - \frac{0,0032}{2 \cdot 0,00927} \right] \cdot 1 + \frac{0,0005}{0,032} = 1,4 \quad (110)$$

Při jmenovitém chodu je  $k_d = 1$ . [5]

Činitel magnetické vodivosti čel je dán vztahem:[5]

$$\lambda_{e2} = \frac{2,3 \cdot D_{kn}}{Q_2 \cdot l_2 \cdot \Delta^2} = \frac{2,3 \cdot 0,1571}{34 \cdot 0,11 \cdot 0,3696^2} = 0,71 \quad (111)$$

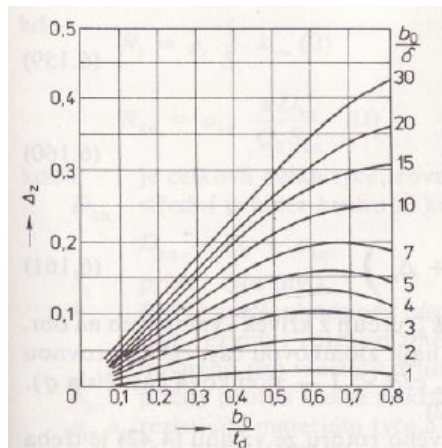
Činitel magnetické vodivosti diferenčního rozptylu:[5]

$$\lambda_{dif2} = \xi \cdot \frac{t_{d2}}{12 \cdot \delta \cdot k_c} = \frac{0,0184}{12 \cdot 0,0045 \cdot 1,21} \cdot 0,505 = 0,142$$

$$\text{kde } \xi = 1 + \frac{1}{5} \cdot \left( \frac{\pi \cdot p}{Q_2} \right)^2 - \frac{\Delta_z}{1 - \left( \frac{p}{Q_2} \right)^2} = 1 + \frac{1}{5} \cdot \left( \frac{\pi \cdot 2}{34} \right)^2 - \frac{0,5}{1 - \left( \frac{2}{34} \right)^2} = 0,505 \quad (113)$$

činitel  $\Delta_z = 0,5$  a odečet je z tabulky na obr. 18, kde je vykreslena grafická závislost poměrů

na  $\frac{b_0}{t_d} \cdot [5]$



Obr. 18 Grafická závislost  $\frac{b_0}{t_d}$  na  $\Delta_z$

Rozptylová reaktance fáze rotorového vinutí je dána vztahem:[5]

$$X_{2\sigma} = 7,9 \cdot f_1 \cdot l_i \cdot (\lambda_{d2} + \lambda_{c2} + \lambda_{dif2}) \cdot 10^{-6} \Omega \quad (114)$$

$$X_{2\sigma} = 7,9 \cdot 50 \cdot 0,11 \cdot (1,4 + 0,71 + 0,142) \cdot 10^{-6} = 9,78 \cdot 10^{-6} \Omega$$

Rozptylová reaktance jedné fáze statorového vinutí po přepočítání na počet závitů je dána vztahem:[5]

$$X'_{2\sigma} = X_{2\sigma} \cdot 4 \cdot m_1 \cdot \frac{(N_1 \cdot k_{v1})^2}{Q_2} = 9,78 \cdot 10^{-6} \cdot 4 \cdot 3 \cdot \frac{(120 \cdot 0,92)^2}{34} = 0,042 \Omega \quad (115)$$

## Poměrné hodnoty odporů a reaktancí

Poměrné hodnoty odporu fáze statoru a rotoru pro jednu fázi jsou dány vztahem:[5]

$$r_1 = R_1 \cdot \frac{I_{1N}}{U_{1N}} = 0,669 \cdot \frac{38,32}{230} = 0,111 \quad (116)$$

$$r'_2 = R'_2 \cdot \frac{I_{1N}}{U_{1N}} = 0,073 \cdot \frac{38,32}{230} = 0,0121 \quad (117)$$

Poměrné hodnoty rozptylových reaktancí fáze statoru a rotoru pro jednu fázi jsou dány vztahem:[5]

$$x_{1\sigma} = X_{1\sigma} \cdot \frac{I_{1N}}{U_{1N}} = 1,117 \cdot \frac{38,32}{230} = 0,186 \quad (118)$$

$$x'_{2\sigma} = X'_{2\sigma} \cdot \frac{I_{1N}}{U_{1N}} = 0,042 \cdot \frac{38,32}{230} = 0,007 \quad (119)$$

## Návrh vinutí

Parametry pro výpočet:

vinutí – smyčkové, dvouvrstvé, nekřížené, paralelní, počet cívkových stran v celé cívce:

$$2u = 2; m' = 6; m = 3; q = 6; a = 1; p = 3; Q = 54$$

Výpočet:[5]

$$\text{Počet cívek: } K = u \cdot Q = 1 \cdot 48 \quad (120)$$

Počet drážek na pól:

$$Q_p = \frac{Q_1}{2p} = \frac{48}{4} = 12 \quad (121)$$

Krok na komutátoru v počtu lamel:

$$y_k = \varepsilon \cdot K \pm \frac{a}{p} = \frac{a}{p} = \frac{2}{2} = 1 \quad (122)$$

Koeficient  $\varepsilon = 0$  pro smyčková vinutí a koeficient  $a = p$  pro paralelní vinutí.[5]

Cívkový krok mezi přední a zadní stranou téže cívky udané v počtu drážek:



$$y_{1d} = \frac{Q_p}{2p} = \frac{12}{4} = 3 \quad (123)$$

Cívkový krok mezi přední a zadní stranou těže cívky udané v počtu cívkových stran:

$$y_1 = 2u \cdot y_{1d} + 1 = 2 \cdot 2 \cdot 3 + 1 = 13 \quad (124)$$

Cívkový krok mezi přední cívkovou stranou jedné cívky a přední cívkovou stranou cívky následující udané v počtu cívkových stran:

$$y = 2 \cdot y_k = 2 \cdot 1 = 2 \quad (125)$$

Cívkový krok mezi zadní cívkovou stranou jedné cívky a přední cívkovou stranou cívky následující udané v počtu cívkových stran:

$$y_2 = y - y_1 = 2 - 13 = -11 \quad (126)$$

Počet fázových svazků:

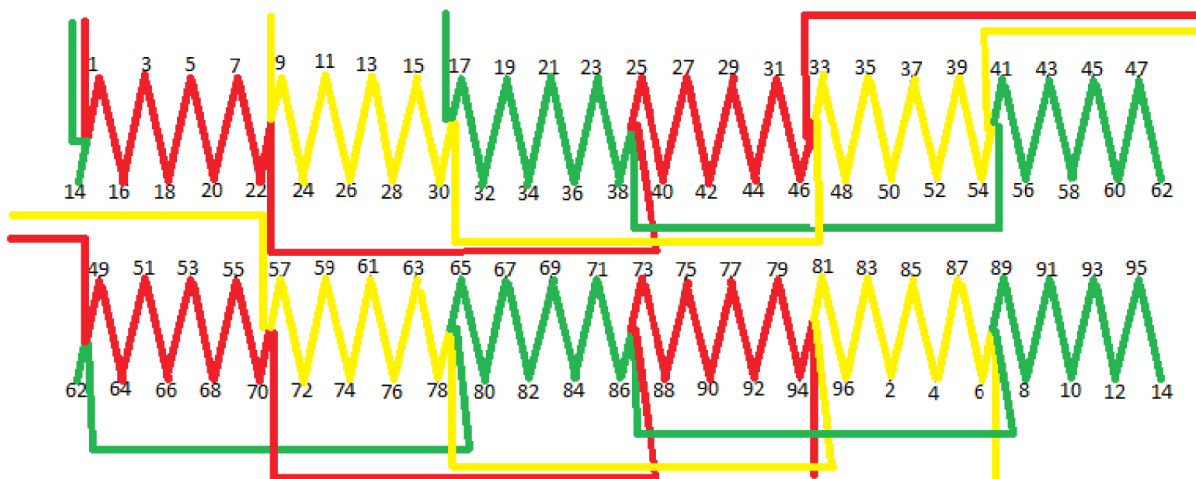
$$f_c = m' \cdot a = 6 \cdot 2 = 12 \quad (127)$$

Počet fázových svazků na fázi:

$$f_t = \frac{m' \cdot a}{m} = \frac{6 \cdot 2}{3} = 4 \quad (128)$$

Počet cívek ve svazku:

$$k_1 = \frac{Q_p}{m' \cdot a} = \frac{48}{6 \cdot 2} = 4 \quad (129)$$



Obr.19 Schéma vinutí

### Výpočet ztrát

Ztráty v asynchronních motorech dělíme na ztráty v železe, ty se dělí dále na hlavní a dodatečné, ve vinutí, ventilační, mechanické a dodatečné při zátěži.[5]

**Hlavní ztráty v železe vlivem hystereze:[5]**

$$\Delta P_{Feh} = \Delta p_{1,0} \cdot \left(\frac{f_1}{50}\right)^2 \cdot (k_{dj} \cdot B_{j1}^2 \cdot m_{j1} + k_{dz} \cdot B_{z1}^2 \cdot m_{z1}) \quad (130)$$

$$\Delta P_{Feh} = 2 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^2 \cdot (1,6 \cdot 1,51^2 \cdot 19,98 + 1,8 \cdot 1,77^2 \cdot 6,88) = 223,37 \text{ W}$$

kde  $\Delta p_{1,0}$  jsou měrné ztráty oceli zvolené z obr. 19,  $m_{j1}$  a  $m_{z1}$  jsou hmotnosti železa jha a zubů statoru. Dále pro stroje do výkonu 250 kW se uvažují činitelé  $k_{dj}=1,6$  a  $k_{dz}=1,8$ . [5]

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

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

Obr. 20 Tabulka měrných ztrát elektrotechnických ocelí

Hmotnost železa jha statoru získáme ze vztahu:[5]

$$m_{j1} = \pi \cdot (D_e - h_{j1}) \cdot h_{j1} \cdot l_{Fe1} \cdot k_{Fe1} \cdot \gamma_{Fe} \quad (131)$$

$$m_{j1} = \pi \cdot (0,31 - 0,027) \cdot 0,027 \cdot 0,11 \cdot 0,97 \cdot 7,8 \cdot 10^3 = 19,98 \text{ kg}$$

kdy uvažujeme  $\gamma_{Fe} = 7,8 \cdot 10^3$

Hmotnost zubu statoru získáme ze vztahu:[5]

$$m_{z1} = h_{d1} \cdot b_{z1} \cdot Q_1 \cdot l_{Fe1} \cdot k_{Fe1} \cdot \gamma_{Fe} = 0,028 \cdot 0,00615 \cdot 48 \cdot 0,11 \cdot 0,97 \cdot 7,8 \cdot 10^3 = 6,88 \text{ kg} \quad (132)$$

### Povrchové ztráty v rotoru[5]

$$\Delta P_{\delta p2} = p_{\delta p2} \cdot (t_{d2} - b_{02}) \cdot Q_2 \cdot l_{Fe2} \quad (133)$$

$$\Delta P_{\delta p2} = 334,92 \cdot (0,0184 - 0,0015) \cdot 34 \cdot 0,11 = 21,17 \text{ W}$$

kdy  $p_{\delta p2}$  je hustota povrchových ztrát v rotoru, kterou určíme ze vztahu:

$$p_{\delta p2} = \beta_{02} \cdot k_{02} \cdot \left( \frac{Q_1 \cdot n}{10000} \right)^{1,5} \cdot (B_{02} \cdot t_{d1} \cdot 10^3)^2 \quad (134)$$

$$p_{\delta p2} = 0,5 \cdot 1,5 \cdot \left( \frac{48 \cdot 1500}{10000} \right)^{1,5} \cdot (0,367 \cdot 0,013 \cdot 10^3)^2 = 334,92 \text{ W}$$

kde činitel  $k_{02}$  respektuje opracování hlav na zuby statoru a u motorů do 160 kW se uvádí hodnoty 1,4 až 1,8. Hodnotu indukce nad hlavami zubu statoru  $B_{02}$  získáme ze vztahu:

$$B_{02} = \beta_{02} \cdot k_c \cdot B_s = 0,375 \cdot 1,21 \cdot 0,8087 = 0,367 \quad (135)$$

Hodnota  $\beta_{02}$  pro zuby rotoru se určí z obr. 20.

$$\beta_{02}=0,375$$

### Pulsní ztráty v zubech rotoru[5]

$$\Delta P_{p2} = 0,11 \cdot \left( \frac{Q_1 \cdot n}{1000} \cdot B_{p2} \right)^2 \cdot m_{z2} = 0,11 \cdot \left( \frac{48 \cdot 1500}{1000} \cdot 0,0579 \right)^2 \cdot 7,72 = 14,76 \text{ W} \quad (136)$$

kde hmotnost zubů rotoru se určuje vztahem:

$$m_{z2} = h_{z2} \cdot b_{z2} \cdot Q_2 \cdot l_{Fe2} \cdot k_{Fe} \cdot \gamma_{Fe} = 0,033745 \cdot 0,008086 \cdot 34 \cdot 0,11 \cdot 0,97 \cdot 7800 = 7,721 \text{ kg} \quad (137)$$

pro pulzní indukci je vztah:

$$B_{p2} = \frac{\gamma_1 \cdot \delta}{2 \cdot t_{d2}} = \frac{4,7 \cdot 0,00045}{2 \cdot 0,0184} = 0,0579 \text{ T} \quad (138)$$

$$\text{a koeficient } \gamma_1 = \frac{\left( \frac{b_{01}}{\delta} \right)^2}{5 + \frac{b_{01}}{\delta}} = \frac{\left( \frac{0,0035}{0,00045} \right)^2}{5 + \frac{0,0035}{0,00045}} = 4,7 \quad (139)$$

### Jouleovy ztráty[5]

$$\text{Pro stator } \Delta P_{j1} = m_1 \cdot R_1 \cdot I_1^2 = 3 \cdot 0,669 \cdot 38,32^2 = 2,95 \text{ kW} \quad (140)$$

$$\text{Pro rotor } \Delta P_{j2} = Q_2 \cdot R_2 \cdot I_t^2 = 34 \cdot 0,000000423 \cdot 664,36^2 = 6,35 \text{ W} \quad (141)$$

### Celkové ztráty[5]

Celkové dodatečné ztráty v železe:

$$\Delta P_{Fed} = \Delta P_{\delta p2} + \Delta P_{p2} = 21,17 + 14,76 = 35,93 \text{ W} \quad (142)$$

Celkové ztráty v železe:

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_{Feh} + \Delta P_{Fed} = 223,37 + 35,93 = 259,3 \text{ W} \quad (143)$$

## Mechanické ztráty[5]

$$\Delta P_{mech} = K_T \left( \frac{n}{10} \right)^2 \cdot D_e^4 = 0,897 \cdot \left( \frac{1500}{10} \right)^2 \cdot 0,31^4 = 186,38 \text{ W} \quad (144)$$

kdy pro motory  $2p \geq 4$  platí:

$$K_T = 1,3 \cdot (1 - D_e) = 1,3 \cdot (1 - 0,31) = 0,897 \quad (145)$$

Dodatečné ztráty při jmenovitém chodu:

$$\Delta P_d = 0,005 \cdot P_{1N} = 0,005 \cdot \frac{P_{2N}}{\eta} = 0,005 \cdot \frac{20000}{0,89} = 112,36 \text{ W} \quad (146)$$

## Proud a účinník naprázdno, nakrátko[5]

Proud naprázdno:

$$I_0 = \sqrt{I_{o\check{c}}^2 + I_{\mu}^2} = \sqrt{0,8^2 + 7,31^2} = 7,35 \text{ A} \quad (147)$$

kdy činná složka  $I_{o\check{c}} = \frac{\Delta P_{Fe} + \Delta P_{mech} + \Delta P_{j10}}{m_1 \cdot U_{1N}} = \frac{259,3 + 186,38 + 107,24}{3 \cdot 230} = 0,8 \text{ A}$  (148)

kde elektrické ztráty ve vinutí při chodu naprázdno:

$$\Delta P_{j10} = 3 \cdot R_1 \cdot I_{\mu}^2 = 3 \cdot 0,669 \cdot 7,31^2 = 107,24 \text{ W} \quad (149)$$

Účinník naprázdno:

$$\cos \varphi_0 = \frac{I_{o\check{c}}}{I_0} = \frac{0,8}{7,35} = 0,109 \quad (150)$$

Proud nakrátko:

$$I_k = \frac{U_{1N}}{Z_k} = \frac{230}{1,34} = 171,51 \text{ A} \quad (151)$$

kdy: Impedance nakrátko:

$$Z_k = \sqrt{R_k^2 + jX_k^2} = \sqrt{0,742^2 + 1,117^2} = 1,34 \Omega \quad (152)$$

Činný odpor nakrátko:

$$R_k = R_1 + R'_2 = 0,669 + 0,073 = 0,742\Omega \quad (153)$$

Jalový odpor nakrátko:

$$jX_k = X_{\delta 1} + X_{\delta 2} = 1,117 + 0,00000978 = 1,117\Omega \quad (154)$$

Účinník nakrátko:

$$\cos \varphi_k = \frac{R_k}{Z_k} = \frac{0,742}{1,34} = 0,55 \quad (155)$$

Účinnost stroje:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Sigma \Delta P} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_{j1} + \Delta P_{j2} + \Delta P_{mech} + \Delta P_{Fe} + P_d} \quad (156)$$

$$\eta = \frac{20000}{20000 + 2950 + 6,35 + 186,38 + 259,3 + 35,93} = 0,85$$

## Kružnicový diagram

Kružnicový diagram je grafické znázornění proudů, napětí, momentu, skluzu, ztrát pro různé režimy zatížení u asynchronního motoru.[8]

Na jeho sestavení jsou potřeba následující parametry:

Proud naprázdno:

$$I_0 = \sqrt{I_{oc}^2 + I_{\mu}^2} = \sqrt{0,8^2 + 7,31^2} = 7,35A \quad (157)$$

$$\varphi_0 = 83,75^\circ$$

Proud nakrátko:

$$I_k = \frac{U_{1N}}{Z_k} = \frac{230}{1,34} = 171,51A \quad (158)$$

$$\varphi_0 = 56,4^\circ$$

Odpory vinutí statoru a klece rotoru:

$$R_1 = \rho_v \cdot \frac{L}{S_v \cdot a} = \rho_v \cdot \frac{L}{S_v \cdot a} = \frac{1,22 \cdot 10^{-6}}{56} \cdot \frac{94,55}{1,539 \cdot 10^{-6} \cdot 2} = 0,669 \Omega \quad (159)$$

$$R'_2 = R_2 \cdot 4 \cdot m_1 \cdot \frac{(N_1 \cdot k_{v1})^2}{Q_2} = 1,699 \cdot 10^{-5} \cdot 4 \cdot 3 \cdot \frac{(120 \cdot 0,92)^2}{34} = 0,073 \Omega \quad (160)$$

## Výpočet momentové charakteristiky

Momentová charakteristika je grafické znázornění závislosti točivého momentu stroje na skluzu, případně otáčkách.

Velikost momentu v závislosti na okamžitém skluzu je dán Klossovým vztahem:[7]

$$M = \frac{2 \cdot M_{\max}}{\frac{s}{s_z} + \frac{s_z}{s}} \quad (161)$$

přičemž:[9]

$$M_{\max} = \frac{3}{\omega_s} \cdot \frac{U_1^2}{2 \cdot (X_{\sigma 1} + X'_{\sigma 2})} = \frac{3}{157,1} \cdot \frac{230^2}{2 \cdot (1,117 + 0,042)} = 453,8 Nm \quad (162)$$

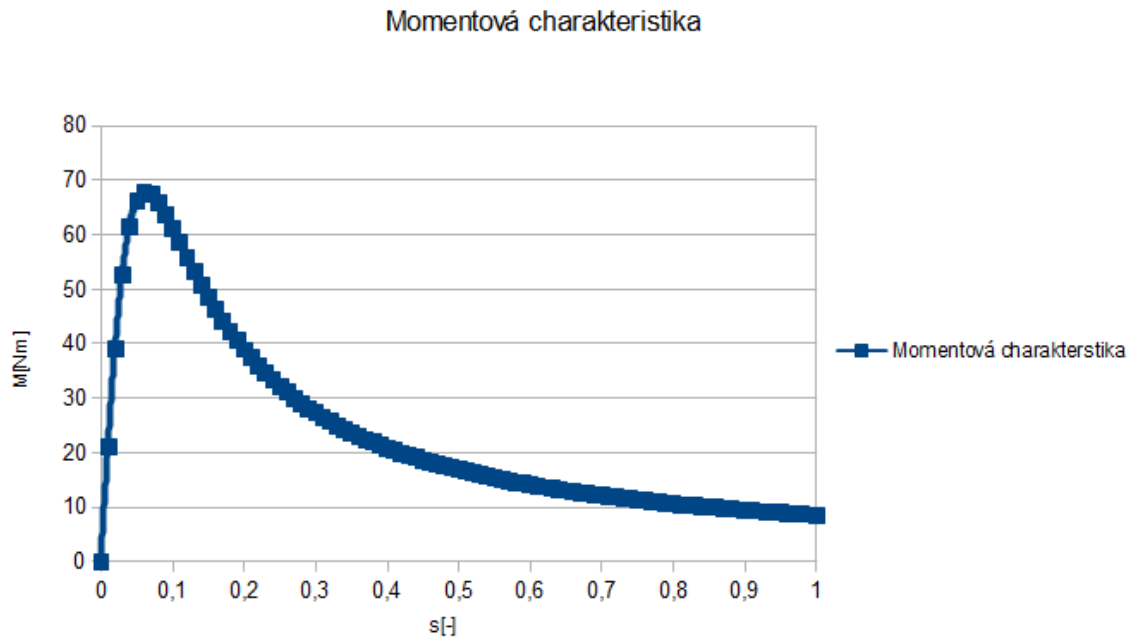
$$s_z = \pm \frac{R'_2}{(X_{1\sigma} + X'_{2\sigma})} = \pm \frac{0,073}{(1,117 + 0,042)} = 0,06299 \quad (163)$$

Vypočtená tabulka:

skluz s	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1
moment M	0	21,00584	39,1257	52,65951	61,38431	66,05222	67,74064	67,44416	65,92665	63,71889	61,16777
skluz s	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,2	0,21
moment M	58,49036	55,81744	53,22439	50,7518	48,41886	46,23182	44,18932	42,28572	40,51311	38,86263	37,32514
skluz s	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,3	0,31	0,32
moment M	35,89172	34,55388	33,30371	32,1339	31,03774	30,00913	29,04253	28,1329	27,27569	26,46675	25,70236
skluz s	0,33	0,34	0,35	0,36	0,37	0,38	0,39	0,4	0,41	0,42	0,43
moment M	24,9791	24,29392	23,64399	23,02679	22,43998	21,88146	21,3493	20,84172	20,35712	19,89401	19,45103
skluz s	0,44	0,45	0,46	0,47	0,48	0,49	0,5	0,51	0,52	0,53	0,54
moment M	19,02692	18,62053	18,2308	17,85675	17,49746	17,1521	16,81988	16,50009	16,19205	15,89513	15,60875
skluz s	0,55	0,56	0,57	0,58	0,59	0,6	0,61	0,62	0,63	0,64	0,65
moment M	15,33237	15,06548	14,80761	14,55831	14,31716	14,08379	13,85782	13,63891	13,42674	13,221	13,02142
skluz s	0,66	0,67	0,68	0,69	0,7	0,71	0,72	0,73	0,74	0,75	0,76
moment M	12,82771	12,63963	12,45694	12,27941	12,10683	11,93899	11,77571	11,6168	11,46209	11,31142	11,16463
skluz s	0,77	0,78	0,79	0,8	0,81	0,82	0,83	0,84	0,85	0,86	0,87
moment M	11,02157	10,88211	10,74612	10,61345	10,48401	10,35766	10,23431	10,11384	9,996165	9,881178	9,768793
skluz s	0,88	0,89	0,9	0,91	0,92	0,93	0,94	0,95	0,96	0,97	0,98
moment M	9,658922	9,551483	9,446395	9,343584	9,242976	9,144502	9,048094	8,953689	8,861225	8,770644	8,681888
skluz s	0,99	1									
moment M	8,594902	8,509636									

Tab.6 Vypočtené hodnoty momentu v závislosti na skluzu

Výsledná charakteristika:



Obr.21 Momentová charakteristika asynchronního motoru

### Tepelný a ventilační výpočet asynchronního motoru

Výpočet oteplení vychází již předem zjištěných hodnot jmenovitých ztrát. Avšak ztráty v izolovaném vinutí rotoru a statoru jsou vyšší než ztráty vypočtené. Vypočtená hodnota Maximální teploty nesmí překročit max. oteplení dle třídy izolace.[5]

Třídu izolace jsem zvolil B, to znamená, že maximální oteplení může dosáhnout nejvýše 120°C. Z toho činitel zvýšení ztrát  $k_p=1,15$ . [5]

Jouleovy ztráty v drážkách:[5]

$$\Delta P'_{jd1} = k_p \cdot \Delta P_{j1} \cdot \frac{2l_1}{l_{av1}} = 1,15 \cdot 2950 \cdot \frac{2 \cdot 0,11}{0,7246} = 1030 \text{ W} \quad (164)$$

Jouleovy ztráty v čelech cívek:[5]

$$\Delta P'_{j\epsilon 1} = k_p \cdot \Delta P_{j1} \cdot \frac{2l_{\epsilon 1}}{l_{av1}} = 1,15 \cdot 2950 \cdot \frac{2 \cdot 0,2523}{0,7246} = 2362,48 \text{ W} \quad (165)$$

Pak oteplení vnitřního povrchu statorového svazku nad teplotu uvnitř stroje zjistíme vzorcem:[5]

$$\Delta \vartheta_{pov1} = K \cdot \frac{\Delta P'_{jd1} + \Delta P_{Feh}}{\pi \cdot D \cdot l_1 \cdot \alpha_1} = 0,8 \cdot \frac{1030 + 223,37}{\pi \cdot 0,2 \cdot 0,11 \cdot 140} = 103,63 \text{ °C} \quad (166)$$



Teplotní spád v izolaci drážkové části statorového vinutí:[5]

$$\Delta \vartheta_{id1} = \frac{\Delta P'_{jd1}}{Q_1 \cdot O_{d1} \cdot l_1} \cdot \left( \frac{b_{i1}}{\lambda_{ekv}} \right) = \frac{1030}{48 \cdot 0,456 \cdot 0,11} \cdot \left( \frac{0,0004}{0,16} \right) = 1,069 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (169)$$

Koeficient  $\lambda_{ekv}$  pro tepelné třídy B,F,H má velikost  $0,16 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ . [5]

Výpočtový obvod pro otevřené statorové drážky:[5]

$$O_{d1} = 2 \cdot (h_d + b_d) = 2 \cdot (0,028 + 0,2) = 0,456 \text{ m} \quad (168)$$

Teplotní spád na tloušťce izolace čel:[5]

$$\Delta \vartheta_{i\check{c}1} = \frac{\Delta P'_{j\check{c}1}}{2 \cdot Q_1 \cdot O_{\check{c}1} \cdot l_{\check{c}1}} \cdot \left( \frac{b_{i\check{c}1}}{\lambda_{ekv}} \right) = \frac{2362,48}{2 \cdot 48 \cdot 0,456 \cdot 0,2523} \cdot \left( \frac{0,0004}{0,16} \right) = 0,5346 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (169)$$

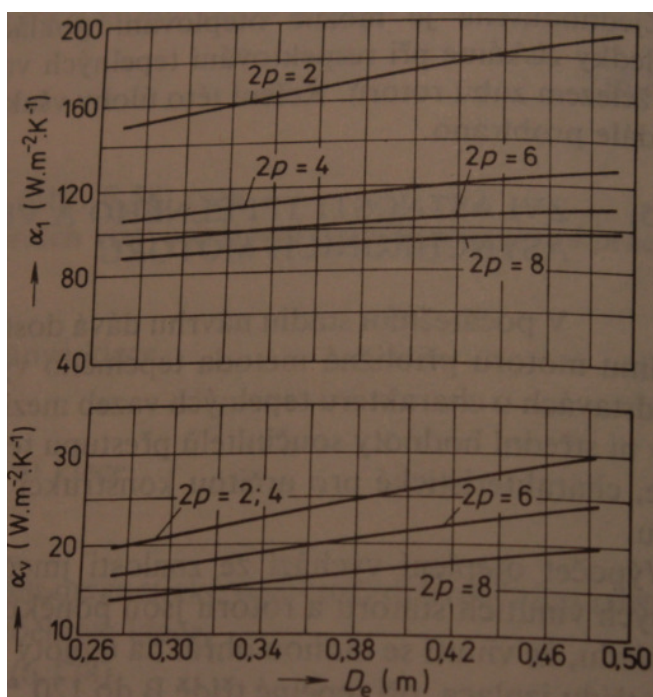
Oteplení vnějšího povrchu izolace čel vinutí nad teplotu vzduchu ve stroji:[5]

$$\Delta \vartheta_{pov\check{c}1} = \frac{K \cdot \Delta P'_{j\check{c}1}}{2 \cdot \pi \cdot D \cdot l_{v1} \cdot \alpha_1} = \frac{0,8 \cdot 2362,48}{2 \cdot \pi \cdot 0,2 \cdot 0,07188 \cdot 1100} = 19,022 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (170)$$

Vyložení čel statorového vinutí získáme vztahem:[5]

$$l_{v1} = K_v \cdot b_c + B = 0,4 \cdot 0,1787 + 0,0004 = 0,07188 \text{ m} \quad (171)$$

Koeficient  $\alpha_1$  odečteme z tabulky 7.[5]



Tabulka 7 Střední hodnoty součinitelů přestupů tepla

Střední oteplení statorového vinutí nad teplotu vzduchu uvnitř stroje dle vztahu:[5]

$$\Delta \vartheta_1 = \frac{(\Delta \vartheta_{pov1} + \Delta \vartheta_{id1}) \cdot 2l_1}{l_{av1}} + \frac{(\Delta \vartheta_{pov\epsilon1} + \Delta \vartheta_{i\epsilon1}) \cdot 2l_{\epsilon1}}{l_{av1}} = \frac{(103,63 + 1,069) \cdot 2 \cdot 0,11}{0,7246} + \frac{(19,022 + 0,5346) \cdot 2 \cdot 0,2523}{0,7246} = 45,41^\circ\text{C} \quad (172)$$

Oteplení vzduchu ve stroji nad teplotu okolí:[5]

$$\Delta \vartheta_v = \frac{\Sigma \Delta P'_v}{S_{i\epsilon\epsilon} \cdot \alpha_v} = \frac{4414,544}{0,25 \cdot 1150} = 15,35^\circ\text{C} \quad (173)$$

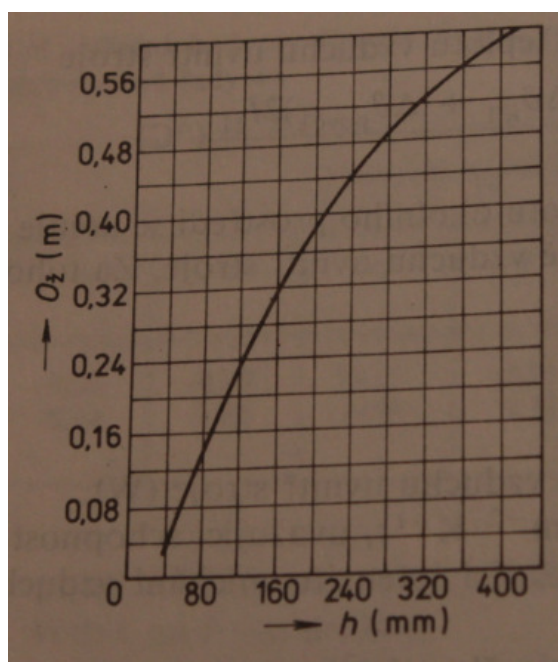
Kdy

$$\Sigma \Delta P'_v = \Sigma \Delta P' - (1 - K) \cdot (\Delta P'_{jd1} + \Delta P'_{Feh}) - 0,9 \cdot \Delta P'_{mech} = 4832,96 - (1 - 0,8) \cdot (1030 + 223,37) - 0,9 \cdot 186,38 = \Sigma \Delta P'_v = 4414,544 \text{ W} \quad (174)$$

Kde

$$\Sigma \Delta P' = \Sigma \Delta P + (k_p - 1) \cdot (\Delta P_{j1} + \Delta P_{j2}) = 3437,96 + (1,15 - 1) \cdot (2950 + 6350) = 4832,96 \text{ W} \quad (175)$$

Koeficient  $\alpha_v$  odečteme z grafu na obrázku v tabulce 7 a střední hodnotu obvodu příčného řezu žebér asynchronních motorů zjistíme z grafu na obrázku 22.



Obr. 22 Střední hodnoty obvodu příčného řezu žeber asynchronních motorů

Při výpočtu plochy žeber kostry uvažujeme vztah:[5]

$$S_{i\bar{e}\bar{e}} = \pi \cdot D_e \cdot (l_1 + 2 \cdot l_{v1}) = \pi \cdot 0,313 \cdot (0,11 + 2 \cdot 0,07188) = 0,25 \text{ m}^2 \quad (176)$$

Střední oteplení satorového vinutí nad teplotu okolí:[5]

$$\Delta\vartheta_1 = \Delta\vartheta_1' + \Delta\vartheta_v = 45,41 + 15,35 = 60,765^\circ\text{C} \quad (177)$$

### Ventilační výpočet

Výpočet potřebného průtoku vzduchu pro ventilaci je dle vztahu:[5]

$$Q_v = \frac{\cdot \Sigma \Delta P_v'}{1100 \cdot 2 \cdot \Delta\vartheta_v} = \frac{4832,96}{1100 \cdot 2 \cdot 15,35} 0,1431 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \quad (178)$$

Dle vztahu lze spočítat průtok vzduchu dodávaný ventilátorem[5]

$$Q_v' = 0,6 \frac{n}{100} D_e^3 = 0,6 \frac{1500}{100} 0,313^3 = 2,817 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \quad (179)$$

### Přehled vypočtených hodnot

Název	Index	Hodnota
počet pólových dvojic	p	2
otáčky	n <sub>1</sub>	1500 min <sup>-1</sup>
výška osy	h	180 mm
vnější průměr statoru	D <sub>e</sub>	0,31 m
vnitřní průměr statoru	D	0,2 m
koeficient K <sub>D</sub>	K <sub>D</sub>	0,64
pólová rozteč	t <sub>p</sub>	0,16 m
vnitřní výkon	P <sub>i</sub>	25,86 kVA
předběžná účinnost	η	0,85
účinník	cosφ	0,85

činitel poměru indukovaného napětí vinutí statoru	$k_E$	0,98
předběžná lineární hustota proudu	$A$	$42500 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$
předběžná indukce ve vzduchové mezeře	$B_\delta$	0,81 T
činitel pólového krytí	$\alpha_\delta$	0,68
činitel tvaru pole	$k_B$	1,11
činitel statorového vinutí	$k_{v1}$	0,92
synchronní úhlová rychlost motoru	$\omega_s$	$157,08 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$
ideální délka stroje	$l_i$	0,11 m
štíhlostní poměr	$\lambda$	0,68
minimální drážková rozteč	$t_{d1\min}$	0,012 m
maximální drážková rozteč	$t_{d2\min}$	0,014 m
počet drážek na statoru	$Q_1$	48
počet drážek na pól a fázi	$q$	4
drážková rozteč	$t_{d1}$	0,0131 m
předběžný počet efektivních vodičů v drážce	$V'_d$	14,54
počet efektivních vodičů v drážce	$V_d$	30
jmenovitý proud vinutí statoru	$I_{1N}$	38,32 A
počet paralelních větví	$a$	2
konečný počet závitů ve fázi	$N_1$	120
konečná lineární hustota proudu	$A$	$43858,17 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$
činitel vinutí	$k_v$	0,97
činitel kroku	$k_r$	0,999987
činitel zkrácení kroku	$k_y$	0,97
magnetický tok	$\Phi$	0,0087 Wb
magnetická indukce ve vzduchové mezeře	$B_\delta$	0,8087 T
předběžná proudová hustota vinutí statoru	$J_1$	$6,726 \cdot 10^6 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$
průřez efektivního vodiče vinutí statoru	$S_{ef1}$	$2,849 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$
oboustranný izolační přírůstek vodiče	$d_i$	0,325 mm
celkový průměr vodiče s izolací	$d_{vi}$	2,325 mm
počet dílčích vodičů	$n_p$	2
konečná proudová hustota vinutí statoru	$J_1$	$12,2 \cdot 10^6 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$
výška $j_{ha}$ statoru	$h_{j1}$	0,027 m
dovolená indukce ve $j_{hu}$ statoru	$B_{j1}$	1,5 T
dovolená indukce v zubu statoru	$B_{z1}$	1,8 T
činitel plnění železa	$k_{Fe}$	0,97

upravený průměr statoru	$D_1$	0,2025 m
výška jha statoru	$h_{j1}$	0,027 m
šířka drážky u paty zubu	$b_1$	0,0071 m
upravená drážková rozteč	$t'_{d1}$	0,01325 m
předběžná šířka zubu	$b_{z1}$	0,00615 m
hloubka drážky	$h_{d1}$	0,028 m
šířka bez uvažování klínové části drážky	$h_2$	0,0255 m
šířka drážky v horní části	$b_2$	0,01 m
otevření drážky	$b_0$	3,7 mm
plocha příčného řezu drážky	$S_d$	219 mm <sup>2</sup>
světelné rozměry drážky na šířku	$b'_1$ $b'_2$ $h'_2$	0,007 m 0,0998 m 0,0253 m
uvažované vůle na složení plechů na šířku	$\Delta b_d$	0,2 mm
uvažované vůle na složení plechů na výšku	$\Delta h_d$	0,2 mm
plocha drážky zbývající pro vinutí	$S'_d$	0,00071 m <sup>2</sup>
plocha zaujímající drážková izolace	$S_i$	0,000029 m <sup>2</sup>
jednostranná tloušťka izolace v drážce	$b_i$	0,0004 m
hodnota vzduchové mezery	$\delta$	0,45 mm
počet drážek rotoru nenatočených	$Q_2$	34
vnější průměr rotoru	$D_2$	0,1991 m
délka rotoru	$l_2$	0,11 m
drážková rozteč rotoru	$t_{d2}$	0,0184 m
vnitřní průměr rotoru	$D_i$	0,0713 m
činitel pro výpočet průměru hřídele	$k_h$	0,23
proud v tyči rotoru	$I_t$	664,36 A
činitel	$k_i$	0,89
činitel přepočtů proudů	$p_i$	19,48
průřez tyče	$S_t$	$2,21 \cdot 10^{-4}$ m <sup>2</sup>
dovolená šířka zubu rotoru	$b_{z2dov}$	0,008086 m
dovolená magnetická indukce v zubech rotoru	$B_{z2dov}$	1,9 T
průměr zaoblení horní části	$b_1$	0,00927 m
průměr zaoblení dolní části	$b_2$	0,00442 m
vzdálenost středů zaoblení	$h_1$	0,0262 m
konečná šířka zubu rotoru v průřezu	$b'_z$ $b''_z$	0,0174 m 0,0073 m
hloubka drážky rotoru	$h_{d2}$	0,033745 m

proud kruhem nakrátko	$I_{kn}$	1797,5 A
$\Delta$	$\Delta$	0,37
proudová hustota v kruhu nakrátko	$J_{kn}$	240 000 A·m <sup>-2</sup>
průřez kruhu nakrátko	$S_{kn}$	0,000749 m <sup>2</sup>
střední výška kruhu nakrátko	$a_{kn}$	0,04 m
střední šířka kruhu nakrátko	$b_{kn}$	0,0178 m
střední průměr kruhu nakrátko	$D_{kn}$	0,1571 m
indukce zubu statoru	$B_{z1}$	1,77 T
indukce zubu rotoru	$B_{z2}$	1,9 T
indukce jha statoru	$B_{j1}$	1,51 T
výpočtová výška jha statoru	$h'_{j1}$	0,027 m
indukce jha rotoru	$B_{j2}$	0,99 T
výpočtová výška jha rotoru	$h'_{j2}$	0,0411 m
Carterův činitel	$k_c$	1,21
	$\gamma$	5,11
magnetické napětí vzduchové mezery	$U_\delta$	701,26 A
permeabilita vzduchu	$\mu_0$	$4\pi \cdot 10^{-7}$
magnetické napětí zubu statoru	$U_{z1}$	78,4 A
výpočtová výška zubu statoru	$h'_{z1}$	0,028 m
intenzita magnetického pole na zubu statoru	$H_{z1}$	1400 A·m <sup>-1</sup>
magnetické napětí zubu rotoru	$U_{z2}$	139,7 A
výpočtová výška zubu rotoru	$h'_{z2}$	0,033745 m
intenzita magnetického pole rotoru	$H_{z2}$	2070 A·m <sup>-1</sup>
činitel sycení zubů	$k_z$	1,3
magnetické napětí jha statoru	$U_{j1}$	160,28 A
délka střední magnetické indukční čáry ve statoru	$l_{j1}$	0,222 m
intenzita magnetického pole ve jhu statoru	$H_{j1}$	722 A·m <sup>-1</sup>
magnetické napětí jha rotoru	$U_{j2}$	10,33 A
délka střední magnetické indukční čáry v rotoru	$l_{j2}$	0,0323 m
intenzita magnetického pole ve jhu rotoru	$H_{j2}$	320 A·m <sup>-1</sup>
výsledné magnetické napětí na jednu pól. dvojici	$F_m$	1089,96 A
činitel nasycení magnetického obvodu	$k_\mu$	1,55
magnetizační proud	$I_\mu$	7,31 A
poměrná jednotka magnetizačního proudu	$i_\mu$	0,2
střední šířka cívky	$b_c$	0,1787 m
délka čela	$l_c$	0,2523 m

činitel	$K_{\xi}$	1,3
střední délka závitů	$l_{av}$	0,724 m
délka drážkové části	$l_d$	0,11 m
celková délka vodičů jedné fáze	$L_1$	86,95 $\Omega$
výsledný odpor jedné fáze vinutí statoru	$R_1$	0,67 $\Omega$
rezistivita materiálu vinutí při uvažované teplotě	$\rho_{\theta}$	$\frac{1,22 \cdot 10^{-6}}{56} \Omega \cdot m$
odpor tyče	$R_t$	$1,08 \cdot 10^{-5} \Omega$
odpor kruhu nakrátko	$R_{kn}$	$4,23 \cdot 10^{-7} \Omega$
odpor jedné fáze vinutí rotoru	$R_2$	$1,699 \cdot 10^{-5} \Omega$
odpor fáze rotoru přepočítaný na počet závitů statoru	$R'_2$	0,073 $\Omega$
poměrná hodnota odporu fáze rotoru	$r'_2$	0,11
poměrná hodnota odporu fáze rotoru	$r_1$	0,01
činitel magnetické vodivosti drážky statoru	$\lambda_{d1}$	2,25
činitel	$k_{\beta}$	0,81
činitel	$k'_{\beta}$	0,75
výška klínu	$u$	0 m
činitel magnetické vodivosti čel statoru	$\lambda_{\xi 1}$	2,28
činitel magnetické vodivosti rozptylu vinutí statoru	$\lambda_{dif1}$	2,61
činitel (stator)	$\xi$	0,13
rozptylová reaktance fáze statorového vinutí	$X_{1\sigma}$	1,12 $\Omega$
poměrná hodnota rozptylové reaktance statoru	$x_{1\sigma}$	0,19
činitel magnetické vodivosti drážkového rozptylu rotoru	$\lambda_{d2}$	1,4
činitel	$k_d$	1
činitel magnetické vodivosti čel rotoru	$\lambda_{\xi 2}$	0,71
činitel magnetické vodivosti diferenčního rozptylu rotoru	$\lambda_{dif2}$	0,14
činitel (rotor)	$\xi$	0,51
rozptylová reaktance jedné fáze rotorového vinutí	$X_{2\sigma}$	$9,78 \cdot 10^{-6} \Omega$
rozptylová reaktance fáze rotorového vinutí přepočítaná na stator	$X'_{2\sigma}$	0,042 $\Omega$
poměrná hodnota rozptylové reaktance rotorového vinutí	$x'_{2\sigma}$	0,01
hlavní ztráty v železe vlivem hystereze	$\Delta P_{Feh}$	223,37 W
počet cívek	$K$	48

počet drážek na pól	$Q_p$	12
krok na komutátoru	$y_k$	13
měrné ztráty použité oceli	$\Delta p_{1,0,50}$	$2 \text{ W} \cdot \text{m}^2$
činitelé uvažující vliv nerovnoměrnosti rozložení toku	$k_{dj}$	1,6
	$k_{dz}$	1,8
hmotnost železa jha statoru	$m_{j1}$	19,98 kg
hustota oceli	$\gamma_{Fe}$	7800
hmotnost železa zubů statoru	$m_{z1}$	6,88 kg
povrchové ztráty v rotoru	$\Delta P_{\delta p2}$	334,92 W
hustota povrchových ztrát v rotoru	$p_{\delta p2}$	21,17 W
činitel respektující vliv opracování povrchu hlav zubů statoru	$k_{02}$	1,5
Jouleovo ztráty ve statoru	$\Delta P_{j1}$	2,95 kW
Jouleovo ztráty v rotoru	$\Delta P_{j2}$	6,35 W
indukce nad hlavami zubů ve statoru	$B_{02}$	0,37 T
pulsní ztráty v zubech rotoru	$\Delta P_{p2}$	14,76 W
hmotnost železa zubů rotoru	$m_{z2}$	7,721 kg
součet dodatečných ztrát v železe	$\Delta P_{Fed}$	35,93 W
celkové ztráty v železe	$\Delta P_{Fe}$	259,3 W
mechanické ztráty	$\Delta P_{mech}$	186,38 W
činitel pro motory $2p \geq 4$	$K_T$	0,95
dodatečné ztráty při jmenovitém chodu	$\Delta P_d$	112,36 W
proud naprázdno	$I_0$	7,35 A
činná složka proudu naprázdno	$I_{0\check{c}}$	0,8 A
elektrické ztráty ve statorovém vinutí při chodu naprázdno	$\Delta P_{j1,0}$	107,24 W
účinník naprázdno	$\cos\varphi_0$	0,11
proud nakrátko	$I_K$	171,51 A
impedance při stavu nakrátko	$Z_K$	1,34 $\Omega$
jalová složka impedance nakrátko	$jX_K$	1,12 $\Omega$
účinník nakrátko	$\cos\varphi_K$	0,55
odpor nakrátko	$R_K$	0,74
účinnost stroje	$\eta$	85,00%
maximální moment na hřídeli	$M_{max}$	453,8 Nm
skluz zvratu	$s_z$	0,06
Jouleovy ztráty v drážkách	$\Delta P'_{jd1}$	1030 W
Jouleovy ztráty v čelech cívek	$\Delta P'_{j\check{c}1}$	2362,48 W



oteplení vnitřního povrchu statorového svazku nad teplotu uvnitř stroje	$\Delta\vartheta_{\text{pov1}}$	103,63 °C
teplotní spád v izolaci drážkové části statorového vinutí	$\Delta\vartheta_{\text{id1}}$	1,069 °C
koeficient pro tepelné třídy B,F,H	$\lambda_{\text{ekv}}$	0,16 W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>
výpočtový obvod pro otevřené statorové drážky	$O_{\text{d1}}$	0,456 m
teplotní spád na tloušťce izolace čel	$\Delta\vartheta_{\text{ič1}}$	0,5346 °C
oteplení vnějšího povrchu izolace čel vinutí nad teplotu vzduchu ve stroji	$\Delta\vartheta_{\text{povč1}}$	19,022 °C
vyložení čel statorového vinutí	$l_{\text{v11}}$	0,07188 m
střední oteplení statorového vinutí nad teplotu vzduchu uvnitř stroje	$\Delta\vartheta'_1$	45,41 °C
oteplení vzduchu ve stroji nad teplotu okolí	$\Delta\vartheta_v$	15,35 °C
součet ztrát odváděných do vzduchu uvnitř stroje	$\Sigma\Delta P'_v$	4414,544 W
součet ztrát	$\Sigma\Delta P'$	4832,96 W
plocha žebek kostry	$S_{\text{ič1}}$	0,25 m <sup>2</sup>
střední oteplení statorového vinutí nad teplotu okolí	$\Delta\vartheta_1$	60,765 °C
potřebný průtok vzduchu pro ventilaci	$Q_v$	0,14 m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup>
průtok vzduchu dodávaný ventilátorem	$Q'v$	2,817 m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup>

## Závěr

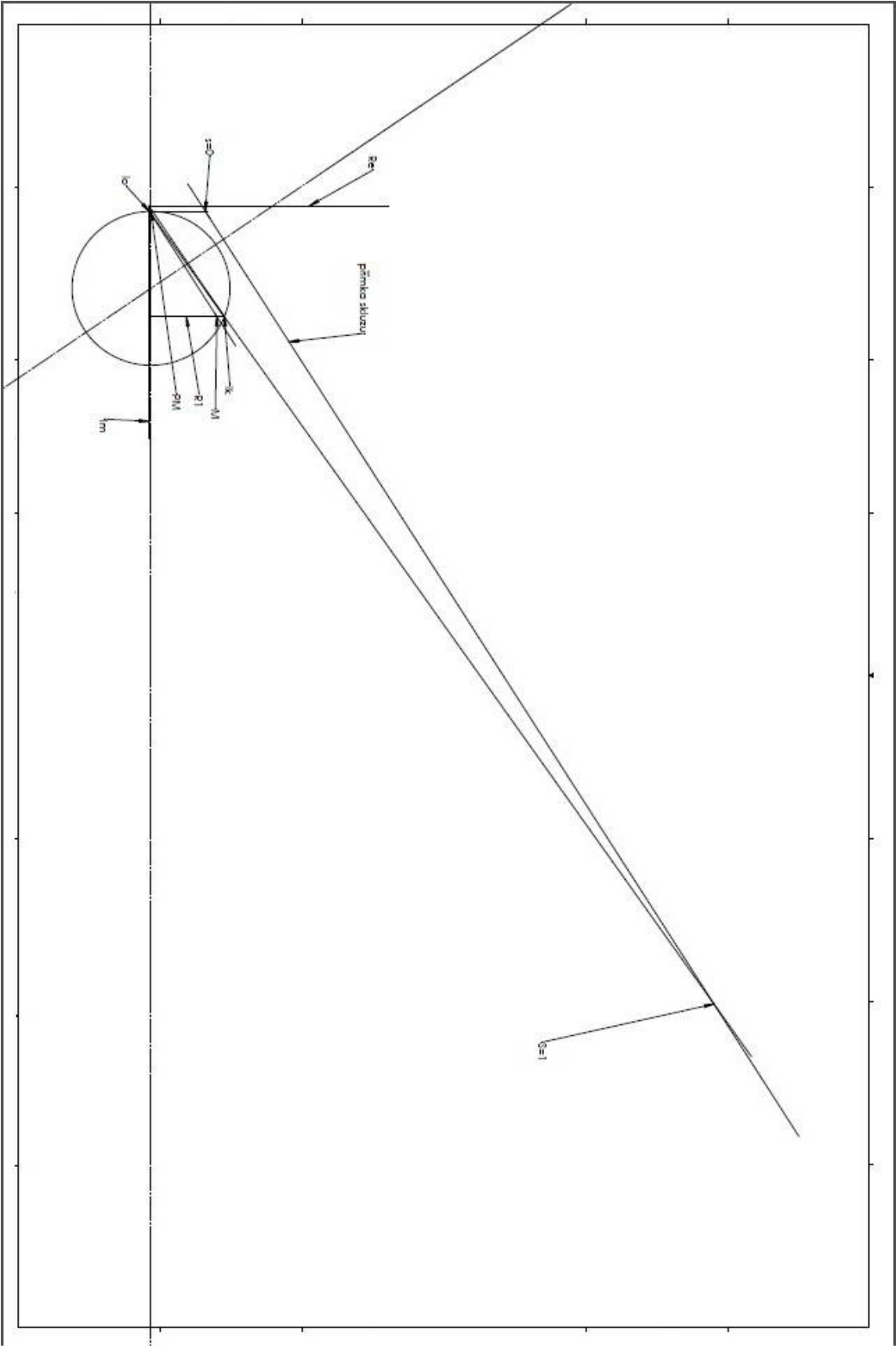
Téma této bakalářské práce byl návrh asynchronního motoru o výkonu 20 kW. V rámci elektromagnetického návrhu jsem se snažil přiblížit každou položku, se kterou jsem pracoval a počítal. Samotný elektromagnetický návrh je dlouhý a poměrně komplikovaný proces, při kterém se vypočtené hodnoty postupně ověřují, jiné hodnoty jsem odečítal z tabulek a obrázků, které jsou ukázány u částí výpočtů, kde byly potřeba a využívány. Můj návrh ještě zdaleka není úplný. Motor je potřeba otestovat a zjistit reálné chování motoru za chodu atd.

Jako představa o chodu stroje může sloužit kružnicový diagram, který byl taktéž součástí zadání práce a je přiložen v příloze.

## Zdroje

- [1] Nikola Tesla [online]. 2012, 12.5. [cit. 2012-05-19]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Nikola\\_Tesla](http://cs.wikipedia.org/wiki/Nikola_Tesla)
- [2] ASYNCHRONNÍ (INDUKČNÍ) STROJE (MOTORY) [online]. 2012, 12.5. [cit. 2012-05-19]. Dostupné z: [www.pslib.cz/pe/skola/.../motory/...motor/asynchr\\_motor\\_teorie.pdf](http://www.pslib.cz/pe/skola/.../motory/...motor/asynchr_motor_teorie.pdf)
- [3] BARTOŠ, Václav. ZČU. Elektrické stroje. ZČU Fakulta elektrotechnická: ZČU, 1995. ISBN S61595 . 2012, 12.5. [cit. 2012-05-19]
- [4] Asynchronní stroje [online]. [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: [www.pslib.cz/pe/skola/.../motory/...motor/asynchr\\_motor\\_teorie.pdf](http://www.pslib.cz/pe/skola/.../motory/...motor/asynchr_motor_teorie.pdf)
- [5] KOPYLOVA KOL., I.P. Stavba elektrických strojů. Moskva: Mir, 1988. ISBN D403.
- [6] Asynchronní stroje [online]. 2009 [cit. 2012-06-04]. Dostupné z: [www.spse.dobruska.cz/download/AM.pdf](http://www.spse.dobruska.cz/download/AM.pdf)
- [7] Asynchronní motor [online]. 13.5.2012 [cit. 2012-06-06]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Asynchronn%C3%AD\\_motor](http://cs.wikipedia.org/wiki/Asynchronn%C3%AD_motor)
- [8] Kružnicový diagram [online]. 2010, 2011 [cit. 2012-06-08]. Dostupné z: <http://leccos.com/index.php/clanky/kruznicovy-diagram>
- [9] Střídavé motory: Výkon a točivý moment [online]. [cit. 2012-08-07]. Dostupné z: [http://www.mti.tul.cz/files/evc/EI\\_Str2\\_h.pdf](http://www.mti.tul.cz/files/evc/EI_Str2_h.pdf)

**Příloha:**



Obr. 23 Kružnicový diagram motoru navrhovaného v této práci

Vysvětlivky:

- Re..... reálná osa  $R_e$
- Im..... imaginární osa  $I_m$
- PM..... přímka momentu
- $I_0$ ..... proud naprázdno  $I_0$
- $I_k$ ..... proud nakrátko  $I_k$
- M..... bod rozdělující usečku ve velikosti poměru odporů  $R_1$  a  $R'_2$
- $s=0$ .... skluz je v tomto bodě rovný nule
- $s=1$ ....skluz je v tomto bodě rovný jedné

Měřítko výkresu je 1:2.