

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE
Návrh asynchronního motoru s kotvou nakrátko

Marek Tobrman

2015

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Marek TOBRMAN**
Osobní číslo: **E13N0032K**
Studijní program: **N2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Návrh asynchronního motoru s kotvou nakrátko**
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

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

1. Proveďte elektromagnetický návrh asynchronního stroje s parametry: $P = 120\text{kW}$; $2p = 4$; $U = 400\text{ V}$; $m = 3$, tvar IM 1001, provedení IP 44.
2. Sestrojte kružnicový diagram a momentovou charakteristiku a uveďte všechny parametry, které lze získat z kružnicového diagramu.
3. Proveďte orientační výpočet otepleniaktivních částí statoru.
4. Nakreslete schematicky podélný a příčný řez stroje.

Abstrakt

Tato diplomová práce řeší v první části elektromagnetický návrh asynchronního motoru s kotvou nakrátko s danými parametry: P 120kW, $2p=4$, U 400V, tvar IM 1001 a provedení IP 44. V druhé části se věnuje kružnicovému diagramu a momentové charakteristice. Třetí část představuje orientační výpočet oteplení aktivních částí statoru. Ve čtvrté části práce je schématický podélný a příčný řez strojem.

Klíčová slova

Návrh, asynchronní motor, kružnicový diagram.

Abstract

The first part of the M.A. thesis deals with an electromagnetic draft of an asynchronous motor with a short anchor within given parameters: power 120 kW, $2p = 4$, voltage 400 V, type of construction IM 1001 and protection type IP 44. The second part of the thesis concerns a circle diagram and moments characterization. The third part presents an indicative computation of the heating of active parts of a stator. The fourth part of the thesis contains a schematic longitudinal and crosswise section representation of the engine.

Key words

Project, induction motor, circular diagram.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce. Dále prohlašuji, že veškerý software použitý při řešení této diplomové práce je legální.

V Chlumčanech dne 10. května 2015

.....

Marek Tobrman

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce

doc. Ing. Josefu Červenému, CSc., za cenné profesionální rady a připomínky.

Obsah

Úvod	9
1 Parametry navrhovaného motoru	10
1.1 Volba hlavních rozměrů motoru	10
1.2 Návrh statorového vinutí.....	14
1.3 Návrh statorových drážek	17
1.4 Návrh rotoru.....	19
1.5 Výpočet magnetického obvodu.....	23
1.6 Výpočet odporů a reaktancí motoru.....	28
1.6.1 Odpor vinutí statoru	28
1.6.2 Rozptylová reaktance vinutí statoru.....	29
1.6.3 Odpor vinutí rotoru	31
1.6.4 Rozptylová reaktance vinutí rotoru.....	32
1.7 Výpočet ztrát	34
2 Kružnicový diagram a momentová charakteristika	39
3 Tepelný výpočet.....	46
4 Schématický řez strojem	50
Závěr	51
Seznam literatury a informačních zdrojů	52

Seznam symbolů a zkratk

A....lineární hustota proudu	[A·m ⁻¹]	a....počet paralelních větví	[-]
B....magnetická indukce	[T]	b....šířkový rozměr	[m]
D....průměr	[m]	I....proud	[A]
J.... hustota proudu	[A·m ⁻²]	K....činitel	[-]
L....délka indukční čáry	[m]	l _iideální délka stroje	[m]
M....moment	[N·m]	m....počet fází stroje	[-]
m....hmotnost	[kg]	N....počet závitů ve fázi	[-]
n....otáčky	[ot·min ⁻¹]	P....činný výkon	[W]
ΔP....ztráty	[W]	Q....počet drážek	[-]
R....odpor	[Ω]	S....plocha	[m ²]
t _ddrážková rozteč	[m]	t _ppolová rozteč	[m]
U....napětí	[V]	V _dpočet vodičů v drážce	[-]
v....rychlost	[m·s ⁻¹]	X....reaktance	[Ω]
Z....impedance	[Ω]	α....činitel	[-]
δ....vzduchová mezera	[m]	η....účinnost	[-,%]
λ.... štíhlostní poměr	[-]	μ....permeabilita	[-]
ξ....činitel	[-]	r....rezistivita	[Ω·m]
σ....činitel rozptylu	[-]	Φ....magnetický tok	[Wb]
ω....úhlová rychlost	[rad·s ⁻¹]		

Úvod

Tato diplomová práce se věnuje návrhu asynchronního motoru s kotvou nakrátko. Předmětem návrhu je výpočet elektromagnetických parametrů asynchronního motoru s kotvou nakrátko o výkonu 120 kW, počtu pólů 4, jmenovitém napětí 400 V, tvaru IM 1001 a krytím v provedení IP 44.

Text je rozdělen do čtyř částí. První se věnuje elektromagnetickému návrhu stroje, který zahrnuje výpočet hlavních rozměrů, výpočty rotoru, statoru, odporů, reaktancí i magnetizačního proudu. Druhá se věnuje sestavení kružnicového diagramu a momentové charakteristiky včetně všech. Třetí popisuje orientační výpočty oteplení aktivních částí statoru. Ve čtvrté části je schematicky znázorněn podélný a příčný řez motorem.

Indukční motor je točivý elektrický stroj, u kterého je magnetický obvod rozdělen malou vzduchovou mezerou na rotor a stator. Asynchronní motory jsou nejspolehlivější, nejjednodušší a proto i nejlevnější elektrické točivé stroje. Hlavními částmi motoru jsou rotor, stator a ložiskové štíty. Stator je tvořen z elektrotechnických izolovaných plechů o síle 0,3-0,5mm. Tyto plechy mají na vnitřním průměru drážkování, kde je izolovaně uloženo trojfázové statorové vinutí. Také rotorový svazek je složen z elektrotechnických plechů, které jsou u menších strojů nalisovány přímo na hřídel, u strojů větších výkonů se lisuje na lité nebo svařené hvězdice, které se naklínují na hřídel. Motor s kotvou nakrátko má rotorové drážky vyplněny tyčemi, které jsou na konci spojeny kruhy nakrátko a dohromady vytvoří klec nakrátko. Rotor motoru nikdy nedosáhne synchronních otáček, protože by se při nich ve vinutí rotoru neindukovalo napětí, rotorem by neprotékal proud a nevznikla by tažná síla. [2]

1 Parametry navrhovaného motoru

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

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

$$2p = 4$$

$$m = 3$$

tvar IM 1001

krytí IP 44

1.1 Volba hlavních rozměrů motoru

Návrh asynchronního motoru začíná určením hlavních rozměrů stroje. Hlavními rozměry jsou vnitřní průměr, ideální délka vzduchové mezery, zároveň jsou tyto hodnoty vázány na výkon stroje, úhlovou rychlost a elektromagnetické zatížení strojovou konstantou.

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

D..... vnitřní průměr statoru (m)

l_i výpočtová délka vzduchové mezery (m)

ω_s úhlová rychlost (rad/s)

P_i vnitřní výkon stroje

α_δ, k_B, k_v činitele

A..... lineární hustota proudu (A/m)

B_δ indukce ve vzduchové mezeře

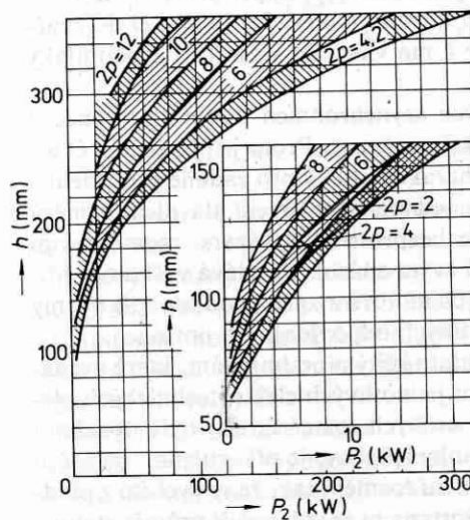
Všechny tyto veličiny jsou v této fázi návrhu neznámé kromě synchronní úhlové rychlosti a odvozuje se z doporučených hodnot.

- 1) Synchronní úhlová rychlost

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{2} = 1500 \text{ ot/min}$$

Předběžná výška osy motoru (zvolena dle tabulky 6.6) [1]

$$h = 280 \text{ mm}$$



Obrázek 1: Výška osy asynchronního motoru v závislosti na výkonu [1]

Vnější průměr statorových plechů

$$D_e = 0,530 \text{ m}$$

- 2) Vnitřní průměr statoru

$$D = K_D \cdot D_e = 0,65 \cdot 0,53 = 0,3445 \text{ m}$$

$$K_D = 0,65$$

Koeficient K_D představuje poměr vnitřních a vnějších poměrů statoru asynchronního motoru pro různé počty pólů a je zvolen dle tab. 6.7 [1]

3) Pólová rozteč

$$t_p = \frac{\pi \cdot D}{2p} = \frac{\pi \cdot 0,3445}{4} = 0,271 \text{ m}$$

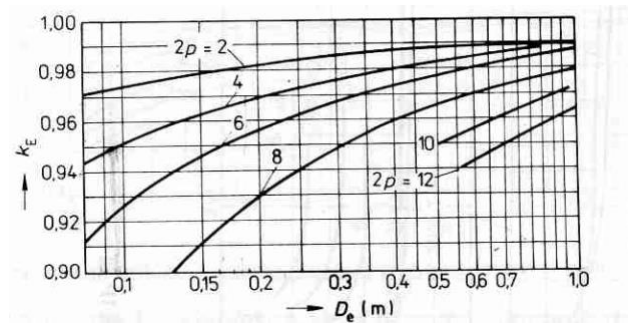
4) Výpočet vnitřního výkonu

$$P_i = P_2 \frac{k_E}{\eta \cdot \cos \varphi} = 120000 \cdot \frac{0,983}{0,93 \cdot 0,91} = 139383,2 \text{ VA}$$

$K_E = 0,983$ poměr indukovaného napětí statoru ku napětí jmenovitému

$\eta = 0,93$ předpokládaná účinnost

$\cos \varphi = 0,91$ předpokládaný účiník



Obrázek 2: Hodnoty K_E [1]

5) Úhlová rychlost

$$\omega_s = \frac{2\pi \cdot n_s}{60} = \frac{2\pi \cdot 1500}{60} = 157,08 \text{ rad/s}$$

6) Ideální délka vzduchové mezery

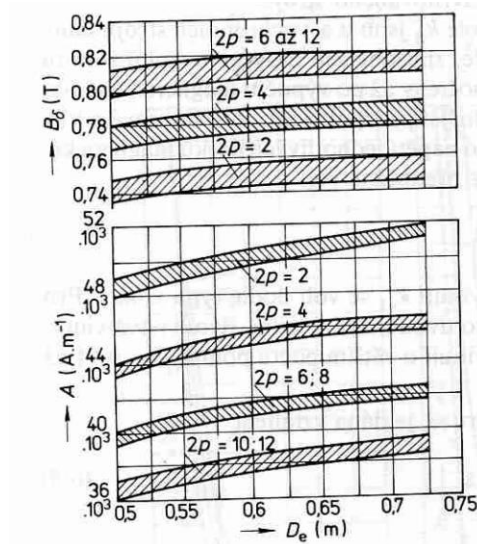
$$l_i = \frac{P_i}{k_B D^2 k_{v1} A B \delta} = \frac{139383,2}{1,11 \cdot 0,3445^2 \cdot 157,08 \cdot 0,91 \cdot 44500 \cdot 0,78} = 0,213 \text{ m}$$

$A = 44500 \text{ A/m}$ lineární hustota proudu

$B_\delta = 0,78 \text{ T}$ indukce ve vzduchové mezeře

Předběžný činitel vinutí K_{v1} volím hodnotu 0,91

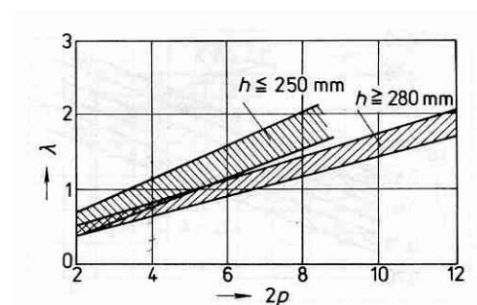
Činitel tvaru pole $k_B = \frac{\pi}{2 \cdot \sqrt{2}} = 1,11$



Obrázek 3: Lineární hustota proudu a indukce ve vzduchové mezeře[1]

7) Štíhlostní poměr

$$\lambda = \frac{l_i}{t_p} = \frac{0,213}{0,271} = 0,79$$



Obrázek 4: štíhlostní poměr motorů s IP 44 [1]

Štíhlostní poměr vyhovuje, a proto volím následující hodnoty

$D_e = 0,53 \text{ m}$

$D = 0,3445 \text{ m}$

$l_i = 0,213 \text{ m}$

1.2 Návrh statorového vinutí

Dále se určí počet drážek statoru (Q_1), počet závitů v sérii jedné fáze vinutí (N_1). Počet závitů je takový, aby lineární hustota proudu a indukce vzduchové mezery odpovídaly hodnotám získaným při výpočtu hlavních rozměrů a počet drážek zajišťoval rovnoměrné pokrytí vinutím.

8) Počet statorových drážek.

Počet drážek se volí ze získaného rozmezí vzhledem k symetrii vinutí a požadovanému počtu drážek na pól a fázi. Počet drážek statoru musí být dělitelný počtem fází a $q=Q_1/2pm$ musí být celé číslo

$$Q_{1min} = \frac{\pi \cdot D}{t_{d1max}} = \frac{\pi \cdot 0,3445}{0,022} = 48,19$$

$$Q_{1max} = \frac{\pi \cdot D}{t_{d1min}} = \frac{\pi \cdot 0,3445}{0,017} = 63,66$$

Volím $Q_1 = 48$

Počet drážek byl zvolen s ohledem na požadovaný počet drážek na pól a fázi.

9) Počet drážek na pól a fázi

$$q = \frac{Q_1}{2pm} = \frac{48}{2 \cdot 2 \cdot 3} = 5$$

10) Drážková rozteč statoru

$$t_{d1} = \frac{\pi \cdot D}{Q_1} = \frac{\pi \cdot 0,3445}{48} = 22,55 \text{ mm}$$

Počet efektivních vodičů v drážce

11) Napřed určím předběžný počet efektivních vodičů v drážce V'_d

$$V'_d = \frac{\pi \cdot D \cdot A}{I_{1N} \cdot Q_1} = \frac{\pi \cdot 0,3445 \cdot 44500}{205,498 \cdot 48} = 4,88$$

12) Jmenovitý proud vinutí statoru

$$I_N = \frac{P_2}{m \cdot U_N \cdot \eta \cdot \cos\varphi} = \frac{120000}{3 \cdot 230 \cdot 0,93 \cdot 0,91} = 205,498 \text{ A}$$

Počet efektivních vodičů v drážce V_d musí být celé číslo, které je dělitelné číslem 2.

$$V_d = a \cdot V'_d = 2 \cdot 4,88 = 9,76$$

Volím $V_d = 10$ a počet paralelních větví 2

13) Počet závitů v sérii jedné fáze

$$N_1 = \frac{V_d \cdot Q_1}{2 \cdot a \cdot m} = \frac{10 \cdot 48}{2 \cdot 2 \cdot 3} = 40$$

14) Konečná lineární hustota proudu

$$A = \frac{2 \cdot m \cdot N_1 \cdot I_N}{\pi \cdot D} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 40 \cdot 205}{\pi \cdot 0,3445} = 45459 \text{ A/m}$$

15) Činitel statorového vinutí

$$k_{v1} = k_{r1} \cdot k_{y1} = 0,957 \cdot 0,966 = 0,924$$

Činitel rozlohy pro 1. harmonickou pro $q=5$ je dle tabulky 3.13 [1] $k_{r1}=0,957$

$$\text{Činitel zkrácení kroku } k_{y1} = \sin \frac{\pi}{2} \cdot \beta = 0,966$$

$$\beta = 0,833 \quad \beta = \frac{y_{1d}}{Q_p} = \frac{10}{12} = 0,833 \quad y_{1d}=10$$

16) Počet drážek na jednu pólovou rozteč

$$Q_p = \frac{Q}{2p} = \frac{48}{4} = 12$$

17) Magnetický tok

$$\phi = \frac{k_e \cdot U_{1N}}{4 \cdot k_B \cdot N_1 \cdot k_{v1} \cdot f_1} = \frac{0,983 \cdot 230}{4 \cdot 1,11 \cdot 40 \cdot 0,924 \cdot 50} = 0,0277 \text{ Wb}$$

18) Skutečná indukce ve vzduchové mezeře

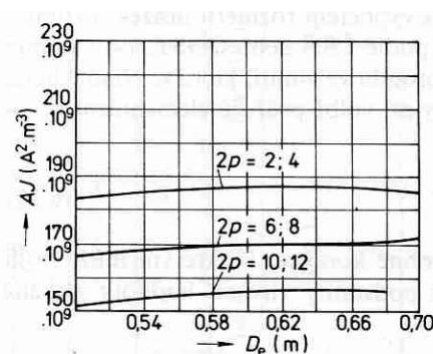
$$B_\delta = \frac{p \cdot \phi}{D \cdot l_i} = \frac{2 \cdot 0,0277}{0,3445 \cdot 0,213} = 0,76 \text{ T}$$

19) Předběžný průřez efektivního vodiče

$$S_{ef1} = \frac{I_{1N}}{a \cdot J_1} = \frac{205,498}{2 \cdot 4,06 \cdot 10^6} = 25,3 \text{ mm}^2$$

Hustota proudu ve statorovém vinutí

$$J_1 = \frac{(A J_1)}{A} = \frac{185 \cdot 10^9}{45570,07} = 4,06 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$$



Obrázek 5: Střední hodnota součinu AJ asynchronních motorů IP44 [1]

- 20) Vinutí je provedeno z dělených cívek a je navinuto z pásů, každý pás je rozdělen na dva paralelní $n_p=2$.

$$S_v = \frac{S_{ef1}}{n_p} = \frac{25,3}{2} = 12,65 \text{ mm}^2$$

1.3 Návrh satorových drážek

- 21) Minimální šířka zubu statoru

$$b_{z1min} = \frac{B_\delta \cdot t_{d1} \cdot l_i}{B_{z1max} \cdot l_{Fe1} \cdot k_{Fe}} = \frac{0,76 \cdot 0,0225 \cdot 0,213}{2 \cdot 0,213 \cdot 0,95} = 9 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$k_{Fe} = 0,95$ způsob izolace – lakování

$B_{z1max} = 1,8 \text{ -} 2 \text{ T}$ drážka typu F

- 22) Předběžná šířka drážky

$$b_d = t_{d1} - b_{z1} = 22,5 - 9 = 13,5 \text{ mm}$$

- 23) Předběžná šířka dílčího vodiče

$$b'v = 0,5 \cdot (13,5 - 2b_i - \Delta b_d) = 0,5 \cdot (13,5 - 2,2 - 0,3) = 5,5 \text{ mm}$$

$b_i = 1,1 \text{ mm}$ síla izolace

$\Delta b_d = 0,3 \text{ mm}$ přídavek na proložení plechů

Volím vodič o rozměrech 5 x 2,8 mm o čistém průřezu $S_v = 13,45 \text{ mm}^2$

Podle tabulky izolačních přírůstků je vnější rozměr vodiče včetně izolace skelnou přízí s podlepením tereftalátovým lakem 5,32 x 3,12 mm

24) Průřez efektivního vodiče

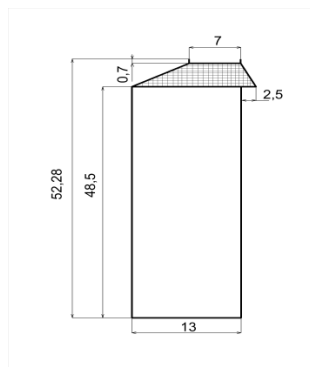
$$S_{ef1} = S_v \cdot n_p = 13,45 \cdot 2 = 26,9 \text{ mm}^2$$

25) Skutečná hustota proudu ve vinutí

$$J_1 = \frac{I_{1N}}{a \cdot S_v \cdot n_p} = \frac{205,498}{2 \cdot 13,45 \cdot 2} = 3,82 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$$

Rozměr statorové drážky

	Šířka drážky	Hloubka drážky
Jedna vrstva		10
Izolovaný vodič	2 x 5,32=10,64	4 x 3,12 = 12,48
Ovinutí tkanicí	4 x 0,2 = 0,8	2 x 0,2 = 0,4
Drážková izolace	2 x 0,7 = 1,4	2 x 0,7 = 1,4
Druhá vrstva		2 x 10 = 20
Vložka mezi vrstvy		0,5
Podložka pod klín		0,5
Záporná vůle pod klínem		-0,3
Vůle	0,16	0,2
Závěr drážky		3,8 + 0,7 = 4,5
Celkem	b_{d1} = 13 mm	h_{d1} = 52,28 mm



Obrázek 6: Statorová drážka F

Výpočet vzduchové mezery

$$\delta = 0,1 + 0,145 \cdot \sqrt[3]{P_N} = 0,1 + 0,145 \cdot \sqrt[3]{120} = 0,8152$$

Vzduchovou mezeru volím $\delta = 0,80 \text{ mm}$.

1.4 Návrh rotoru

26) Vnější průměr rotoru

$$D_2 = D - 2\delta = 0,3445 - 2 \cdot 0,0008 = 0,3429 \text{ m}$$

27) Délku rotoru zvolím o 5 mm delší než je rozměr statoru

$$l_2 = l_1 + 0,005 = 0,213 + 0,005 = 0,218 \text{ m}$$

28) Rotorové vinutí volím s počtem drážek rotoru $Q_2 = 38$

Dle doporučených hodnot vzhledem k Q_1 v tabulce 6.15. str. 226 [1]

29) Drážková rozteč rotoru

$$t_{d2} = \frac{\pi D_2}{Q_2} = \frac{\pi \cdot 0,3429}{38} = 0,02835 \text{ m} = 28,35 \text{ mm}$$

30) Proud rotoru

$$I_2 = k_i \cdot I_1 \cdot p_i = 0,92 \cdot 205,498 \cdot 5,8 = 1096,54 \text{ A}$$

Činitel přepočtu proudů p_i

$$p_i = \frac{2 \cdot m_1 \cdot N_1 \cdot k_{v1}}{Q_2} = \frac{6 \cdot 40 \cdot 0,924}{38} = 5,8$$

31) Průřez vodiče rotorového vinutí

$$S_{ef2} = \frac{I_2}{J_2} = \frac{1096,54}{5,5 \cdot 10^6} = 1,994 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 = 199,4 \text{ mm}^2$$

Předběžná proudová hustota vinutí $J_2 = 5,5 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$ z mědi

Předběžná šířka drážky

$$b_{d2} = 0,35 \cdot t_{d2} = 0,35 \cdot 28,35 = 9,9225 \text{ mm}$$

Šířka vodiče

$$b'_{v2} = b_{d2} - 2b_i - \Delta b_d = 9,9225 - 2 \cdot 0,8 - 0,3 = 8,0225 \text{ mm}$$

Síla oboustranné izolace $2b_i = 1,6 \text{ mm}$

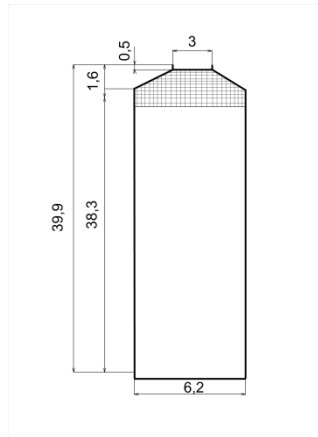
Přídavek na proložení plechů $\Delta b_d = 0,3 \text{ mm}$

Volím vodič 8 x 28 mm o průřezu $S_{ef} = 221,8 \text{ mm}^2$

Konečná proudová hustota v rotorovém vinutí

$$J_2 = \frac{I_2}{S_{ef2}} = \frac{1096,54}{221,8} = 4,94 \text{ A/m}^2$$

Rozměr rotorové drážky	Šířka drážky	Hloubka drážky
Vodič	8	28
Oboustranná izolace	1,6	1,6
Vložka na dno		0,5
Podložka pod klín		0,5
Část klínu v drážce		0,9
Závěr drážky		0,5+1,6
Celkem	$b_{d2} = 9,6 \text{ mm}$	$h_{d2} = 33,6 \text{ mm}$



Obrázek 7 : Rotorová drážka D

32) Kontrola magnetické indukce B v nejužším místě zubu rotoru

$$B_{z2max} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{d2} \cdot l_i}{b_{z2min} \cdot l_{Fe2} \cdot k_{Fe}} = \frac{0,76 \cdot 0,02835 \cdot 0,213}{0,01319 \cdot 0,213 \cdot 0,95} = 1,75 \text{ T}$$

33) Minimální šířka zubu rotoru

$$b_{z2min} = \frac{\pi \cdot (D_2 - 2h_{d2})}{Q_2} - b_{d2} = \frac{\pi \cdot (342,9 - 67,2)}{38} - 9,6 = 13,19 \text{ mm}$$

34) Vnitřní průměr rotoru

$$D_i = D_h = k_h \cdot D_e = 0,23 \cdot 0,53 = 0,1219 \text{ m}$$

Volím průměr 0,12 m

Činitel $k_h = 0,23$

V rotoru bude 12 axiálních ventilačních kanálů o průměru $d_{vk2} = 20 \text{ mm}$ v jedné řadě $m_{vk} = 1$.

35) Výpočet kruhu nakrátko

$$I_{kn} = \frac{I_2}{\Delta} = \frac{1096,54}{0,331} = 3312 \text{ A}$$

$$\Delta = 2 \sin \frac{\pi \cdot p}{Q_2} = 2 \sin \frac{\pi \cdot 2}{38} = 0,331$$

Hustota proudu v kruhu nakrátko

Hustota proudu v kruhu nakrátko se zpravidla volí o 15-20 % níže než hustota proudu v tyčích. Kruhy proto lépe odvádějí teplo a zlepšuje se tím také rozběhová charakteristika motoru.

$$J_k = 0,85 \cdot J_2 = 0,85 \cdot 4,94 \cdot 10^6 = 4,2 \cdot 10^6 \text{ A} \cdot \text{m}^2$$

Předběžný průřez kruhů nakrátko

$$S_k' = \frac{I_k}{J_k} = \frac{3312}{4,2 \cdot 10^6} = 7,886 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 = 788,6 \text{ mm}^2$$

Průřez kruhu nakrátko v rotorech s měděnými tyčemi se volí obdélníkový a rozměry tyče ($a_k \times b_k$) se zvolí tak, aby výška vodiče odpovídala $a_k \approx 1,1 - 1,25 h_{d2}$.

$$a_k = 1,2 \cdot h_{d2} = 1,2 \cdot 33,6 = 40,32 \text{ mm}$$

Volím vodič $a_k \times b_k$ - 40 x 20 mm o čistém průřezu 796,57 mm².

Konečná proudová hustota v kruhu nakrátko

$$J_k = \frac{I_{2k}}{S_k} = \frac{3312}{7,9657 \cdot 10^{-4}} = 4,16 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$$

1.5 Výpočet magnetického obvodu

36) Magnetické napětí vzduchové mezery

$$U_{\delta} = \frac{2}{\mu_0} \cdot B_{\delta} \cdot \delta \cdot k_c = 1,59 \cdot 10^6 \cdot 0,76 \cdot 0,0008 \cdot 1,31 = 1266 \text{ A}$$

37) Carterův činitel

$$k_c = k_{c1} \cdot k_{c2} = 1,246 \cdot 1,048 = 1,31$$

$$k_{c1} = \frac{t_{d1}}{t_{d1} - \gamma_1 \cdot \delta} = \frac{0,02255}{0,02255 - 5,568 \cdot 0,0008} = 1,246$$

$$\gamma_1 = \frac{(b_{01}/\delta)^2}{5 + (b_{01}/\delta)} = \frac{(0,007/0,0008)^2}{5 + (0,007/0,0008)} = 5,568$$

$$k_{c2} = \frac{t_{d2}}{t_{d2} - \gamma_2 \cdot \delta} = \frac{0,02835}{0,02835 - 1,607 \cdot 0,0008} = 1,048$$

$$\gamma_2 = \frac{(b_{02}/\delta)^2}{5 + (b_{02}/\delta)} = \frac{(0,003/0,0008)^2}{5 + (0,003/0,0008)} = 1,607$$

Magnetické napětí zubů

38) Minimální šířka zubu statoru

$$b_{z1min} = t_{d1} - b_{d1} = 0,02255 - 0,013 = 0,009 \text{ m}$$

39) Maximální šířka zubu statoru

$$b_{z1max} = t_{d1} \cdot \left(1 + \frac{2hd_1}{D}\right) - b_{d1} = 0,02255 \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot 0,05228}{0,3445}\right) - 0,013$$

$$= 0,016 \text{ m}$$

Indukce v různých průřezích zubu statoru

$$B_{z1max} = \frac{B_\delta \cdot t_{d1} \cdot l_1}{b_{z1min} \cdot l_{Fe1} \cdot k_{Fe}} = \frac{0,76 \cdot 0,02255 \cdot 0,213}{0,009 \cdot 0,213 \cdot 0,95} = 2,008 \text{ T}$$

$$B_{z1min} = \frac{B_\delta \cdot t_{d1} \cdot l_1}{b_{z1max} \cdot l_{Fe1} \cdot k_{Fe}} = \frac{0,76 \cdot 0,02255 \cdot 0,213}{0,016 \cdot 0,213 \cdot 0,95} = 1,15 \text{ T}$$

$$B_{z1av} = \frac{B_{z1max} + B_{z1min}}{2} = \frac{2 + 1,15}{2} = 1,58 \text{ T}$$

40) Magnetické napětí zubů statoru

$$U_{z1} = 2 \cdot h_{z1} \cdot H_{z1} = 2 \cdot 0,05228 \cdot 2198 = 230 \text{ A}$$

41) Intenzita magnetického pole statoru

$$H_{z1} = \frac{1}{6} \cdot (H_{z1max} + 4 \cdot H_{z1av} + H_{z1min})$$

$$H_{z1} = \frac{1}{6} \cdot (7170 + 4 \cdot 1370 + 537) = 2198 \text{ A/m}$$

Magnetizační charakteristika ocelí 2211 a 2312 dle tab. 2.10. [1]

$$B_{z1max} = 2,01 \text{ T} \quad H_{z1max} = 7170 \text{ A/m}$$

$$B_{z1av} = 1,58 \text{ T} \quad H_{z1min} = 1370 \text{ A/m}$$

$$B_{z1min} = 1,15 \text{ T} \quad H_{z1av} = 537 \text{ A/m}$$

42) Maximální šířka zubu rotoru

$$b_{z2max} = \frac{\pi \cdot [D_2 - 2 \cdot (h_0 - h_k)]}{Q_2} = \frac{\pi \cdot [0,3429 - 2(0,0005 - 0,016)]}{38} \\ = 0,0277m$$

43) Indukce v daném místě rotoru

$$B_{z2min} = \frac{B_\delta \cdot t_{d2} \cdot l_1}{b_{z2max} \cdot l_{fe2} \cdot k_{Fe}} = \frac{0,76 \cdot 0,02835 \cdot 0,213}{0,0277 \cdot 0,213 \cdot 0,95} = 0,82 T \\ B_{z2av} = \frac{B_{z2max} + B_{z2min}}{2} = \frac{1,75 + 0,82}{2} = 1,29 T$$

Magnetizační charakteristika ocelí 2211 a 2312 dle tab. 2.10. [1]

$$B_{z1max} = 1,75 T \quad H_{z1max} = 2070 A/m$$

$$B_{z1av} = 1,29 T \quad H_{z1min} = 710 A/m$$

$$B_{z1min} = 0,82 T \quad H_{z1av} = 302 A/m$$

44) Intenzita magnetického pole rotoru

$$H_{z2} = \frac{1}{6} \cdot (H_{z1max} + 4 \cdot H_{z1av} + H_{z1min}) \\ H_{z2} = \frac{1}{6} \cdot (2070 + 4 \cdot 710 + 302) = 869 A/m$$

45) Magnetické napětí zubů rotoru

$$U_{z2} = 2 \cdot h_{z2} \cdot H_{z2} = 2 \cdot 0,0336 \cdot 869 = 58,4 A$$

46) Činitel nasycení zubů

$$k_z = 1 + \frac{U_{z1} + U_{z2}}{U_\delta} = 1 + \frac{230 + 58,4}{1266} = 1,2278$$

Magnetické napětí jha

47) Indukce ve jhu statoru

$$B_{j1} = \frac{\Phi}{2h'_{j1} l_{Fe} k_{Fe}} = \frac{0,027}{2 \cdot 0,041 \cdot 0,213 \cdot 0,95} = 1,57 \text{ T}$$

48) Výška jha statoru

$$h'_{j1} = \frac{D_e - D}{2} - h_{d1} - \frac{2}{3} d_{vk1} m_{vk1} = \frac{0,53 - 0,344}{2} - 0,052 = 0,041 \text{ m}$$

49) Magnetické napětí jha statoru

$$U_{j1} = L_{j1} \cdot H_{j1} = 0,384 \cdot 1190 = 457 \text{ A}$$

$$L_{j1} = \pi \frac{(D_e - h_{j1})}{2p} = \pi \frac{(0,53 - 0,041)}{4} = 0,384 \text{ m}$$

Magnetizační charakteristika ocelí 2211 a 2312 je v tabulce D2.9. [1]

$$B_{j1} = 1,57 \text{ T}$$

$$H_{j1} = 1190 \text{ A/m}$$

50) Indukce ve jhu motoru

$$B_{j2} = \frac{\varnothing}{2h_{j2} l_{Fe2} k_{Fe}} = \frac{0,027}{2 \cdot 0,058 \cdot 0,218 \cdot 0,95} = 1,15 \text{ T}$$

51) Výška jha rotoru

$$h_{j2} = \frac{D_2 - D_i}{2} - h_{d2} - \frac{2}{3} d_{vk2} m_{vk2} = \frac{0,3429 - 0,12}{2} - 0,053 = 0,058$$

52) Magnetické napětí jha rotoru

$$U_{j2} = L_{j2} \cdot H_{j2} = 0,123 \cdot 367 = 45,3 \text{ A}$$

$$L_{j2} = \pi \frac{(D_i + h_{j2})}{2p} = \pi \frac{(0,12 + 0,037)}{4} = 0,123 \text{ m}$$

Magnetizační charakteristika ocelí 2211 a 2312 je v tabulce D2.9. [1]

$$B_{j1} = 1,15 \text{ T} \quad H_{j1} = 367 \text{ A/m}$$

53) Výsledné napětí na jednu pólovou dvojici

$$\begin{aligned} F_m &= U_\delta + U_{z1} + U_{z2} + U_{j1} + U_{j2} = 1266 + 230 + 58,4 + 457 + 45,3 \\ &= 2056,7 \text{ A} \end{aligned}$$

54) Činitel nasycení magnetického obvodu

$$k_\mu = \frac{F_m}{U_\delta} = \frac{2056,7}{1266} = 1,62$$

55) Magnetizační proud

$$I_{\mu} = \frac{pF_m}{0,9m_1N_1k_{v1}} = \frac{2 \cdot 2056,7}{0,9 \cdot 3 \cdot 40 \cdot 0,92} = 41,4$$

56) Poměrná hodnota magnetizačního proudu

$$i_{\mu} = \frac{I_{\mu}}{I_{1N}} = \frac{41,4}{205} = 0,202$$

1.6 Výpočet odporů a reaktancí motoru

1.6.1 Odpor vinutí statoru

57) Střední délka závitu statorového vinutí

$$l_{av1} = 2(l_{d1} + l_{\check{c}1}) = 2(0,213 + 0,04198) = 1,266 \text{ m}$$

58) Délka čela statorového vinutí

$$l_{\check{c}1} = K_{\check{c}1} \cdot b_{c1} - 2B - h_{d1} = 1,08 \cdot 0,294 + 2 \cdot 0,025 + 0,05228 = 0,4198 \text{ m}$$

$$K_{\check{c}1} = \frac{1}{\sqrt{1 - m^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 - 0,382^2}} = 1,08$$

$$m = \frac{b+S}{t_{d1}} = \frac{0,005+0,0035}{0,02255} = 0,382$$

$$b_{c1} = \frac{\pi(D + 2h_{d1})}{2p} \cdot \beta_1 = \frac{\pi(0,3445 + 2 \cdot 0,05228)}{4} \cdot 0,833 = 0,29 \text{ m}$$

B=0,025

S=0,0035 m

tab. 6.20 [1]

59) Vyložení čel statorového vinutí

$$l_{v1} = K_{v1} \cdot b_{c1} + B + 0,5h_{d1} = 0,20 \cdot 0,29 + 0,025 + 0,026 = 0,109 \text{ m}$$

$$K_{v1} = 0,5 \cdot k_{\zeta 1} \cdot m = 0,5 \cdot 1,08 \cdot 0,38 = 0,20$$

60) Celková délka vodiče jedné fáze

$$L_1 = N_1 \cdot l_{av1} = 40 \cdot 0,856 = 34,24 \text{ m}$$

61) Odpor fáze statorového vinutí

$$R_1 = k_r \rho_{115} \frac{L_1}{S_{ef1} \cdot a} = \frac{10^{-6}}{41} \cdot \frac{50,64}{26,9 \cdot 10^{-6} \cdot 2} = 0,023 \Omega$$

62) Poměrná hodnota

$$r_1 = R_1 \frac{I_{1N}}{U_{1N}} = 0,023 \frac{205,498}{230} = 0,02$$

1.6.2 Rozptylová reaktance vinutí statoru

63) Činitel drážkové vodivosti statoru

$$\lambda_{d1} = \frac{h_3 - h_m}{3b_d} \cdot k_\beta \left(\frac{h_2}{b_d} + \frac{3h_1}{b_d + 2b_0} + \frac{h_0}{b_0} \right) k'_\beta$$

$$\lambda_{d1} = \frac{25,96 - 1}{3 \cdot 13} \cdot 0,906 + \left(\frac{0,9}{13} + \frac{3 \cdot 2,65}{13 + 2 \cdot 7} + \frac{0,7}{7} \right) \cdot 0,875 = 0,89$$

$$h_m = 0,05 + 2 \times 0,02 = 1 \text{ mm}$$

$$h_1 = 2,65 \text{ mm}, h_2 = 0,9 \text{ mm}, h_3 = 8 \times 3,12 + 1 = 25,96 \text{ mm}$$

$$h_0 = 0,7 \text{ mm}, b_0 = 7 \text{ mm}, b_d = 13 \text{ mm}$$

Činitelé

$$k'_\beta = \frac{1}{4}(1 + 3\beta) = \frac{1}{4}(1 + 3 \cdot 0,833) = 0,875$$

$$k_\beta = \frac{1}{4}(1 + 3k'_\beta) = \frac{1}{4}(1 + 3 \cdot 0,875) = 0,906$$

Činitel magnetické vodivosti okolo čel vinutí

$$\lambda_{\zeta 1} = 0,34 \frac{q_1}{l_i} (l_{\zeta 1} - 0,64\beta \cdot t_p) = 0,34 \frac{3}{0,213} (0,4198 - 0,1444) = 1,317$$

Činitel magnetické vodivosti diferenčního rozptylu

$$\lambda_{dif1} = \frac{t_{d1}}{12\delta \cdot k_c} \xi = \frac{27,1}{12 \cdot 0,8 \cdot 1,39} 0,81 = 1,6$$

$$\xi = k'' q_1^2 + 2k'_\beta - k_v^2(1 + \Delta z) = 0,0034 \cdot 9 + 1,75 - 0,924^2(1 + 0,14) = 0,81$$

Dle grafu na obrázku 6.39 [1]

$$k'' = 0,0034 \quad \Delta z = 0,14$$

$$b_0/t_{d1} = 7/22,55 = 0,31$$

$$b_0/\delta = 7/0,8 = 8,75$$

$$X_{1\sigma} = 15,8 \cdot \frac{f_1}{100} \left(\frac{N_1}{100} \right) \frac{l_i}{pq_1} (\lambda_{d1} + \lambda_{\check{c}1} + \lambda_{dif1})$$

$$X_{1\sigma} = 15,8 \frac{50}{100} \left(\frac{40}{100} \right)^2 \frac{0,213}{6} \cdot (0,89 + 1,317 + 1,6) = 0,17 \Omega$$

64) Poměrná hodnota rozptylové reaktance

$$x_{1\sigma} = X_{1\sigma} \frac{I_{1N}}{U_{1N}} = 0,17 \frac{205}{230} = 0,15$$

1.6.3 Odpor vinutí rotoru

65) Odpor kruhů nakrátko

$$R_k = \rho_k \frac{\pi D_k}{Q_2 \cdot S_k} = \frac{10^{-6}}{41} \cdot \frac{\pi \cdot 0,3429}{38 \cdot 7,9657 \cdot 10^{-4}} = 8,68 \cdot 10^{-7} \Omega$$

66) Odpor tyčí rotorového vinutí

$$R_t = \rho_t \frac{l_2}{S_{ef2}} = \frac{10^{-6}}{41} \cdot \frac{0,218}{2,21 \cdot 10^{-4}} = 2,4 \cdot 10^{-5} \Omega$$

67) Odpor fáze rotorového vinutí

$$R_2 = R_t + 2 \cdot \frac{R_k}{\Delta^2} = 2,4 \cdot 10^{-5} + 2 \frac{8,68 \cdot 10^{-7}}{0,331^2} = 3,99 \cdot 10^{-5} \Omega$$

68) Odpor fáze rotoru přepočtený na počet závitů statorového vinutí

$$R_2' = R_2 \cdot 4 \cdot m \cdot \frac{(N_1 \cdot k_{v1})^2}{Q_2} = 3,99 \cdot 10^{-5} \cdot 4 \cdot 3 \cdot \frac{(40 \cdot 0,924)^2}{38} = 0,017 \Omega$$

Poměrná hodnota odporu R_2'

$$r_2 = R_2' \cdot \frac{I_{1N}}{U_{1N}} = 0,017 \cdot \frac{205}{230} = 0,0153 \Omega$$

1.6.4 Rozptylová reaktance vinutí rotoru

Pro drážku typu D z tab. 6.23 [1]

$$\lambda_{d2} = \frac{h_1}{3b} k_d + \frac{h_2}{b} + \frac{2h_2}{b+2b_0} + \frac{h_0}{b_0} = \frac{28}{3 \cdot 8} 1 + \frac{1,6}{8} + \frac{3,2}{14} + \frac{0,5}{3} = 1,76$$

69) Činitel magnetické vodivosti rozptylu čel

$$\lambda_{\varepsilon 2} = \frac{2,3D_k}{Q_2 l_i' \Delta^2} \log \frac{4,7D_k}{2(a_{kn} + b_{kn})} = \frac{2,3 \cdot 0,3429}{38 \cdot 0,218 \cdot 0,331^2} \log \frac{4,7 \cdot 0,3429}{2(0,06)} = 0,98$$

70) Činitel magnetické vodivosti diferenčního rozptylu klecového rotorového vinutí

$$\lambda_{dif2} = \frac{t_{d2}}{12\delta k_c} \xi = \frac{0,02835}{12 \cdot 0,0008 \cdot 1,31} 0,86 = 1,94$$

$$\xi = 1 + \frac{1}{5} \left(\frac{\pi p}{Q_2} \right)^2 - \frac{\Delta_z}{1 - \left(\frac{p}{Q_2} \right)^2} = 1 + \frac{1}{5} \left(\frac{\pi 2}{38} \right)^2 - \frac{0,14}{1 - \left(\frac{2}{38} \right)^2} = 0,86$$

71) Rozptylová reaktance klecového vinutí rotoru

$$X_{2\delta} = 7,9 f_1 l_i (\lambda_{d2} + \lambda_{\zeta 2} + \lambda_{dif2}) 10^{-6} = 7,9 \cdot 50 \cdot 0,218(4,68) = 4,03 \cdot 10^{-4} \Omega$$

Rozptylová reaktance jedné fáze rotorového klecového vinutí přepočtená na satorové vinutí

$$X'_{2\delta} = X_{2\delta} 4m_1 \frac{(N_1 k_{v1})^2}{Q_2} = 4,03 \cdot 10^{-4} \cdot 12 \frac{(40 \cdot 0,924)^2}{38} = 0,174 \Omega$$

Poměrná hodnota rozptylové reaktance

$$x_{2\delta} = X'_{2\delta} \frac{I_{1N}}{U_{1N}} = 0,174 \frac{205}{230} = 0,155$$

72) Vzájemná reaktance příčné větve

$$X_{12} = \frac{U_{1N}}{I_{\mu}} - X_{1\delta} = \frac{230}{41,4} - 0,127 = 5,43 \Omega$$

Poměrná hodnota

$$x_{12} = X_{12} \frac{I_{1N}}{U_{1N}} = 5,43 \frac{205}{230} = 4,84 \Omega$$

1.7 Výpočet ztrát

73) Hlavní ztráty v železe statoru

$$\Delta P_{\text{Feh}} = \Delta p_{1.0} \left(\frac{f}{50} \right)^\beta \cdot (k_{dj} B_{j1}^2 m_{j1} + k_{dz} B_{z1av}^2 m_{z1})$$

$$\Delta P_{\text{Feh}} = 1,75 \left(\frac{50}{50} \right)^{1,4} \cdot (1,6 \cdot 1,15^2 \cdot 98,3 + 1,8 \cdot 1,58^2 \cdot 49,5) = 753 \text{ W}$$

$\Delta p_{1.0} = 1,75 \text{ W/kg}$..měrné ztráty v železe

$k_{dj} = 1,6$, $k_{dz} = 1,8$ činitelé uvažující vliv nerovnoměrnosti rozložení toku v částech

βexponent závislý na druhu oceli

74) Hmotnost statorového jha

$$m_{j1} = \pi(D_e - h_{j1})h_{j1}l_{Fe1}k_{Fe}\gamma_{Fe} = \pi(0,4895)0,0405 \cdot 0,213 \cdot 0,95 \cdot 7,8 \cdot 10^3 \\ = 98,3 \text{ kg}$$

$$h_{j1} = 0,5(D_e - D) - h_{d1} = 0,5(0,53 - 0,3445) - 0,05228 = 0,0405 \text{ m}$$

75) Hmotnost zubů statoru

$$m_{z1} = h_{z1}b_{z1av}Q_1l_{Fe1}k_{Fe}\gamma_{Fe} = 0,05225 \cdot 0,0125 \cdot 48 \cdot 0,213 \cdot 0,95 \cdot 7,8 \cdot 10^3 \\ = 49,5 \text{ kg}$$

Střední šířka zubu statoru

$$b_{z1av} = \frac{b_{z1max} + b_{z1min}}{2} = \frac{0,016 + 0,009}{2} = 0,0125 \text{ m}$$

76) Povrchové ztráty v rotoru

$$\Delta P_{\delta p2} = p_{\delta p2}(t_{d2} - b_{02})Q_2 I_{Fe} = 531(0,02835 - 0,003) \cdot 38 \cdot 0,213 = 109 \text{ W}$$

$$p_{\delta p2} = 0,5k_{02} \left(\frac{Q_1 n}{10000} \right)^{1,5} (B_{02} t_{d1} \cdot 10^3)^2 = \frac{1}{2} \cdot 1,6 \cdot (7,2)^{1,5} (0,26 \cdot 22,55)^2 \\ = 531 \text{ W/m}^2$$

$$B_{02} = \beta_{02} \cdot k_c \cdot B_{\delta} = 0,25 \cdot 1,35 \cdot 0,76 = 0,26 \text{ T}$$

$$B_{02} = 0,25, \quad b_0/0,8 = 3,75$$

Povrchové ztráty statoru

$$\Delta P_{\delta p1} = p_{\delta p1}(t_{d1} - b_{01})Q_1 I_{Fe} = 1399(0,02255 - 0,007)48 \cdot 0,213 = 222 \text{ W}$$

$$p_{\delta p1} = 0,5k_{01} \left(\frac{Q_2 n}{10000} \right)^{1,5} (B_{01} t_{d2} 10^3)^2 = \frac{1}{2} \cdot 1,6(5,7)^{1,5} (0,4 \cdot 28,35)^2 \\ = 1399 \text{ W/m}^2$$

$$B_{01} = \beta_{01} \cdot k_c \cdot B_{\delta} = 0,38 \cdot 1,39 \cdot 0,76 = 0,45 \text{ T}, \quad \beta_{01} = 0,38 \quad b_0/\delta = 7/0,8 = 0,75$$

77) Pulzní ztráty v zubech rotoru

$$\Delta P_{p2} = 0,11 \left(\frac{Q_1 n}{1000} \cdot B_{p2} \right)^2 m_{z2} = 0,11 \left(\frac{48 \cdot 1500}{1000} \cdot 0,103 \right)^2 \cdot 38,2 = 231 \text{ W}$$

Hmotnost zubů rotoru

$$m_{z2} = h_{z2} b_{z2av} Q_2 l_{Fe2} k_{Fe} \gamma_{Fe} = 0,0336 \cdot 0,0204 \cdot 38 \cdot 0,218 \cdot 0,95 \cdot 7,08 \cdot 10^3 \\ = 38,2 \text{ kg}$$

$$b_{z2av} = \frac{b_{z2max} + b_{z2min}}{2} = \frac{0,0277 + 0,0134}{2} = 0,0204 \text{ m}$$

$$B_{p2} = \frac{\gamma_1 \delta}{2t_{d2}} \cdot B_{z2av} = \frac{5,568 \cdot 0,0008}{2 \cdot 0,028} \cdot 1,29 = 0,103 \text{ T}$$

78) Pulzní ztráty v zubech statoru

$$\Delta P_{p1} = 0,11 \left(\frac{Q_2 n}{1000} B_{p1} \right)^2 m_{z1} = 0,11 \cdot \left(\frac{38 \cdot 1500}{1000} \cdot 0,045 \right)^2 \cdot 49,5 = 36 \text{ W}$$

$$B_{p1} = \frac{\gamma_2 \delta}{2t_{d1}} \cdot B_{z1av} = \frac{1,607 \cdot 0,8}{2 \cdot 22,55} \cdot 1,58 = 0,045 \text{ T}$$

79) Dodatečné ztráty v železe

$$\Delta P_{Fed} = \Delta P_{\delta p1} + \Delta P_{\delta p2} + \Delta P_{p1} + \Delta P_{p2} = 222 + 109 + 36 + 231 = 598 \text{ W}$$

80) Celkové ztráty v železe

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_{Feh} + \Delta P_{Fed} = 753 + 598 = 1351 \text{ W}$$

Ztráty ve vinutí

81) Jouleovy ztráty ve vinutí statoru

$$\Delta P_{j1} = m_1 R_1 I_1^2 = 3 \cdot 0,023 \cdot 205^2 = 2899 \text{ W}$$

82) Elektrické ztráty ve vinutí rotoru

$$\Delta P_{j2} = Q_2 R_2 I_2^2 = 38 \cdot 3,99 \cdot 10^{-5} \cdot 1096,54^2 = 1823 \text{ W}$$

83) Ztráty mechanické pro motor s axiální ventilací

$$\Delta P_{mech} = K_T \left(\frac{n}{1000} \right)^2 \cdot (10D_e)^3 = 1,5 \left(\frac{1500}{1000} \right)^2 \cdot (10 \cdot 0,53)^3 = 502 \text{ W}$$

$2p$	2	4	6	8	10	12
K_T	3,65	1,5	0,7	0,35	0,2	0,2

Obrázek 8: K výpočtu mechanických ztrát [1]

84) Ztráty přidavné

$$P_p = \sqrt{3} \cdot U_s \cdot I_{1N} \cdot \cos\varphi = \sqrt{3} \cdot 230 \cdot 205 \cdot 0,91 = 74316 \text{ W}$$

$$\Delta P_D = 0,005 \cdot P_p = 0,005 \cdot 74316 = 372 \text{ W}$$

85) Celkové ztráty

$$\Delta P = \Delta P_{\text{Fe}} + \Delta P_{j1} + \Delta P_{j2} + \Delta P_{\text{mech}} + \Delta P_{\text{D}} = 1351 + 2899 + 1823 + 502 + 372$$

$$\Delta P = 6065 \text{ W}$$

86) Účinnost motoru

$$\eta = 1 - \frac{\sum P}{P_p} = 1 - \frac{6947}{74316} = 0,906 = 90,6 \%$$

Chod naprázdno

87) Proud naprázdno

$$I_0 = \sqrt{I_{0\check{c}}^2 + I_{0j}^2} = \sqrt{4,17^2 + 41,4^2} = 41,6 \text{ A}$$

$$I_{0\check{c}} = \frac{\Delta P_{\text{Fe}} + \Delta P_{\text{mech}} + \Delta P_{j0}}{m \cdot U_{1N}} = \frac{1351 + 502 + 118}{3 \cdot 230} = 2,85 \text{ A}$$

$$\Delta P_{j0} = 3R_1 I_{\mu}^2 = 3 \cdot 0,023 \cdot 41,4^2 = 118 \text{ W}$$

88) Účinitík naprázdno

$$\cos \varphi_0 = \frac{I_{0\check{c}}}{I_0} = \frac{2,85}{41,6} = 0,0685 \approx \varphi_0 = 86^\circ$$

2 Kružnicový diagram a momentová charakteristika

Kružnicový diagram je geometrické místo proudových vektorů za předpokladu, že veškeré odpory a reaktance motoru jsou stálé. Je několik druhů kružnicových diagramů s různou přesností, ale žádný nepopíše fyzikální skutečnost. Vždy se předpokládají alespoň stálé ztráty v železe a mechanické ztráty.

U asynchronních motorů o výkonu nad 3 kW se jalová složka činitele c_1 zanedbává.

$$c_1 = 1 + \frac{X_{1\delta}}{X_{12}} = 1 + \frac{0,17}{5,43} = 1,031$$

$$a' = c_1^2 = 1,06 \Omega$$

$$b' = 0$$

$$a = c_1 \cdot R_1 = 1,023 \cdot 0,023 = 0,0235 \Omega$$

$$b = c_1(X_{1\delta} + c_1 X'_{2\delta}) = 1,023(0,127 + 1,023 \cdot 0,174) = 0,312 \Omega$$

Činná složka proudu

$$89) I_{(o)\check{c}}^- = \frac{\Delta P_{Feh} + 3R_1 I_{\mu}^2}{mU_{1N}} = \frac{753 + 3 \cdot 0,023 \cdot 41,4^2}{3 \cdot 230} = 1,26 \text{ A}$$

Jmenovitý skluz $s_N = r_2 = 0,0153$

Skluz zvratu

$$90) s_{max} = \frac{R'_2}{\frac{X_{1\delta}}{c_1} + X'_{2\delta}} = \frac{0,017}{\frac{0,127}{1,023} + 0,174} = 0,056$$

Fiktivní odpor R_{12}

$$R_{12} = \frac{\Delta P_{mech}}{mI_{\mu}^2} = \frac{502}{3 \cdot 41,4^2} = 0,098 \Omega$$

Odpor nakrátko

$$R_k = R_1 + c_1 R_2' = 0,023 + 1,023 \cdot 0,017 = 0,04 \Omega$$

Reaktance nakrátko

$$X_k = X_{1\delta\gamma} + c_1 X_{2\delta}' = 0,127 + 1,023 \cdot 0,174 = 0,305 \Omega$$

Měřítka proudu

$$m_1 = \frac{U_{1N}}{c_1 X_k D_k} = \frac{230}{1,023 \cdot 0,305 \cdot 250} = 2,948 A \cdot mm^{-1}$$

Měřítka výkonu

$$m_p = 3 \cdot U_{1N} \cdot m_1 = 3 \cdot 230 \cdot 2,948 = 1356,08 W \cdot mm^{-1}$$

Měřítka momentu

$$m_M = \frac{m_p}{\omega} = \frac{1356,08}{157,08} = 8,63 N \cdot m \cdot mm^{-1}$$

$$\omega = \frac{2\pi f_1}{p} = \frac{2\pi 50}{2} = 157,08$$

91) Proud nakrátko

$$Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_k^2} = \sqrt{0,033^2 + 0,305^2} = 0,307 \Omega$$

$$I_k = \frac{U_{iN}}{Z_k} = \frac{230}{0,307} = 749 A$$

92) Účinitík nakrátko

$$\cos\varphi_k = \frac{R_k}{Z_k} = \frac{0,033}{0,315} = 0,105 = 84^\circ$$

93) Výpočet velikostí úseček pro konstrukci kružnicového diagramu

$$\overline{F_0'F_0''} = \overline{A_0F_0'} \cdot 2 \cdot \operatorname{tg}\gamma =$$

$$\begin{aligned} \operatorname{tg}\gamma &= \frac{R_1X_{12} - R_{12}X_{1\sigma\gamma}}{R_{12}(R_1 + R_{12}) + X_{12}(X_{1\sigma} + X_{12})} \\ &= \frac{0,023 \cdot 5,43 - 0,098 \cdot 0,127}{0,098(0,023 + 0,098) + 5,43 \cdot (0,127 + 5,47)} = 3,67 \cdot 10^{-3} \end{aligned}$$

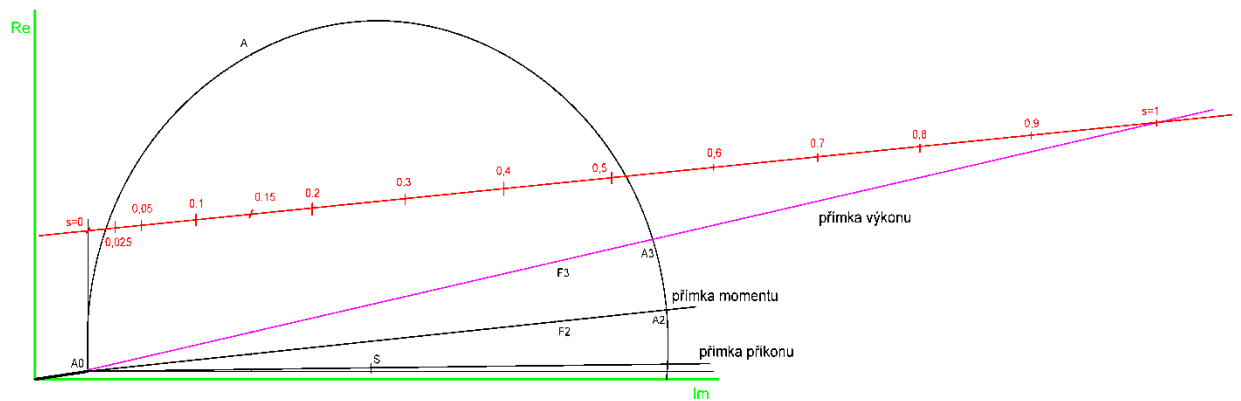
$$\overline{F_1F_2} = \overline{A_0F_1} \cdot \frac{R_1}{X_k} = 195 \cdot \frac{0,023}{0,305} = 14,7 \text{ mm}$$

$$\overline{F_2F_3} = \overline{A_0F_1} \cdot \frac{R_k}{X_k} = 195 \cdot \frac{0,033}{0,305} = 21,1 \text{ mm}$$

$$\overline{OA_1} = \frac{\Delta P_0}{m_p} = \frac{1373,37}{1356,08} = 1,01 \text{ mm}$$

$$P_0 = \Delta P_{Feh} + 3R_1I_0^2 + \Delta P_{mech} = 753 + 3 \cdot 0,023 \cdot 41,42^2 + 502 = 1373,37 \text{ W}$$

$$\overline{E/F_N} = \frac{P_{2N}}{m_p} = \frac{120000}{1356,08} = 88,5 \text{ mm}$$



Obrázek 9 : Kružnicový diagram

Odečtené hodnoty z kružnicového diagramu

Statorový proud

$$I_{1N} = m_1 \cdot \overline{OA} = 2,948 \cdot 74 = 217 \text{ A}$$

Rotorový proud přepočtený na stator

$$I'_{2N} = m_1 \cdot \overline{A_{(0)}A} = 2,948 \cdot 72 = 212,3 \text{ A}$$

Proud naprázdno při synchronních otáčkách

$$I_{(0)} = m_1 \cdot \overline{OA_0} = 2,948 \cdot 14,7 = 43,2 \text{ A}$$

Statorový proud nakrátko

$$I_{1k} = m_1 \cdot \overline{OA_3} = 2,948 \cdot 264 = 778 \text{ A}$$

Rotorový proud nakrátko přepočtený na stranu statoru

$$I'_{2k} = m_1 \cdot \overline{A_{(0)}A_3} = 2,948 \cdot 249 = 734 \text{ A}$$

Příkon

$$P_p = m_p \cdot \overline{AN} = 1356,08 \cdot 103 = 139676 \text{ W}$$

Maximální příkon

$$P_{\max} = m_p \cdot \overline{A_m N_m} = 1356,08 \cdot 117 = 158661 \text{ W}$$

Vnitřní výkon

$$P_i = m_p \cdot \overline{AC} = 1356,08 \cdot 101 = 136964 \text{ W}$$

Maximální moment

$$M_{i\max} = m_M \cdot \overline{A_M C_M} = 8,63 \cdot 117 = 1009,7 \text{ Nm}$$

Záběrový moment

$$M_z = m_M \overline{A_3 C_z} = 8,63 \cdot 27 = 233 \text{ Nm}$$

Výkon stroje

$$P_2 = m_p \overline{AE} = 1356,08 \cdot 95 = 128827 \text{ W}$$

Maximální výkon na hřídeli

$$P_{2\max} = m_p \cdot \overline{A_{mP2} E_{mP2}} = 1356,08 \cdot 100 = 135608 \text{ W}$$

Účinnost

Kruhový diagram umožňuje s dostatečnou přesností určit ztráty a účinnost asynchronního motoru. Účinnost se určí jako podíl vzdáleností bodů AE a AN.

$$\eta = \frac{\overline{AE}}{\overline{AN}} = \frac{96}{103} = 0,93$$

Účinek

$$\cos\varphi = \cos\angle AOB_1 = \cos 35^\circ = 0,82$$

Maximální účinek

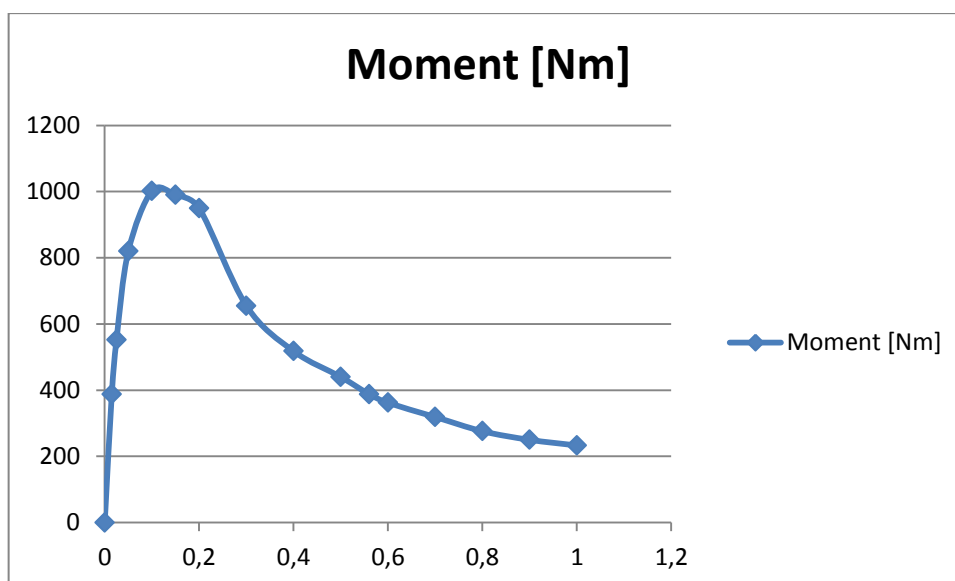
$$\cos\varphi_{max} = \cos\angle A_{m\cos\varphi}OB_1 = \cos 22^\circ = 0,914$$

Skluz

$$s = \frac{\overline{DC}}{\overline{AC}} = \frac{9}{117} = 0,077$$

Skluz [-]	Moment [Nm]
0	0
0,015	388
0,025	552
0,05	820
0,1	1002
0,15	990
0,2	950
0,3	655
0,4	518
0,5	440
0,56	388
0,6	362
0,7	319
0,8	276
0,9	250
1	233

Obrázek 9 : Momenty pro odečtené skluzy



Graf 1: Momentová charakteristika

3 Tepelný výpočet

Elektrické ztráty v drážkách vinutí statoru

94) Činitel zvýšení ztrát pro izolaci třídy F $k_p = \rho_{140} / \rho_{115} = 1,07$

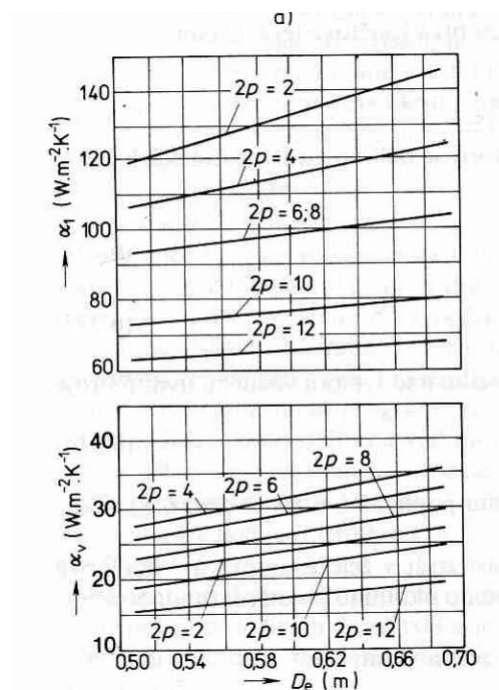
$$\Delta P_{jd1} = k_p \Delta P_{j1} \frac{2l_1}{l_{av}} = 1,07 \cdot 2899 \cdot \frac{2 \cdot 0,213}{0,856} = 1543,7 \text{ W}$$

Oteplení vnitřního povrchu statorového svazku nad teplotu vzduchu uvnitř stroje

K - činitel respektující skutečnost, že se část ztrát v železe statoru a v drážkové části vinutí se předává kostrou přímo do okolního prostředí $K=0,2$ [1]

α_1 – součinitel přestupu tepla z povrchu, dle provedení motoru $\alpha_1=107^\circ\text{C}$

$$\Delta \theta_{pov1} = K \frac{\Delta P_{jd1} + \Delta P_{Feh}}{\pi D l_1 \alpha_1} = 0,2 \frac{1543,7 + 753}{\pi \cdot 0,3445 \cdot 0,213 \cdot 107} = 18,6^\circ\text{C}$$



Obrázek 9: Střední hodnoty součinitelů přestupu tepla pro IP 44 [1]

95) Teplotní spád v izolaci drážkové části statorového vinutí

$$\Delta\vartheta_{id1} = \frac{\Delta P'_{jd1}}{Q_1 O_{d1} l_1} \cdot \left(\frac{b_{i1}}{\lambda_{ekv}} + \frac{b_1 + b_2}{16\lambda'_{ekv}} \right)$$

$$\Delta\vartheta_{id1} = \frac{1543,7}{48 \cdot 0,1245 \cdot 0,213} \cdot \left(\frac{0,0007}{0,16} + 0 \right) = 5,3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Pro cívky z pásových vodičů $\frac{b_1 + b_2}{16\lambda'_{ekv}} = 0$

$$\lambda_{ekv} = 0,16 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}$$

Elektrické ztráty ve vinutí statoru v čelech cívek

$$O_{d1} = 2h_d + b_1 + b_2 = 2 \cdot 0,05228 + 0,013 + 0,007 = 0,1245 \text{ m}$$

96) Jouleovy ztráty ve vinutí statoru v čelech cívek

$$\Delta P'_{jč1} = k_p \Delta P_{j1} \frac{2l_{č1}}{l_{av}} = 1,07 \cdot 1543,7 \cdot \frac{2 \cdot 0,4198}{0,856} = 1620 \text{ W}$$

97) Teplotní spád na tloušťce izolace čel

$$\Delta\vartheta_{ič1} = \frac{\Delta P'_{jč1}}{2 \cdot Q_1 O_{č1} l_{č1}} \cdot \left(\frac{b_{ič1}}{\lambda_{ekv}} + \frac{h_{d1}}{12\lambda'_{ekv}} \right)$$

$$\Delta\vartheta_{ič1} = \frac{1620}{2 \cdot 48 \cdot 0,1245 \cdot 0,4198} \cdot \left(\frac{0}{0,16} + 0 \right) = 0^\circ\text{C}$$

$O_{\zeta 1}$ – obvod chladícího povrchu čel jedné cívky $O_{\zeta 1} \approx O_{d1} = 0,1245 \text{ m}$

Pro cívky z pásů $\frac{h_{d1}}{12\lambda'_{ekv}} = 0$

Čela cívek jsou neizolovaná $b_{i\zeta} = 0$

98) Oteplení vnějšího povrchu čel nad teplotu vzduchu uvnitř stroje

$$\Delta\vartheta_{pov\zeta 1} = \frac{K \cdot \Delta P'_{j\zeta 1}}{2\pi D l_v \alpha_1} = \frac{0,2 \cdot 1620}{2\pi \cdot 0,3445 \cdot 0,213 \cdot 107} = 6,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

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

Obrázek 10 : Střední hodnoty činitele K [1]

99) Střední oteplení statorového vinutí nad teplotu vzduchu uvnitř stroje

$$\Delta\vartheta'_1 = \frac{(\Delta\vartheta_{pov1} + \Delta\vartheta_{id1})2l_i}{l_{av1}} + \frac{(\Delta\vartheta_{i\zeta 1} + \Delta\vartheta_{pov\zeta 1})2l_{\zeta 1}}{l_{av1}}$$

$$\Delta\vartheta'_1 = \frac{(18,6 + 5,3) \cdot 2 \cdot 0,213}{0,856} + \frac{(0 + 6,5) \cdot 2 \cdot 0,4198}{0,856} = 11,8 + 6,3 = 18,1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

100) Oteplení vzduchu v motoru nad teplotu okolí

(teplota kostry je stejná jako teplota uvnitř motoru)

$$\sum \Delta P' = \sum \Delta P + (k_p - 1) \cdot (\Delta P_{j1} + \Delta P_{j2})$$

$$\sum \Delta P' = 6947 + (1,07 - 1) \cdot (2899 + 1823) = 7277,5 \text{ W}$$

$$\sum \Delta P'_V = \sum \Delta P' - (1 - K) \cdot (\Delta P'_{jd1} + \Delta P_{Feh}) - 0,9 \Delta P_{mech}$$

$$\sum \Delta P'_V = 7277,5 - (1 - 0,2) \cdot (1544 + 753) - 0,9 \cdot 502 = 4989 \text{ W}$$

$$S_{těl} = (\pi D_e + 80 z) \cdot (l_1 + 2l_{v1}) = (\pi 0,53 + 4)(0,213 + 0,218) = 2,44 \text{ m}^2$$

$$\Delta \vartheta_v = \frac{\sum \Delta P'_V}{S_{těl} \alpha_v} = \frac{4989}{2,44 \cdot 28} = 70,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Sřední oteplení statorového vinutí nad teplotu okolí

$$\Delta \vartheta_1 = \Delta \vartheta'_1 + \Delta \vartheta_v = 13,7 + 70,5 = 84 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Výpočet ventilace

101) Potřebný průtok vzduchu pro ventilaci

$$Q_v = \frac{k_m \sum \Delta P'_v}{1100 \cdot \Delta \vartheta_v} = \frac{7,05 \cdot 4989}{1100 \cdot 70,5} = 0,454 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

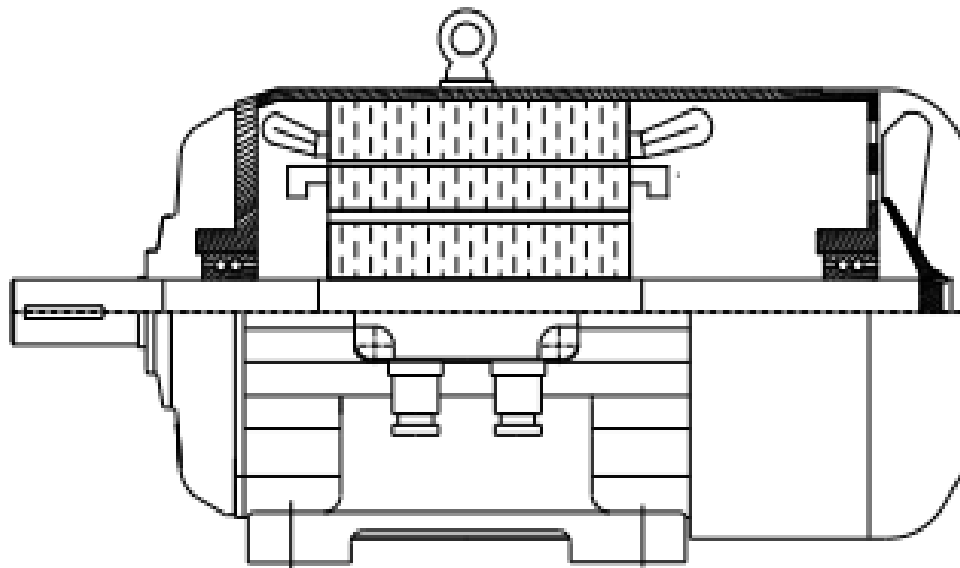
$$k_m = m \sqrt{\frac{n}{100} \cdot D_e} = 2,5 \sqrt{\frac{1500}{100}} \cdot 0,53 = 7,05$$

102) Průtok vzduchu dodaný vnějším ventilátorem

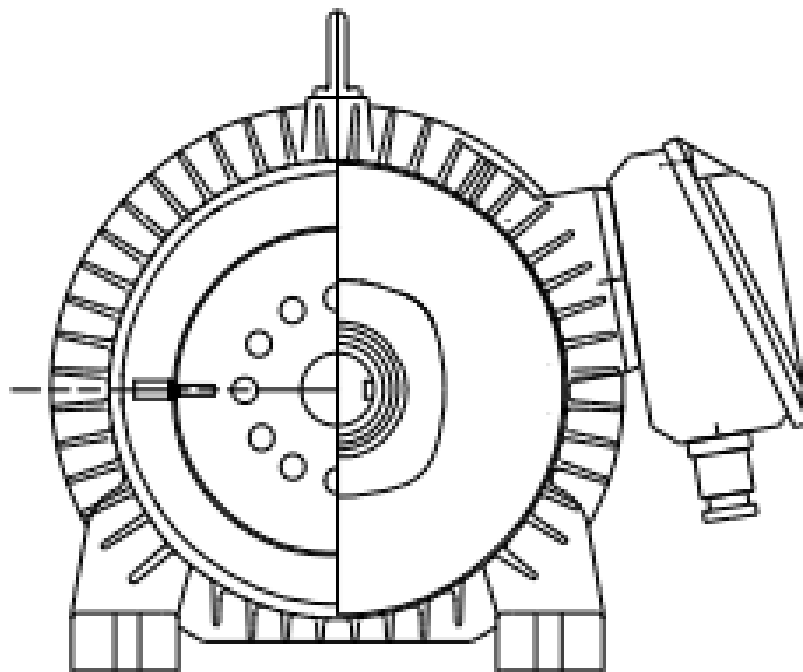
$$Q_v = 0,6 D_e^3 \frac{n}{100} = 0,6 \cdot 0,53^3 \frac{1500}{100} = 1,33 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Průtok vzduchu je větší než průtok potřebný pro chlazení motoru.

4 Schématický řez strojem



Obrázek 11 : Schématický podélný řez motorem



Obrázek 12 : Schématický příčný řez motorem

Závěr:

Obsahem diplomové práce bylo navrhnout asynchronní motor s kotvou nakrátko o výkonu 120 kW. Návrh se věnuje v první části elektromagnetickému návrhu motoru, který obsahuje výpočet rozměrů statoru i rotoru, výpočty odporů a reaktancí a ztrát. V druhé části se práce věnuje kružnicovému diagramu a momentové charakteristice. V třetí části je proveden orientační tepelný výpočet a poslední část obsahuje schématické řezy motorem. Během návrhu je řada výpočtů, které musí vyhovovat určitým mezím a pokud výsledek nevyhovuje, tak je třeba se vrátit a hodnoty korigovat, aby následný výpočet vyhovoval a proto byl tento způsob návrhu značně časově náročný.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] KOPYLOV, Igor Petrovič. *Stavba elektrických strojů I.*: 1. vyd. Praha: SNTL, 1988, s. 688.
- [2] HAVELKA Jiří, DRESLER Jaromír, JÍLEK Jaromír. *Montáž, údržba a opravy elektrických strojů točivých.* vyd. Praha: STRO.M 1995