

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Katedra elektroenergetiky a ekologie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Návrh asynchronního motoru s kotvou nakrátko

Parametry motoru : $P = 14 \text{ kW}$, $2p = 8$, $m = 3$,

$n = 750 \text{ ot/min}$, $U = 400 \text{ V}$

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

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Miroslav JANDORA**
Osobní číslo: **E10N0195P**
Studijní program: **N2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Návrh asynchronního motoru**
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 motoru dle zadání.
2. Popište konstrukční uspořádání asynchronních strojů.
3. Navrhněte konstrukční řešení stroje.
4. Nakreslete navržený motor ve 3D CAD softwaru.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:


Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Lukáš Bouzek**
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání diplomové práce: **17. října 2011**
Termín odevzdání diplomové práce: **11. května 2012**


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




Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

Abstrakt

Tato diplomová práce je se zabývá návrhem asynchronního motoru s kotvou nakrátko o výkonu 14 kW, se synchronní rychlostí 750 otáček za minutu. Návrh stroje je proveden dle zadaných parametrů. Hlavní geometrické rozměry jsou zjištěny pomocí výpočtů. V práci jsou dále vypočteny velikosti statoru a rotoru, odpory, reaktance, magnetizační proudy, ztráty a účinnost stroje. Na základě hodnot je vytvořen model motoru v 3D CAD programu Solidworks.

Klíčová slova

Asynchronní motor, stator, rotor, vinutí, klec nakrátko

Abstract

This thesis deal with the design of electromagnetic induction motor with short circuit armature with power 14 kW, with synchronous speed 750 rpm. The design is consist of computation geometric size motor. Using the calculation are found the main geometric dimensions. In thesis are further calculated the size of stator and rotor, resistance, reactance, magnetizing current, losses and efficiency of machine. Basid on the values is created engine model in 3D CAD program Solidworks.

Key words

Asynchronous motor, stator, rotor, winding, short circuit

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

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 Plzni dne 2.5.2012

Jméno příjmení

.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Lukášovi Bouzkovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	11
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	12
1 NÁVRH ASYNCHRONNÍHO MOTORU	14
1.1 VOLBA HLAVNÍCH ROZMĚRŮ	14
1.1.1 Počet pólových dvojic	14
1.1.2 Předběžná výška osy	15
1.1.3 Vnější průměr statoru	15
1.1.4 Vnitřní průměr statoru	16
1.1.5 Pólová rozteč	16
1.1.6 Vnitřní výkon	16
1.1.7 Předběžné elektromagnetické zatížení	18
1.1.8 Hodnoty činitelů $a\delta$, k_B a k_{VI}	18
1.1.9 Synchronní úhlová rychlost hřídele	18
1.1.10 Ideální délka vzduchové mezery	18
1.1.11 Štíhlostní poměr	19
1.2 NÁVRH STATOROVÉHO VINUTÍ A DRÁŽEK	19
1.2.1 Drážková rozteč	19
1.2.2 Počet drážek statoru	20
1.2.3 Počet drážek na pól a fázi	20
1.2.4 Drážková rozteč	21
1.2.5 Počet vodičů v drážce	21
1.2.6 Konečný počet závitů ve fázi vinutí	21
1.2.7 Konečná lineární hustota proudu	21
1.2.8 Činitel vinutí statoru	22
1.2.9 Magnetická indukce ve vzduchové mezeře	22
1.3 PRŮŘEZ VODIČE	23
1.3.1 Předběžná proudová hustota	23
1.3.2 Průřez efektivního vodiče	23
1.3.3 Proudová hustota	24
1.4 ROZMĚRY DRÁŽEK A ZUBŮ STATORU	24
1.4.1 Výška j_{ha} statoru	24
1.4.2 Činitel plnění železa	24
1.4.3 Délka j_{ha} statoru	25
1.4.4 Předběžná šířka zubu	25

1.4.5	Hloubka drážek.....	25
1.4.6	Šířka drážky u paty zubu.....	25
1.4.7	Šířka drážky v horní části.....	25
1.4.8	Aktivní hloubka drážek.....	26
1.4.9	Celková hloubka drážky.....	26
1.4.10	Rozměry drážek.....	26
1.4.11	Plocha, kterou zaujímá drážková izolace.....	27
1.4.12	Činitel plnění drážky.....	27
1.5	VOLBA VZDUCHOVÉ MEZERY	28
1.6	NÁVRH ROTORU NAKRÁTKO	29
1.6.1	Volba počtu drážek	29
1.6.2	Výpočet rozměrů	29
1.6.3	Proud v tyči rotoru.....	30
1.6.4	Průřez tyče	31
1.6.5	Výpočet rotorové drážky	31
1.6.6	Výpočet kruhu nakrátko	33
1.6.7	Výpočet magnetického obvodu.....	34
1.6.8	Velikost magnetických napětí.....	35
1.7	VÝPOČET ODPORŮ A REAKTANCÍ.....	38
1.7.1	Odpor jedné fáze statorového vinutí	38
1.7.2	Poměrná hodnota odporu jedné fáze statorového vinutí.....	40
1.7.3	Odpor kruhů nakrátko.....	40
1.7.4	Odpor tyčí rotorového vinutí.....	40
1.7.5	Odpor fáze rotorového vinutí.....	40
1.7.6	Odpor fáze rotoru přepočtený na počet závitů statorového vinutí.....	40
1.7.7	Poměrná hodnota odporu R_2'	41
1.7.8	Rozptylová reaktance statorového vinutí motoru nakrátko.....	41
1.7.9	Poměrná hodnota rozptylové reaktance.....	43
1.7.10	Rozptylová reaktance l_f rotoru.....	43
1.7.11	Vliv natočení drážek.....	44
1.7.12	Rozptylová reaktance jedné fáze rotorového vinutí	44
1.7.13	Rozptylová reaktance jednofázového rotorového vinutí přepočtená na statorové vinutí.....	45
1.7.14	Poměrná hodnota rozptylové reaktance.....	45
1.8	VÝPOČET ZTRÁT	45
1.8.1	Hlavní ztráty v železe	45
1.8.2	Povrchové ztráty v rotoru	46
1.8.3	Pulsní ztráty v zubech rotoru	47
1.8.4	Dodatečné ztráty v železe.....	48
1.8.5	Celkové ztráty v železe	48

1.8.6	<i>Elektrické ztráty ve všech fázích vinutí statoru</i>	48
1.8.7	<i>Elektrické ztráty v klecovém vinutí</i>	48
1.8.8	<i>Mechanické ztráty</i>	48
1.8.9	<i>Přídavné ztráty při zatížení</i>	49
1.8.10	<i>Proud naprázdno</i>	49
1.8.11	<i>Účinnost naprázdno</i>	49
1.8.12	<i>Proud nakrátko</i>	49
1.8.13	<i>Účinnost nakrátko</i>	50
1.8.14	<i>Účinnost stroje</i>	50
2	KONSTRUKČNÍ USPOŘÁDÁNÍ ASYNCHRONNÍCH STROJŮ	50
2.1	ROTOR NAKRÁTKO	51
2.2	ROTOR KROUŽKOVÝ	51
3	NÁVRH KONSTRUKČNÍHO ŘEŠENÍ STROJE	53
4	FEMM	53
5	KONSTRUKCE MOTORU V 3D CAD PROGRAMU SOLIDWORKS	54
5.1	STATOR	54
5.2	ROTOR	56
5.3	KRYTÍ MOTORU	58
5.4	OSTATNÍ SOUČÁSTI	58
	ZÁVĚR	60
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A ZDROJŮ	61
	PŘÍLOHY	62
	PŘÍLOHA Č. 1: VÝKRES STATOROVÉ A ROTOROVÉ DRÁŽKY	62
	PŘÍLOHA Č. 2: ZADNÍ LOŽISKOVÝ ŠTÍT	64
	PŘÍLOHA Č. 3: KOSTRA MOTORU	64
	PŘÍLOHA Č. 4: ŘEZ MOTORU	65
	PŘÍLOHA Č. 5: VÝKRES- ŘEZ MOTORU	66

Úvod

Asynchronní motor je točivý elektrický stroj, který je složen ze dvou hlavních částí, statoru a rotoru, které jsou odděleny malou vzduchovou mezerou. Stator je pevná část, která je složena ze statorových navzájem od sebe izolovaných plechů tvořících dutý válec a statorového vinutí ke kterému je přiváděn zdroj střídavého proudu. Rotor je pohyblivá část a podle vinutí je rozdělován na rotor s klecí nakrátko, nebo rotor kroužkový. Rotor s klecí nakrátko je používán častěji. Skládá se z plechů kruhového tvaru v nichž jsou po celé délce drážky ve kterých je uloženo vinutí. Vinutí se skládá z masivních tyčí, které je po obou stranách spojeno vodivými kruhy. Vinutí kroužkového motoru je tvořeno izolovaným třífázovým vinutím.

Na stator je připojeno trojfázové střídavé napětí, které vytváří statorové točivé pole, které časovou změnou indukuje napětí na rotoru a jelikož je rotor spojen nakrátko, tak jím prochází proud. Rotorový proud vytváří magnetické pole, které působí na magnetické pole statoru a vznikne síla, která otáčí rotorem.

Asynchronní motor je jednoduchý a spolehlivý. Nevyžaduje žádnou zvláštní údržbu a proto se stal nejpoužívanějším motorem. Rozsah jeho výkonů je od několika wattů až po několik megawattů. Nevýhodou asynchronních motorů s klecí nakrátko je velký rozběhový proud. Tato nevýhoda se dá řešit statorovým spouštěčem, přepínačem hvězda-trojúhelní, speciálními úpravami klece a rozběhovými transformátory.

Seznam symbolů a zkratk

Značka	Název	Jednotky
A	lineární hustota proudu	A . m ⁻¹
a	počet paralelních větví	-
B	magnetická indukce	T
b	šířkový rozměr	m
b ₀	otevření drážky	m
c _l	komplexní činitel rozptylu	-
D	průměr	m
d	průměr	m
f	frekvence	Hz
H	intenzita magnetického pole	A.m ⁻¹
h	výška	m
h _d	hloubka drážek	m
h _m	vzdálenost mezi vrstvami dvouvrstvého vinutí	m
h ₀	výška otevření drážek	m
I	proud	A
I _n	proud při nasycení	A
I ₀	proud naprázdno	A
I(0)	proud asynchronního motoru při synchronních otáčkách	A
I _μ	magnetizační proud	A
J	hustota proudu	A.m ⁻²
K	činitel	-
k	činitel	-
k _c	carterův činitel	-
k _{Fe}	činitel plnění železa	-
k _v	činitel vinutí	-
L	délka indukční čary	m
l	délka	m
l _i	ideální délka stroje	m
l _{Fe}	délka železa stroje	m
M	moment	N.m
m	počet fází stroje	-
m	činitel	-
m	hmotnost	kg
N	počet závitů ve fázi	-
n	otáčky	ot.min ⁻¹

Značka	Název	Jednotky
P	činný výkon	W
P _i	elektromagnetický výkon	W
P ₁	příkon	W
P ₂	výkon na hřídeli	W
p	počet pólových dvojic	-
Δp _{1,0}	měrné ztráty elektromagnetické oceli	W.kg-1
ΔP	ztráty	W
Q	počet drážek	-
R	odpor	Ω
S	plocha	m ²
s	skluz	-
t _d	drážková rozteč	m
t _p	pólová rozteč	m
U	napětí	V
U _i	indukované napětí	V
V	objem	m ³
V	počet vodičů v kotvě	-
V _d	počet vodičů v drážce	-
v	rychlost	m.s-1
X	reaktance	Ω
X _μ	magnetizační reaktance	Ω
X _σ	rozptylová reaktance	Ω
X _μ	magnetizační reaktance	Ω
X _σ	rozptylová reaktance	Ω
x	rozptylová reaktance	Ω
Z	impedance	Ω
α	činitel	-
β	zkrácení kroku	-
β	činitel	-
δ	velikost vzduchové mezery	m
δ _i	tloušťka izolace	m
η	účinnost	-, %
λ	štíhlostní poměr	-
μ	permeabilita	-
ξ	činitel	-
r	rezistivita	Ω. m
r	hustota	kg.m-3
σ	činitel rozptylu	-
Φ	magnetický tok	Wb
ω	úhlová rychlost	rad.s-1

1 Návrh asynchronního motoru

Volba hlavních rozměrů vychází ze základní rovnice. Hlavními rozměry jsou vnitřní průměr statoru a ideální délka vzduchové mezery. Tyto rozměry jsou závislé na výkonu, úhlové rychlosti a elektromagnetickém zatížení. Jejich vztah popisuje strojová konstanta.

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

Kde jednotlivé veličiny jsou:

- D ... vnitřní průměr statoru [m]
- l_i ... ideální délka vzduchové mezery [m]
- ω_s ... úhlová rychlost [rad.s-1]
- P_i ... vnitřní (výpočtový) výkon [W]
- A ... ideální lineární hustota proudu [A.m-1]
- B_δ ... indukce ve vzduchové mezeře [T]
- α_δ ... činitel pólového krytí magnetický
- k_B ... činitel tvaru pole
- k_W ... činitel vinutí

1.1 Volba hlavních rozměrů

V této části navrhne rozměry statoru a rotoru. Počet pólových dvojic, výšky osy, průměry statoru, velikost a tvar statorové a rotorové drážky, počet drážek atp. Správnost návrhu bude později porovávána s kontrolními koeficienty.

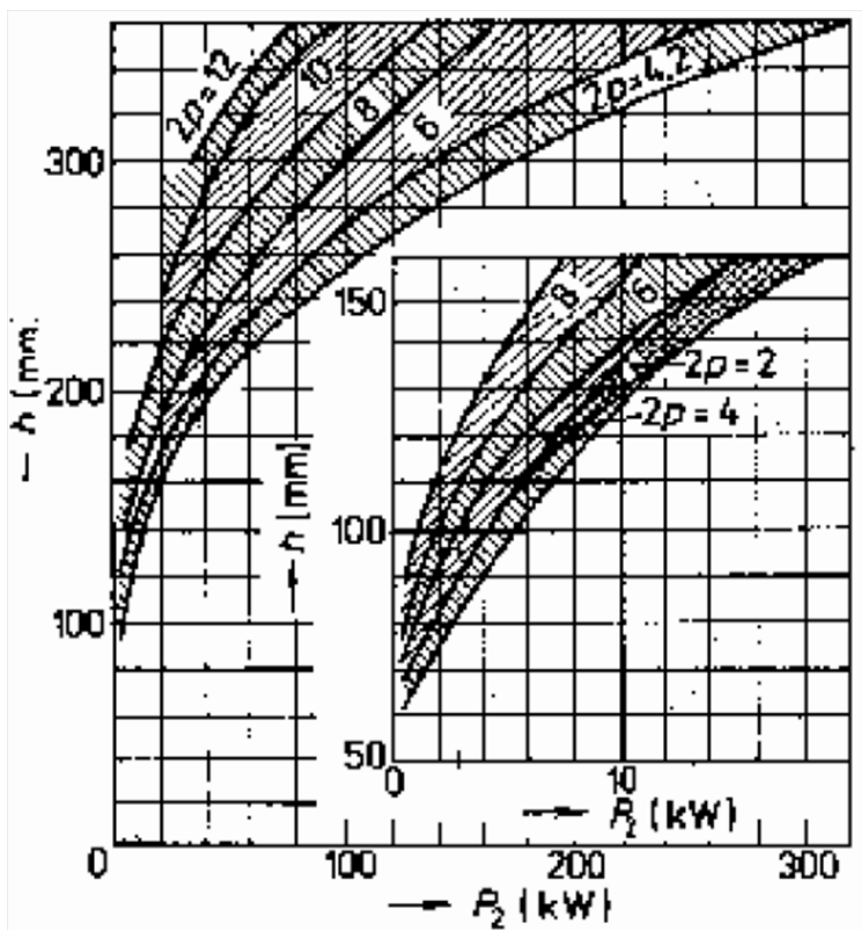
1.1.1 Počet pólových dvojic

$$p = \frac{60 \cdot f}{N_s} = \frac{3000}{750} = 4$$

1.1.2 Předběžná výška osy

Výšku osy určíme z obr. 1.1.2 a dále si vybereme nejbližší nižší hodnotu z tab. 1.1.2.

$h = 180 \text{ mm}$



Obr. 1.1.2 Výška osy asynchronního motoru v závislosti na výkonu a otáčkách

1.1.3 Vnější průměr statoru

Z tabulky 1.1.2 odečteme vnější průměr statoru D_e , který přísluší výšce $h = 180 \text{ mm}$.

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

h (mm)	160	180	200	225	250	280	315	355
D_e (m)	0,272	0,313	0,349	0,392	0,437	0,530	0,590	0,660

Tab. 1.1.2

1.1.4 Vnitřní průměr statoru

Vnitřní průměr statoru může být obecně určen z vnějšího průměru, výšky jha a zubů statoru.

$$D = D_e - (h_{j1} + h_{d1})$$

Některé hodnoty v tomto vzorci jsou však neznámé a tak je použit postup ve kterém se motor srovná s motorem o stejném vnitřním průměru a stejné indukci v magnetickém obvodu. Výška jha statoru je přímo úměrná magnetickému toku a nepřímo úměrná počtu pólů stroje. Jestliže rozměry drážek nezávisí na počtu pólů, dostaneme přibližný vztah

$$D = k_D \cdot D_e$$

Podle tabulky 1.1.4 je doporučeno volit hodnotu $K_D = 0,74 - 0,75$. Je zvolena hodnota $K_D = 0,74$.

2p	2	4	6	8	10 až 12
K_D	0,52 až 0,57	0,62 až 0,68	0,70 až 0,72	0,74 až 0,75	0,75 až 0,77

Tab. 1.1.4 Poměr $K_D = D/D_e$

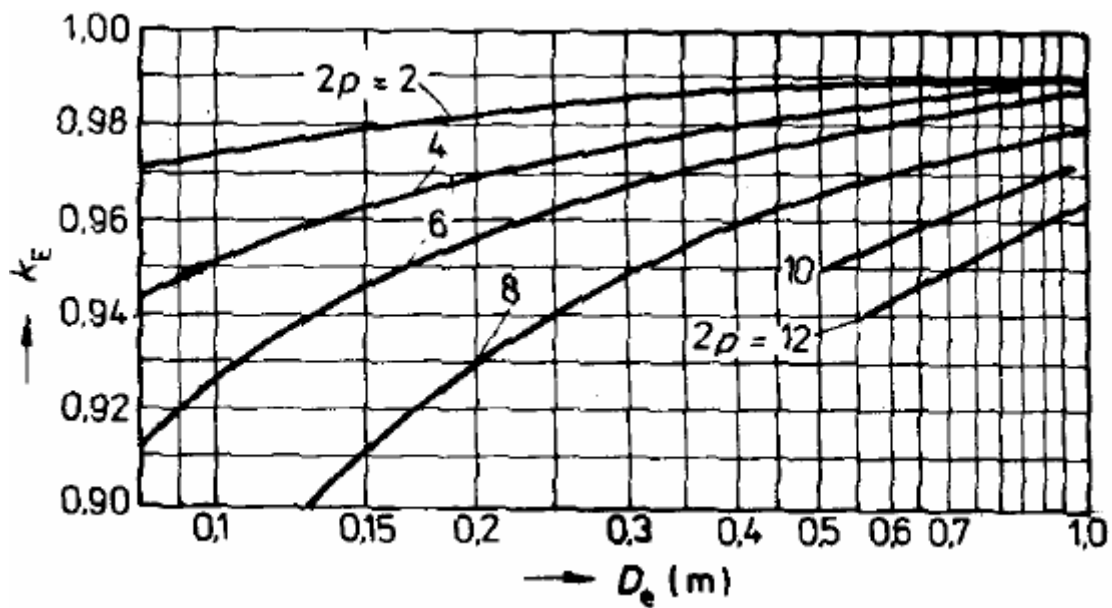
1.1.5 Pólová rozteč

$$t_p = \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot p} = \frac{3,14 \cdot 0,23162}{8} = 0,0909 \text{ m}$$

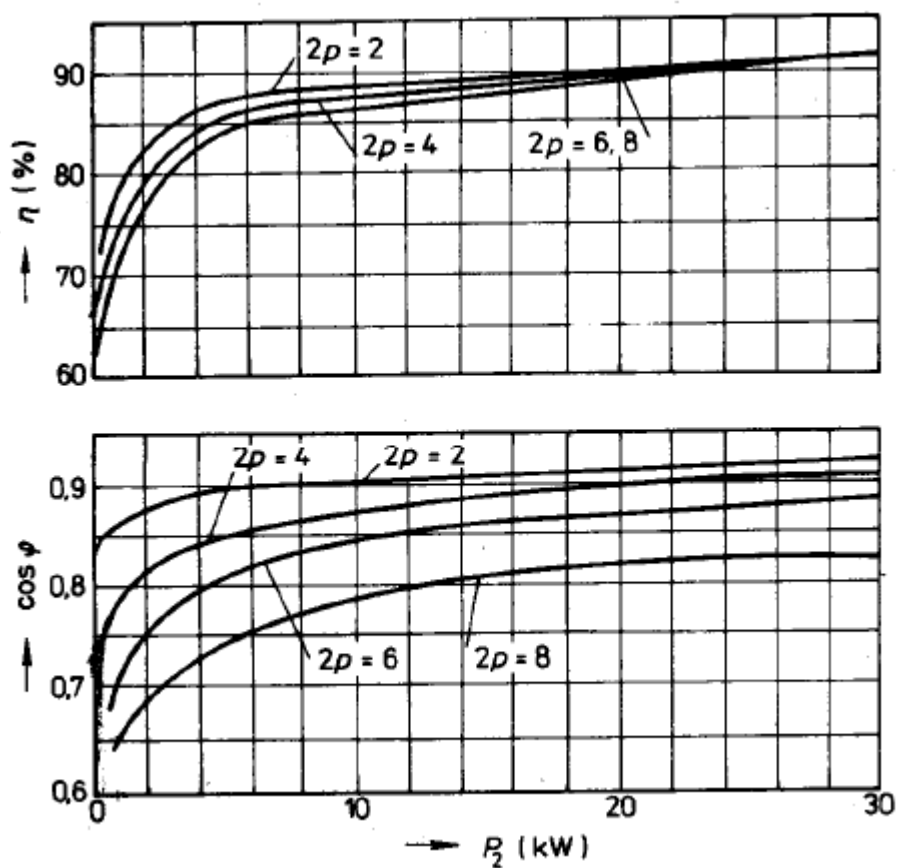
1.1.6 Vnitřní výkon

$$P_i = m \cdot I \cdot U_i = P_2 \cdot \frac{k_e}{\eta \cdot \cos \varphi} = 14000 \cdot \frac{0,95}{0,85 \cdot 0,8} = 19558,823 \text{ W}$$

Koeficient $k_e = 0,95$ je poměr indukovaného napětí statoru k jmenovitému napětí a určí se z obrázku 1.1.6.

Obr. 1.1.6 Hodnoty činitele K_e

Hodnoty $\eta = 0,85$ a $\cos \varphi = 0,8$ jsou odečteny z obrázku 1.1.7.



Obr. 1.1.7 Přibližné hodnoty účinnosti a účiníku asynchronních motorů

1.1.7 Předběžné elektromagnetické zatížení

K výpočtu ideální délky vzduchové mezery musíme určit lineární hustotu proudu A a indukci ve vzduchové mezeře B_δ . Tyto hodnoty jsou nepřesné a v pozdějších krocích budou upřesněny. Tyto hodnoty určíme z obrázku 6.12. z (Kopylov, 1988)

$$A = 35 \cdot 10^3 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$$

$$\beta_\delta = 0,83 \text{ T}$$

1.1.8 Hodnoty činitelů α_δ , k_B a k_{V1}

Činitel pólového krytí α_δ a činitel tvaru pole k_B jsou u asynchronních strojů dány zploštěním křivky pole ve vzduchové mezeře způsobeném nasycením zubů statoru a rotoru. Tento výpočet je pouze předběžný. Přesně mohou být spočteny až po spočítání magnetického obvodu. Činitel k_{V1} je u jednovrstvých vinutí v rozmezí 0,95-0,96

$$\alpha_\delta = \frac{\pi}{2} = 0,64$$

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

Je zvoleno $k_{V1} = 0,95$

1.1.9 Synchronní úhlová rychlost hřídele

$$\omega_s = 2 \cdot \pi \cdot \frac{N_s}{60} = 6,28 \frac{750}{60} = 78,5 \text{ rad/s}$$

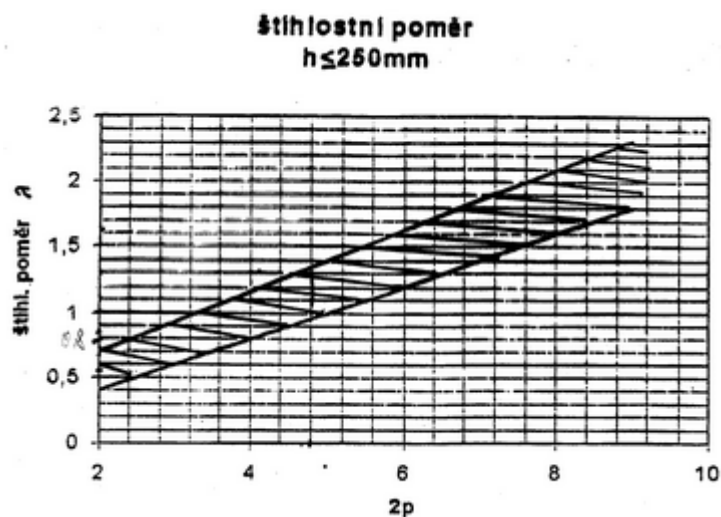
1.1.10 Ideální délka vzduchové mezery

$$l_i = \frac{P_i}{A \cdot \omega_s \cdot D^2 \cdot k_B \cdot k_{V1} \cdot \beta_\delta} = \frac{19558,823}{3,5 \cdot 10^3 \cdot 78,5 \cdot 0,23612^2 \cdot 1,1 \cdot 0,95 \cdot 0,83} = 0,153 \text{ m}$$

1.1.11 Štíhlostní poměr

Kritérium správnosti hlavních rozměrů je štíhlostní poměr, který je dán vztahem

$$\alpha = \frac{l_i}{t_p} = \frac{0,153}{0,0909} = 1,68 \text{ a pohybovat by se měl v rozmezí podle obrázku 1.1.11.}$$



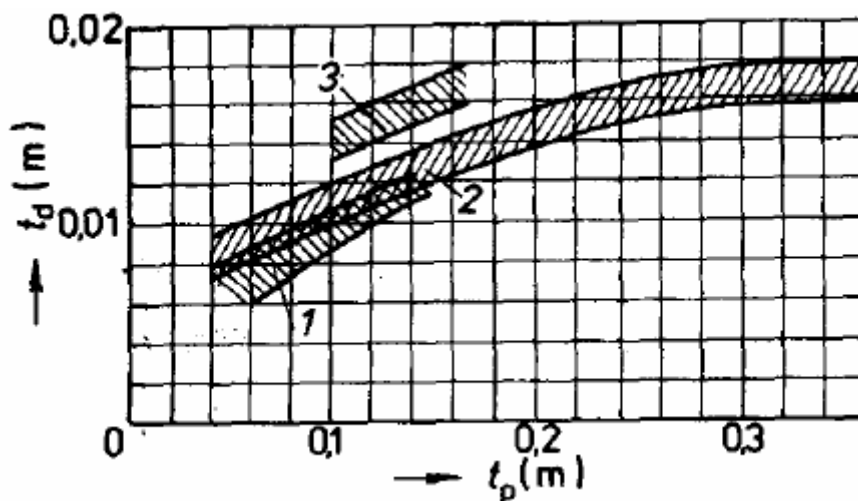
Obr. 1.1.11 Štíhlostní poměr

1.2 Návrh statorového vinutí a drážek

V následujících bodech bude určen počet drážek, počet závitů, průřez vodiče statorového vinutí. V těchto krocích bude také přesněji určena lineární hustota proudu a magnetická indukce ve vzduchové mezeře. Tyto dvě hodnoty poslouží pro kontrolu správnosti výpočtu. Počet drážek musí být zvolen tak, aby zajišťoval rovnoměrné rozložení vinutí

1.2.1 Drážková rozteč

Drážková rozteč t_{d1} je zvolena podle typu vinutí, jmenovitého napětí a pólové rozteče stroje. S větším počtem drážek je vinutí rozloženo rovnoměrněji, ale roste cena stroje. Z obrázku 1.2.1 je odečtena mezní drážkové rozteče. Důležitá je oblast 2, která je pro stroje s výškou $160 < h \leq 250$.



Obr. 1.2.1 Drážkové rozteče statoru se vsypávaným vinutím

$$t_{d1min} = 0,0099 \text{ m}$$

$$t_{d1max} = 0,0114 \text{ m}$$

1.2.2 Počet drážek statoru

Počet drážek statoru vychází z drážkové rozteče. Určím si rozmezí drážek a z toho si určím konečný počet statorových drážek Q_1 . Tato hodnota musí být celé číslo, dělitelná počtem fází a počet drážek na pól a fázi musí být pro většinu asynchronních strojů celé číslo.

$$Q_{1max} = \frac{\pi \cdot D_i}{t_{d1max}} = \frac{\pi \cdot 0,23162}{0,0114} = 61,147$$

$$Q_{1min} = \frac{\pi \cdot D_i}{t_{d1min}} = \frac{\pi \cdot 0,23162}{0,0099} = 73,451$$

Volím si $Q_1 = 72$ drážek

1.2.3 Počet drážek na pól a fázi

$$q = \frac{Q_1}{2 \cdot p \cdot m} = \frac{72}{2 \cdot 4 \cdot 3} = 3$$

1.2.4 Drážková rozteč

Konečná hodnota drážkové rozteče se nesmí vychylovat z udaného rozmezí o více než 10 procent. U motorů s $h \geq 56$ mm nesmí být menší než 7 mm.

$$t_{d1} = \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot p \cdot m \cdot q} = \frac{\pi \cdot 0,23162}{2 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 3} = 0,01010 \text{ m}$$

1.2.5 Počet vodičů v drážce

Počet efektivních vodičů v drážce V_d by měl být celé číslo. U dvouvrstvých vinutí je dobré, aby číslo bylo dělitelné dvěma. Počet efektivních vodičů v drážce je získán výpočtem a proto je následně zaokrouhlen na celé číslo. Aby zaokrouhlení nebylo moc velké, je nejdříve spočten předběžný počet vodičů v drážce V'_d pro počet paralelních větví $a = 1$ a hodnota V_d lze upravit za pomoci paralelní větve.

$$I_{1N} = \frac{P}{m \cdot U_{1N} \cdot \eta \cdot \cos \varphi} = \frac{14\,000}{3 \cdot 230 \cdot 0,8 \cdot 0,85} = 29,838 \text{ A}$$

$$V'_d = \frac{\pi \cdot D \cdot A}{I_{1N} \cdot Q_1} = \frac{\pi \cdot 0,23162 \cdot 35 \cdot 10^3}{29,838 \cdot 72} = 11,854$$

$$V_d = a \cdot V'_d = 1 \cdot 11,854 \approx 12$$

1.2.6 Konečný počet závitů ve fázi vinutí

$$N_1 = \frac{V_d \cdot Q_1}{2 \cdot a \cdot m} = \frac{12 \cdot 72}{2 \cdot 1 \cdot 3} = 144$$

1.2.7 Konečná lineární hustota proudu

Tato hodnota se má nepatrně lišit od hodnoty dříve zvolené.

$$A = \frac{2 \cdot m \cdot N_1 \cdot I_{1N}}{\pi \cdot D} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 144 \cdot 29,838}{\pi \cdot 0,23162} = 35428,888 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$$

1.2.8 Činitel vinutí statoru

Typ statorového vinutí se vždy volí podle výkonu a konstrukce stroje. U malých strojů do 15 kW bývá vinutí jednovrstvé soustředné. Činitel vinutí se spočítá podle vztahu $k_{V1} = k_r \cdot k_y$. Koeficient k_y je vždy u jednovrstvých vinutí roven jedné.

1.2.8.1 Činitel rozlohy

$$k_r = \frac{0,5}{q \cdot \sin \frac{30}{q}} = \frac{0,5}{3 \cdot \sin \frac{30}{3}} = 0,958$$

$$k_{V1} = k_r \cdot k_y = 0,958 \cdot 1 = 0,958$$

1.2.9 Magnetická indukce ve vzduchové mezeře

1.2.9.1 Magnetický tok

$$\Phi = \frac{k_e \cdot U_{1N}}{4 \cdot k_B \cdot N_1 \cdot k_{V1} \cdot f} = \frac{0,951 \cdot 230}{4 \cdot 1,11 \cdot 144 \cdot 0,958 \cdot 50} = 7,134 \cdot 10^{-3} \text{ Wb}$$

V následujícím kroku spočítáme magnetickou indukci, která musí být v rozmezí daném obrázkem 1.2.9. Od obrázku se může vychýlit maximálně o 5%.

$$\beta_\delta = \frac{p \cdot \Phi}{D_i \cdot l_i} = \frac{4 \cdot 7,134 \cdot 10^{-3}}{0,23162 \cdot 0,153} = 0,805 \text{ T}$$

1.2.9.2 Předběžné určení hustoty proudu ve statorovém vinutí

Součinitel ($A \cdot J$) určím z obrázku 6.16 v (Kopylov, 1988). $A \cdot J = 245 \cdot 10^9 \text{ A}^2 \cdot \text{m}^{-3}$.

$$J_1 = \frac{A \cdot J}{A} = \frac{245 \cdot 10^9}{35428,888} = 6,91 \cdot 10^6 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$$

1.3 Průřez vodiče

1.3.1 Předběžná proudová hustota

Proudová hustota by měla být volena co největší, aby se maximálně využili aktivní materiály. S rostoucí hustotou rostou i ztráty ve vinutí projevující se oteplením vinutí.

$$J_1 = \frac{A \cdot J}{A} = \frac{245 \cdot 10^9}{35428,888} = 6,91 \cdot 10^6 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$$

1.3.2 Průřez efektivního vodiče

Pro vsypávaná vinutí se používají dráty do průměru 1,8 mm. Tato hranice se snižuje a tím se zvyšuje spolehlivost a zjednodušuje se technologie. Pro strojní navíjení se používají dráty do průměru 1,4 mm a pro ruční navíjení dráty do průměru 1,7 mm.

$$S_{ef} = \frac{I_{1N}}{a \cdot J_1} = \frac{29,838}{1 \cdot 6,91 \cdot 10^6} = 4,31 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$$

Volím počet dílků vodičů $n_p = 3$

$$S_{ef} = \frac{I_{1N}}{a \cdot J_1} = \frac{29,838}{1 \cdot 6,91 \cdot 10^6 \cdot 3} = 1,439 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$$

1.3.2.1 Volba vodiče

Z tabulky D3.1 z (Kopylov, 1988) jsem si zvolil vodič a oboustranný izolační přírůstek.

$$S_V = 1,227 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$$

$$d_V = 1,25 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$d_i = 0,14 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$d_{Vi} = d_V + d_i = 1,25 \cdot 10^{-3} + 0,14 \cdot 10^{-3} = 1,39 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$S_{ef} = 1,39 \cdot 10^{-3} \cdot 3 = 4,17 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

1.3.3 Proudová hustota

$$J = \frac{I_{1N}}{S_V \cdot a \cdot n_p} = \frac{29,838}{1,227 \cdot 10^{-6} \cdot 1 \cdot 3} = 8,1 \cdot 10^{-6} \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$$

1.4 Rozměry drážek a zubů statoru

Rozměry drážek musí být voleny s ohledem na počet a rozměr vodičů v ní uložených. Je třeba počítat s izolací. Hodnoty magnetických indukcí v zubech a jhu statoru se musí nacházet v daných mezích. Zvolil jsem drážku typu **L**, která má stejnou šířku po celé výšce.

1.4.1 Výška jha statoru

$$h_{j1} = \frac{\phi}{2 \cdot B_{j1} \cdot l_{Fe1} \cdot k_{Fe}} = \frac{7,134 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 1,3 \cdot 0,153 \cdot 0,97} = 18,48 \cdot 10^{-3} \text{ [m]}$$

Dovolená indukce B_{j1} se určí z tabulky 6.10 z (Kopylov, 1988). $B_{j1} = 1,15 - 1,35 \text{ T}$.
Volím $B_{j1} = 1,30 \text{ T}$.

1.4.2 Činitel plnění železa

Činitel plnění železa k_{Fe} se určí z tabulky 1.4.2 a pro $h = 50$ až 250 mm je $k_{Fe} = 0,97$.

h (mm)	U (V)	Stator		Rotor nakrátko		Rotor kroužkový	
		způsob izolace	k_{Fe}	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	vrstva oxidu	0,97	lakování	0,95
400 až 560	6000	lakování	0,95	lakování	0,95	lakování	0,95

Tab. 1.4.2 Doporučené způsoby izolace plechů a činitel plnění železa k_{Fe}

1.4.3 Délka jha statoru

$$l_i = l_{Fe} = 0,153 \text{ m}$$

1.4.4 Předběžná šířka zubu

Dovolená indukce v zubech statoru s rovnoběžnými stěnami B_{Z1} je dána tabulkou 6.10 z (Kopylov, 1988).

$$B_{Z1} = 1,8 - 2 \text{ T}$$

$$\text{Volím } B_{Z1} = 1,8 \text{ T}$$

$$b_{Z1} = \frac{B_\delta \cdot t_{d1} \cdot l_i}{B_{Z1} \cdot l_{Fe} \cdot k_{Fe}} = \frac{0,805 \cdot 0,0101 \cdot 0,153}{1,8 \cdot 0,153 \cdot 0,97} = 4,65 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

1.4.5 Hloubka drážek

$$h_d = \frac{D_e - D_i}{2} - h_{j1} = \frac{0,313 - 0,23162}{2} - 18,48 \cdot 10^{-3} = 0,022 \text{ T}$$

1.4.6 Šířka drážky u paty zubu

$$b_1 = \frac{\pi \cdot (D_i + 2 \cdot h_d)}{Q_1} - b_{Z1} = \frac{\pi \cdot (0,23162 + 2 \cdot 0,022)}{72} - 4,65 \cdot 10^{-3} = 7,37 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

1.4.7 Šířka drážky v horní části

Podle tabulky D 4.1 v (Kopylov, 1988) jsem určil otevření drážky $b_0 = 2,8 \text{ mm}$, $h_0 = 0,5 \text{ mm}$.

$$\begin{aligned} b_2 &= \frac{\pi \cdot (D_i + 2 \cdot h_0 - b_0) - Q_1 \cdot b_{Z1}}{Q_1} = \\ &= \frac{\pi \cdot (0,23162 + 2 \cdot 0,5 - 2,8 \cdot 10^{-3}) - 72 \cdot 4,65 \cdot 10^{-3}}{72} = 5,6 \cdot 10^{-3} \text{ m} \end{aligned}$$

1.4.8 Aktivní hloubka drážek

$$h_1 = h_d - \left(h_0 + \frac{b_2 - b_0}{2} \right) = 0,022 - \left(0,5 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{5,6 \cdot 10^{-3} - 2,8 \cdot 10^{-3}}{2} \right)$$

$$= 21,99 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

1.4.9 Celková hloubka drážky

$$h_{d1} = h_1 + h_0 + \frac{b_2 - b_0}{2} = 21,99 \cdot 10^{-3} + 0,5 \cdot 10^{-3} + \frac{5,6 \cdot 10^{-3} - 2,8 \cdot 10^{-3}}{2}$$

$$= 21,58 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

1.4.10 Rozměry drážek

K rozměrům drážky je třeba připočítat přídavek na skládání plechů $\Delta b_d, \Delta h_d$. Tyto parametry jsou v tabulce 1.4.10.

výška osy h (mm)	Přídavky (mm)	
	na šířku Δb_d	na výšku Δh_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 1.4.10. Přídavky $\Delta b_d, \Delta h_d$

$$\Delta b_d = 0,0002 \text{ m}$$

$$\Delta h_d = 0,0002 \text{ m}$$

$$b'_2 = b_2 - \Delta b_d = 5,6 \cdot 10^{-3} - 0,0002 = 5,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$b'_1 = b_1 - \Delta b_d = 7,37 \cdot 10^{-3} - 0,0002 = 7,17 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$h'_1 = h_1 - \Delta h_d = 21,99 \cdot 10^{-3} - 0,0002 = 21,79 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

1.4.11 Plocha, kterou zaujímá drážková izolace

$$S_i = b_i \cdot (2 \cdot h_{d1} + b_1 + b_2) = 0,4 \cdot 10^{-3} \cdot (2 \cdot 21,58 \cdot 10^{-3} + 7,37 \cdot 10^{-3} + 5,6 \cdot 10^{-3}) \\ = 22,566 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$$

$b_i = 0,4 \text{ mm}$ jednostranná tloušťka izolace určená z tabulky 3.8 v (Kopylov, 1988).

1.4.12 Činitel plnění drážky

Činitel plnění drážky je kontrolní veličinou správnosti výpočtu rozměru drážky. Hodnota by se měla pohybovat v rozmezích podle tabulky 1.4.12. Jestliže je činitel plnění drážky menší, je třeba zmenšit plochu drážky na úkor výšky jha h_{j1} , nebo šířky zubu b_{z1} , nebo obou rozměrů současně. Indukce v zubech statoru a ve jhu se zmenší. Jestli se zmenší pod určitou hranici, hlavní rozměry jsou příliš velké a aktivní železo je nevyužito.

Plocha vložek

Plocha vložek S_{v1} je pro jednovrstvá vinutí je rovna nule.

$$k_T = \frac{d_{vi}^2 \cdot V_d \cdot n_p}{S'_d} = \frac{(1,39 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 12 \cdot 3}{98,2 \cdot 10^{-6}} = 0,71$$

$$S'_d = \frac{b'_1 + b'_2}{2} \cdot h'_1 - S_i - S_{v1} = \frac{7,17 \cdot 10^{-3} + 5,4 \cdot 10^{-3}}{2} \cdot 21,79 \cdot 10^{-3} - 22,566 \cdot 10^{-6} - 0 \\ = 114,38 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$$

Typ vinutí	Hodnoty činitelů	
	k_T	k_{dr}
Vsypávaná vinutí z lakovaného drátu kruhového průřezu na napětí do 660 V	0,72	0,3
Vinutí z vodiče pravoúhlého průřezu na napětí 3000 V	0,70 až 0,80	0,22 až 0,37
Vinutí z vodiče pravoúhlého průřezu na napětí 6000 V	0,60 až 0,70	0,14 až 0,25

Tab 1.4.12 Střední hodnoty činitelů plnění drážky

Hodnota činitele k_T se mírně liší od hodnoty v tabulce 1.4.12., což je dáno především zaokrouhlováním. Pro strojní navíjení může být hodnota v rozmezí 0,7-0,72.

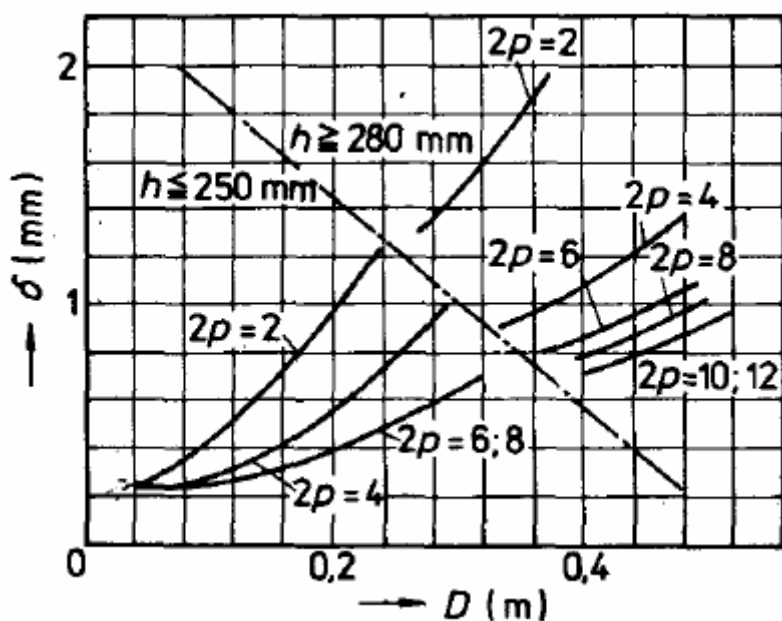
1.5 Volba vzduchové mezery

S klesající velikostí vzduchové mezery klesá i magnetické napětí a magnetický proud. Tím dochází ke zvětšení účinníku a zmenšení ztrát ve vinutí. Nadměrné zmenšení vzduchové mezery vede k nárůstu pulsací indukce ve vzduchové mezeře a tím k nárůstu povrchových a pulzních ztrát. Při výpočtu vzduchové mezery jsem vycházel z empirických vzorců.

Pro $2p \geq 4$

$$\delta \approx (0,25 + D) \cdot 10^{-3} = (0,25 + 0,23162) \cdot 10^{-3} \approx 0,48 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Velikost vzduchové mezery lze také určit z obrázku 1.5.



Obr. 1.5 Velikost vzduchové mezery v závislosti na vnitřním průměru statoru

1.6 Návrh rotoru nakrátko

Rotorová vinutí nemají určitý počet pólů a fází. Rotor lze tedy použít v motorech, jejichž statory jsou navrženy na různé počty pólů. To umožňuje použít rotor nakrátko v motorech s řízením otáček přepínáním počtu pólových dvojic statorového vinutí.

Důležité je dát si pozor na volbu počtu drážek rotoru, protože pole vzduchové mezery obsahuje kromě základní harmonické i celou řadu vyšších harmonických, z nichž každá indukuje napětí v rotorovém vinutí. Proud v tyčích vinutí potom obsahuje velký počet vyšších harmonických.

1.6.1 Volba počtu drážek

Asynchronní motory mívají většinou počet drážek rotoru menší, než počet drážek statoru $Q_2 < Q_1$. Má to mnoho technologických výhod. S růstem Q_2 klesá proud v tyčích rotoru, zároveň se omezují asynchronní momenty od vyšších harmonických. Počet drážek rotoru je volen z rozsahu hodnot, který je dán empirickým vzorcem.

$$Q_2 = Q_1 \pm 4 \cdot p = 72 \pm 4 \cdot 4 = 56 - 88.$$

Podle doporučených počtů popsanych v tabulce 6.15. str. 226 v (Kopylov, 1988) jsem zvolil $Q_2 = 56$

1.6.2 Výpočet rozměrů

1.6.2.1 Vnější průměr rotoru

$$D_2 = D - 2 \cdot \delta = 0,23162 - 2 \cdot 0,48 \cdot 10^{-3} = 0,23066 \text{ m}$$

1.6.2.2 Délka rotoru

$$l_2 = l_i = l_{Fe} = 0,153 \text{ m}$$

1.6.2.3 Drážková rozteč

$$t_{d2} = \frac{\pi \cdot D_2}{Q_2} = \frac{\pi \cdot 0,23066}{56} = 0,0129 \text{ m}$$

1.6.2.4 Vnitřní průměr rotoru

Vnitřní průměr rotorového svazku D_{i2} je při přímém uložení svazku na hřídel roven průměru hřídele D_h a lze jej určit ze vztahu $D_{i2} = D_h = k_h \cdot D_e$.

Hodnoty činitele k_h pro výpočet průměru rotoru jsou uvedeny v tabulce 1.6.2.4.

h (m)	50 až 63	71 až 250	280 až 355		400 až 500		
2p	2 až 6	2 až 8	2	4 až 12	4	6	8 až 12
k_h	0,19	0,23	0,22	0,23	0,20	0,23	0,25

Tab. 1.6.2.4 Hodnoty činitele k_h

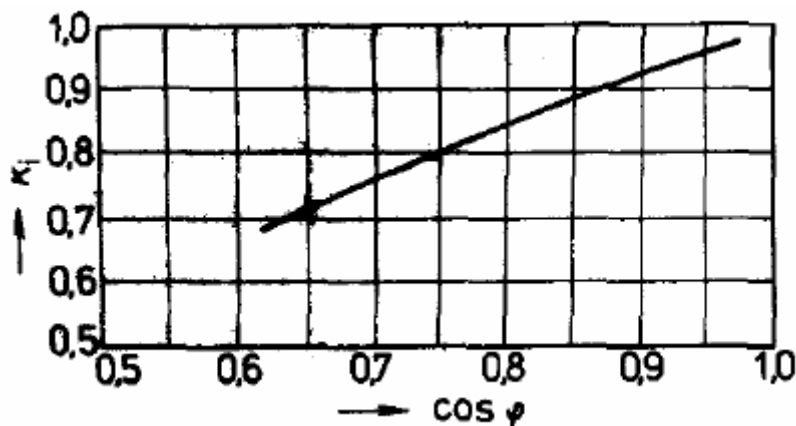
$$k_h = 0,23$$

$$D_{i2} = D_h = k_h \cdot D_e = 0,23 \cdot 0,313 = 0,072 \text{ m}$$

1.6.3 Proud v tyči rotoru

$$I_{2t} = I_2 = I_{1N} \cdot k_i \cdot p_i = 29,838 \cdot 0,95 \cdot 14,78 = 418,97 \text{ A}$$

Velikost činitele k_i se určí z obrázku 1.6.3 a je roven $k_i = 0,95$.



Obr. 1.6.3 Hodnoty činitele k_i

Činitel přepočtu proudu p_i je dán vztahem

$$p_i = \frac{2 \cdot m_1 \cdot N_1 \cdot k_{v1}}{Q_2} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 144 \cdot 0,958}{56} = 14,78$$

1.6.4 Průřez tyče

Proudová hustota J_2 v tyčích rotoru u strojů zavřených s ofukováním povrchu a hliníkovým odlévaným vinutím se volí v rozmezí $(2,5 \cdot 10^6 - 3,5 \cdot 10^6) A \cdot m^{-2}$.

$$\text{Volím } J_2 = 3,5 \cdot 10^6 A \cdot m^{-2}$$

Příčný průřez tyče je dán vztahem

$$S_t = \frac{I_2}{J_2} = \frac{418,97}{3,5 \cdot 10^6} = 119,7 \cdot 10^{-6} m^2$$

1.6.5 Výpočet rotorové drážky

V asynchronních motorech nakrátko s výškou osy $h < 160 \text{ mm až } 250 \text{ mm} >$ se používají zavřené drážky s rozměry $b_0 = 1,5 \text{ mm}$, $h_0 = 0,7 \text{ mm}$, $h'_0 = 0,3 \text{ mm}$

1.6.5.1 Dovolená šířka zubu

$$b_{z2dov} = \frac{B_\delta \cdot t_{d2} \cdot l_i}{B_{z2} \cdot l_{Fe2} \cdot k_{Fe}} = \frac{0,805 \cdot 0,0129 \cdot 0,153}{1,8 \cdot 0,153 \cdot 0,97} = 5,95 \cdot 10^{-3} [m]$$

Dovolená magnetická indukce v zubech rotoru v zubech rotoru s rovnoběžnými stěnami $B_{z2} = 1,8 \text{ T}$ se určí z tabulky 6.10 z (Kopylov, 1988).

1.6.5.2 Průměr zaoblení horní části

$$\begin{aligned}
 b_1 &= \frac{\pi \cdot (D_2 - 2 \cdot h_0 - 2 \cdot h'_0) - Q_2 \cdot b_{z2}}{\pi + Q_2} \\
 &= \frac{\pi \cdot (0,23066 - 2 \cdot 0,0007 - 2 \cdot 0,0003) - 56 \cdot 5,95 \cdot 10^{-3}}{\pi + 56} \\
 &= 6,51 \cdot 10^{-3} \text{ m}
 \end{aligned}$$

1.6.5.3 Průměr zaoblení dolní části

$$\begin{aligned}
 b_2 &= \sqrt{\frac{b_1^2 \cdot \left(\frac{Q_2}{\pi} + \frac{\pi}{2}\right) - 4 \cdot S_t}{\frac{Q_2}{\pi} - \frac{\pi}{2}}} = \sqrt{\frac{(6,51 \cdot 10^{-3})^2 \cdot \left(\frac{56}{\pi} + \frac{\pi}{2}\right) - 4 \cdot 119,7 \cdot 10^{-6}}{\frac{56}{\pi} - \frac{\pi}{2}}} \\
 &= 4,59 \cdot 10^{-3} \text{ m}
 \end{aligned}$$

1.6.5.4 Vzdálenost mezi středy zaoblení

$$h_1 = (b_1 - b_2) \cdot \frac{Q_2}{2 \cdot \pi} = (6,51 \cdot 10^{-3} - 4,59 \cdot 10^{-3}) \cdot \frac{56}{2 \cdot \pi} = 17,11 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

1.6.5.5 Celková hloubka drážek

$$\begin{aligned}
 h_{d2} &= h'_0 + h_0 + \frac{b_1}{2} + h_1 + \frac{b_2}{2} \\
 &= 0,0003 + 0,0007 + \frac{6,51 \cdot 10^{-3}}{2} + 17,11 \cdot 10^{-3} + \frac{4,59 \cdot 10^{-3}}{2} \\
 &= 23,55 \cdot 10^{-3} \text{ m}
 \end{aligned}$$

1.6.5.6 Průřez tyče

$$\begin{aligned}
 S_t &= \frac{\pi}{8} (b_1^2 + b_2^2) + 0,5 \cdot (b_1 + b_2) \cdot h_1 \\
 &= \frac{\pi}{8} \cdot \{(6,51 \cdot 10^{-3})^2 + (4,59 \cdot 10^{-3})^2\} + 0,5 \cdot (6,51 \cdot 10^{-3} + 4,59 \cdot 10^{-3}) \\
 &\quad \cdot 17,11 \cdot 10^{-3} = 119,83 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2
 \end{aligned}$$

1.6.5.7 Hustota proudu v tyčích

$$J_t = \frac{I_2}{S_t} = \frac{418,97}{119,83 \cdot 10^{-6}} = 3,49 \cdot 10^6 \text{ A} \cdot \text{m}^2$$

1.6.6 Výpočet kruhu nakrátko

1.6.6.1 Proud v kruhu nakrátko

$$\begin{aligned}
 I_{kn} &= \frac{I_2}{\Delta} = \frac{418,97}{0,445} = 941,505 \text{ A} \cdot \text{m}^2 \\
 \Delta &= 2 \cdot \sin \frac{\pi \cdot p}{Q_2} = 2 \cdot \sin \frac{\pi \cdot 4}{56} = 0,445
 \end{aligned}$$

1.6.6.2 Hustota proudu v kruhu nakrátko

Hustota proudu v kruzích nakrátko se volí v průměru o 15 až 20 % menší než hustota v tyčích. Kruhy nakrátko tak lépe odvádějí teplo a dochází ke zlepšení rozběhové charakteristiky.

$$J_{kn} = 0,85 \cdot J_t = 0,85 \cdot 3,49 \cdot 10^6 = 2,9 \cdot 10^6 \text{ A} \cdot \text{m}^2$$

1.6.6.3 Předběžný příčný průřez kruhů nakrátko

$$S'_{kn} = \frac{I_{kn}}{J_{kn}} = \frac{941,505}{2,9 \cdot 10^6} = 324,65 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$$

1.6.6.4 Rozměry kruhu nakrátko

Obvyklý tvar kruhů nakrátko bývá nepravidelný lichoběžník, který jednou základnou přiléhá k čelu rotorového svazku. Střední výška kruhu obvykle bývá $a_{kn} \geq 1,2 \cdot h_{d2}$.

Na kruzích jsou současně odlévány ventilační lopatky. Jejich počet bývá 2 až 3krát menší než počet rotorových drážek.

$$b_{kn} = 1,25 \cdot h_{d2} = 1,25 \cdot 23,55 \cdot 10^{-3} = 29,44 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$a_{kn} = \frac{S'_{kn}}{b_{kn}} = \frac{324,65 \cdot 10^{-6}}{29,44 \cdot 10^{-3}} = 11,02 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$D_{kn} = D_2 - b_{kn} = 0,23066 - 29,44 \cdot 10^{-3} = 0,19671 \text{ m}$$

$$S_{kn} = a_{kn} \cdot b_{kn} = 11,02 \cdot 10^{-3} \cdot 29,44 \cdot 10^{-3} = 324,42 \text{ m}$$

1.6.7 Výpočet magnetického obvodu

Magnetický obvod stroje se počítá pro chod naprázdno, v němž je pro asynchronní stroje typické silné nasycení zubů statoru a rotoru.

1.6.7.1 Indukce v zubu statoru

$$B_{z1} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{d1} \cdot l_i}{b_{z1} \cdot l_{Fe1} \cdot k_{Fe}} = \frac{0,805 \cdot 0,0101 \cdot 0,153}{4,65 \cdot 10^{-3} \cdot 0,153 \cdot 0,97} = 1,95 \text{ T}$$

1.6.7.2 Indukce v zubu rotoru

$$B_{z2} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{d2} \cdot l_i}{b_{z2} \cdot l_{Fe1} \cdot k_{Fe}} = \frac{0,805 \cdot 0,0129 \cdot 0,153}{5,95 \cdot 10^{-3} \cdot 0,153 \cdot 0,97} = 1,8 \text{ T}$$

1.6.7.3 Indukce ve jhu statoru

Stator nemá axiální kanály a proto $d_{vk1} = 0$, $m_{vl1} = 0$

$$B_{j1} = \frac{\Phi}{2 \cdot h'_{j1} \cdot l_{Fe} \cdot k_{Fe}} = \frac{7,134 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 0,0194 \cdot 0,153 \cdot 0,97} = 1,4 \text{ T}$$

$$h'_{j1} = \frac{D_e - D_i}{2} - h_{d1} - \frac{2}{3} \cdot d_{vk1} \cdot m_{vl1} = \frac{0,313 - 0,23162}{2} - 21,58 \cdot 10^{-3} = 0,0191 \text{ m}$$

1.6.7.4 Indukce ve jhu rotoru

Rotor nemá axiální kanály a proto $d_{vk2} = 0$, $m_{vl2} = 0$

$$B_{j2} = \frac{\Phi}{2 \cdot h'_{j2} \cdot l_{Fe} \cdot k_{Fe}} = \frac{7,134 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 0,041 \cdot 0,153 \cdot 0,97} = 0,66 \text{ T}$$

$$h'_{j2} = \frac{2+p}{3,2 \cdot p} \cdot \left(\frac{D_2}{2} - h_{d2} \right) - \frac{2}{3} \cdot d_{vk1} \cdot m_{vl1} = \frac{2+4}{3,2 \cdot 4} \cdot \left(\frac{0,23066}{2} - 23,55 \cdot 10^{-3} \right) = 0,043 \text{ m}$$

1.6.8 Velikost magnetických napětí

1.6.8.1 Carterův činitel

$$k_c = \frac{t_{d1}}{t_{d1} - \gamma \cdot \delta} = \frac{0,0101}{0,0101 - 4,67 \cdot 0,48 \cdot 10^{-3}} = 1,285$$

$$\gamma = \frac{\left(\frac{b_0}{\delta} \right)^2}{5 + \frac{b_0}{\delta}} = \frac{\left(\frac{0,0037}{0,48 \cdot 10^{-3}} \right)^2}{5 + \frac{0,0037}{0,48 \cdot 10^{-3}}} = 4,67$$

1.6.8.2 Magnetické napětí vzduchové mezery

$$U_{\delta} = 1,59 \cdot 10^6 \cdot B_{\delta} \cdot \delta \cdot k_c = 1,59 \cdot 10^6 \cdot 0,805 \cdot 0,48 \cdot 10^{-3} \cdot 1,285 = 789,47 \text{ A}$$

1.6.8.3 Magnetické napětí zuby statoru

$$U_{z1} = 2 \cdot h_{z1} \cdot H_{z1} = 2 \cdot 21,59 \cdot 10^{-3} \cdot 2610 = 112,69 \text{ A}$$

$$H_{z1} = 1520 \text{ z tabulky D 2.7 (Kopylov, 1988) při } B_{z1} = 1,95 \text{ T}$$

1.6.8.4 Magnetické napětí zuby rotoru

$$U_{z2} = 2 \cdot h_{z2} \cdot H_{z2} = 2 \cdot 23,55 \cdot 10^{-3} \cdot 1520 = 71,59 \text{ A}$$

$$H_{z2} = 1520 \text{ z tabulky D 2.7 (Kopylov, 1988) při } B_{z2} = 1,8 \text{ T}$$

1.6.8.5 Činitel syčení zubů

$$k_z = 1 + \frac{U_{z1} + U_{z2}}{U_{\delta}} = 1 + \frac{112,69 + 71,59}{789,47} = 1,232$$

Činitel nasycení zubů slouží jako předběžná kontrola správnosti výpočtu. Jestliže je $k_z \geq 1,6$, je nasycení zubů nadměrné. Když je naopak $k_z \leq 1,2$, železo zubů je nevyužito a nebo je vzduchová mezera příliš veliká. Jestliže nastal jeden z případů, je nutné výpočet upravit.

1.6.8.6 Magnetické napětí jha statoru

Nejdříve je nutné spočítat a odečíst pomocné parametry. l_{j1} je délka střední magnetické indukční čáry ve jhu statoru, H_{j1} je intenzita magnetického pole, která se určí z tabulky D2.6 z (Kopylov, 1988).

$$U_{j1} = l_{j1} \cdot H_{j1} = 0,114 \cdot 400 = 45,86 \text{ A}$$

$$l_{j1} = \frac{\pi \cdot (D_e - h_{j1})}{2 \cdot p} = \frac{\pi \cdot (0,313 - 18,48 \cdot 10^{-3})}{2 \cdot 4} = 0,114 \text{ m}$$

$$h_{j1} = 18,48 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$H_{j1} = 400 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1} \text{ při } B_{j1} = 1,4 \text{ T}$$

1.6.8.7 Magnetické napětí jha rotoru

$$U_{j2} = l_{j2} \cdot H_{j2} = 0,048 \cdot 92 = 4,48 \text{ A}$$

$$l_{j2} = \frac{\pi \cdot (D_h + h_{j2})}{2 \cdot p} = \frac{\pi \cdot (0,072 + 0,052)}{2 \cdot 4} = 0,048 \text{ m}$$

$$h_{j2} = \frac{D_2 - D_i}{2} - h_{d2} = \frac{0,23066 - 0,072}{2} - 27,16 \cdot 10^{-3} = 0,052 \text{ m}$$

$$H_{j2} = 92 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1} \text{ při } B_{j1} = 0,66 \text{ T}$$

1.6.8.8 Výsledné magnetické napětí na jednu pólovou dvojici

$$F_m = U_\delta + U_{z1} + U_{z2} + U_{j1} + U_{j2} = 789,7 + 112,69 + 71,59 + 45,86 + 4,48 = 1024,09 \text{ A}$$

1.6.8.9 Činitel nasycení magnetického obvodu

$$k_\mu = \frac{F_m}{U_\delta} = \frac{1024,09}{789,47} = 1,3$$

1.6.8.10 Magnetizační proud

$$I_\mu = \frac{p \cdot F_m}{0,9 \cdot m_1 \cdot N_1 \cdot k_{V1}} = \frac{4 \cdot 1024,09}{0,9 \cdot 3 \cdot 144 \cdot 0,958} = 10,99 \text{ A}$$

1.6.8.11 Poměrná jednotka magnetizačního proudu

Poměrná jednotka magnetizačního proudu je dalším kritériem, podle kterého můžeme určit správnost výpočtu rozměrů stroje a vinutí. Hodnota magnetizačního proudu by měla být v rozmezí, které je dáno velikostí stroje. Jestliže je hodnota menší, rozměry byly zvoleny velké a aktivní materiál je nevyužit. Takový motor by měl mít velkou účinnost a účinník. Jestliže je hodnota větší, rozměry byly zvoleny menší než je třeba a stroj bude mít malou účinnost a účinník.

$$i_{\mu} = \frac{I_{\mu}}{I_{1N}} = \frac{10,99}{29,838} = 0,36$$

1.7 Výpočet odporů a reaktancí

Při návrhu asynchronního stroje je třeba znát odpory a rozptylové reaktance statoru a rotoru, vzájemné reaktance a fiktivní odpor, jehož zavedením se uvažuje vliv ztrát v železe statoru na charakteristiky motoru.

Odpory a reaktance asynchronního stroje se mění v závislosti na zatížení stroje.

1.7.1 Odpor jedné fáze statorového vinutí

$$R_1 = k \cdot \rho_{\vartheta} \cdot \frac{L_1}{S_{ef} \cdot a} = 1 \cdot \frac{10^{-6}}{41} \cdot \frac{84,408}{4,698 \cdot 10^{-6} \cdot 1} = 0,438 \Omega$$

Činitel zvětšení odporu působením povrchového jevu k volím 1. Rezistivita měděného vinutí ρ_{ϑ} při teplotě 115°C je $\rho_{\vartheta} = \frac{10^{-6}}{41}$.

Celková délka vodičů jedné fáze statorového vinutí

$$L_1 = l_{av} \cdot N_1 = 0,607 \cdot 144 = 84,408 \text{ m}$$

Střední délka závitu statorového vinutí

$$l_{av} = 2 \cdot (l_d + l_{\zeta}) = 2 \cdot (0,153 + 0,168) = 0,607 \text{ m}$$

Délka drážky

$$l_d = l_1 = 0,153 \text{ [m]}$$

Délka čela statoru

$$l_{\xi} = k_{\xi} \cdot b_c + 2 \cdot B = 1,5 \cdot 0,099 + 2 \cdot 0,01 = 0,168 \text{ m}$$

Činitel $k_{\xi} = 1,5$ a je určen z tabulky 1.7.1.B je délka přímé části cívky při výstupu z drážky od čela statorového svazku do začátku ohybu čela. Zvolím hodnotu $B = 0,01 \text{ m}$

Počet pólů 2p	Cívky statoru			
	Čela neizolovaná		Čela izolovaná páskou	
	K_{ξ}	K_v	K_{ξ}	K_v
2	1,2	0,26	1,45	0,44
4	1,3	0,4	1,55	0,5
6	1,4	0,5	1,75	0,62
≥ 8	1,5	0,5	1,9	0,72

Tab 1.7.1 K výpočtu rozměrů čel vsypávaného vinutí

Střední šířka cívky

$$b_c = \frac{\pi \cdot (D_i + h_{d1})}{2 \cdot p} \cdot \beta_1 = \frac{\pi \cdot (0,23162 + 21,58 \cdot 10^{-3})}{2 \cdot p} \cdot 1 = 0,099 \text{ m}$$

Kde činitel zkrácení kroku statorového vinutí $\beta_1 = 1$ pro jednovrstvá vinutí.

Vyložení čela statorového vinutí

$$l_{\xi} = k_v \cdot b_c + B = 0,5 \cdot 0,099 + 0,01 = 0,059 \text{ m}$$

Činitel k_v se určí z tabulky 1.7.1 a jeho hodnota je $k_v = 0,5$

1.7.2 Poměrná hodnota odporu jedné fáze statorového vinutí

$$r_1 = R_1 \cdot \frac{I_{1N}}{U_{1N}} = 0,438 \cdot \frac{29,838}{230} = 0,056 \Omega$$

1.7.3 Odpor kruhů nakrátko

$$R_{kn} = \rho_{kn} \cdot \frac{\pi \cdot D_{kn}}{Q_2 \cdot S_{kn}} = \frac{10^{-6}}{20,5} \cdot \frac{\pi \cdot 0,19671}{56 \cdot 324,562 \cdot 10^{-6}} = 1,65 \cdot 10^{-6} \Omega$$

$$\text{Rezistivita materiálu kruhu nakrátko } \rho_{kn} = \frac{10^{-6}}{20,5}$$

1.7.4 Odpor tyčí rotorového vinutí

$$R_t = \rho_t \cdot \frac{l_2}{S_t} = \frac{10^{-6}}{20,5} \cdot \frac{0,135}{119,76 \cdot 10^{-6}} = 54,988 \cdot 10^{-6} \Omega$$

$$\text{Rezistivita materiálu tyčí rotorového vinutí } \rho_t = \rho_{kn} = \frac{10^{-6}}{20,5}$$

1.7.5 Odpor fáze rotorového vinutí

$$R_2 = R_t + 2 \cdot \frac{R_{kn}}{\Delta^2} = 54,988 \cdot 10^{-6} + 2 \cdot \frac{1,65 \cdot 10^{-6}}{0,445^2} = 71,14 \cdot 10^{-6} \Omega$$

1.7.6 Odpor fáze rotoru přepočtený na počet závitů statorového vinutí

$$R_2' = R_2 + \frac{4 \cdot m \cdot (N_1 \cdot k_{v1})^2}{Q_2} = 71,14 \cdot 10^{-6} + \frac{4 \cdot 3 \cdot (144 \cdot 0,958)^2}{56} = 0,29 \Omega$$

1.7.7 Poměrná hodnota odporu R'_2

$$r_2 = R'_2 \cdot \frac{I_{1N}}{U_{1N}} = 0,29 \cdot \frac{29,838}{230} = 0,0376 \Omega$$

1.7.8 Rozptylová reaktance statorového vinutí motoru nakrátko

$$\begin{aligned} X_{1\sigma} &= 15,8 \cdot \frac{f}{100} \cdot \left(\frac{N_1}{100}\right)^2 \cdot \frac{l'_2}{p \cdot q} \cdot (\lambda_d + \lambda_\xi + \lambda_{dif}) \\ &= 15,8 \cdot \frac{50}{100} \cdot \left(\frac{144}{100}\right)^2 \cdot \frac{l'_2}{p \cdot q} \cdot (2,416 + 0,88 + 1,569) = 0,89 [\Omega] \end{aligned}$$

Činitel magnetické vodivosti drážek

Vzorec pro výpočet je zvolen z tabulky 6.22 v (Kopylov, 1988).

$$\begin{aligned} \lambda_d &= \frac{h_3}{3 \cdot b} \cdot k_\beta + \left(0,785 - \frac{b_0}{2 \cdot b} + \frac{h_2}{b} + \frac{h_0}{b_0}\right) \cdot k'_\beta \\ &= \frac{22,99 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 5,76 \cdot 10^{-3}} \cdot 1 + \left(0,785 - \frac{1,5 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 5,76 \cdot 10^{-3}} + 0 + \frac{0,7}{1,5}\right) = 2,416 \end{aligned}$$

Pro všechna jednovrstvá vinutí platí $k_\beta = k'_\beta$.

$$h_3 = h_1$$

$$b = b_1$$

Činitel magnetické vodivosti čel

$$\lambda_\xi = 0,34 \cdot \frac{q}{l'_1} \cdot (l_\xi - 0,64 \cdot \beta \cdot t_p) = 0,34 \cdot \frac{3}{0,135} \cdot (0,168 - 0,64 \cdot 0,88 \cdot 0,0909) = 0,88$$

$$l_\xi = 0,168 \text{ m}$$

$$l'_1 = l_i - 0,5 \cdot n_{vk} \cdot b_{vk} = 0,135 \text{ m}$$

Stator ani rotor v sobě nemají ventilační kanály, proto jsou hodnoty $n_{vk} = 0$, $b_{vk} = 0$.

$$\text{Činitel zkrácení kroku } \beta = \frac{2}{3} \cdot \frac{q+1}{q} = 0,88$$

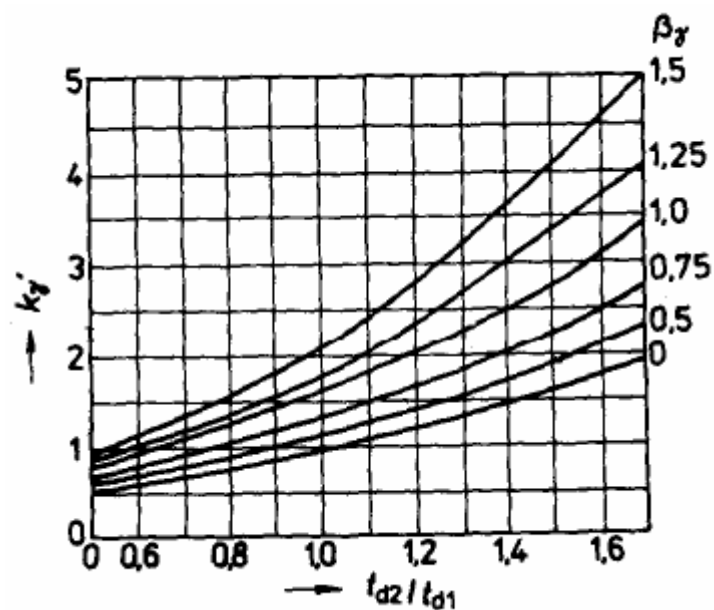
Činitel magnetické vodivosti diferenčního rozptylu statorového vinutí

$$\lambda_{dif} = \frac{t_{d1}}{12 \cdot \delta \cdot k_c} \cdot \xi = \frac{0,0101}{12 \cdot 0,48 \cdot 10^{-3} \cdot 1,285} \cdot 1,15 = 1,569$$

Pro výpočet činitele ξ zvolím vzorec s natočením drážek

$$\begin{aligned} \xi &= 2 \cdot k'_\gamma \cdot k_\beta - k_{v1}^2 \cdot \left(\frac{t_{d2}}{t_{d1}}\right)^2 \cdot (1 + \beta_\gamma^2) = 2 \cdot 1,51 \cdot 1 - 0,958^2 \cdot \left(\frac{0,0129}{0,0101}\right)^2 \cdot (1 + 0,5^2) \\ &= 1,15 \end{aligned}$$

Velikost činitele k'_γ se určí z obrázku 1.7.8 z poměru $\frac{t_{d2}}{t_{d1}}$ a β_γ



Obr. 1.7.8 Činitel k'_γ

$$\frac{t_{d2}}{t_{d1}} = \frac{0,0129}{0,0101} = 1,277$$

$$\beta_\gamma = \frac{b_\gamma}{t_{d2}} = \frac{0,00645}{0,0129} = 0,5$$

$$k'_\gamma = 1,51$$

1.7.9 Poměrná hodnota rozptylové reaktance

$$x_{1\sigma} = X_{1\sigma} \cdot \frac{I_{1N}}{U_{1N}} = 0,89 \cdot \frac{29,838}{230} = 0,115$$

1.7.10 Rozptylová reaktance 1f rotoru

1.7.10.1 Číselník magnetické vodivosti drážkového rozptylu

$$\begin{aligned} \lambda_{d2} &= \left(\frac{h_1}{3 \cdot b_1} \cdot \left(1 - \frac{\pi \cdot b_1^2}{8 \cdot S_t} \right) + 0,66 - \frac{b_0}{2 \cdot b_1} \right) \cdot k_d + \frac{h_0}{b_0} + 1,12 \cdot \left(\frac{h'_0}{I_2} \right) \cdot 10^6 \\ &= \left(\frac{22,99 \cdot 10^3}{3 \cdot 5,76 \cdot 10^3} \cdot \left(1 - \frac{\pi \cdot 5,76 \cdot 10^3}{8 \cdot 119,76 \cdot 10^6} \right) + 0,66 - \frac{1,5 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 5,76 \cdot 10^3} \right) \cdot k_d \\ &\quad + \frac{0,7 \cdot 10^{-3}}{1,5 \cdot 10^{-3}} + 1,12 \cdot \left(\frac{0,3 \cdot 10^{-3}}{418,97} \right) \cdot 10^6 = 0,456 \end{aligned}$$

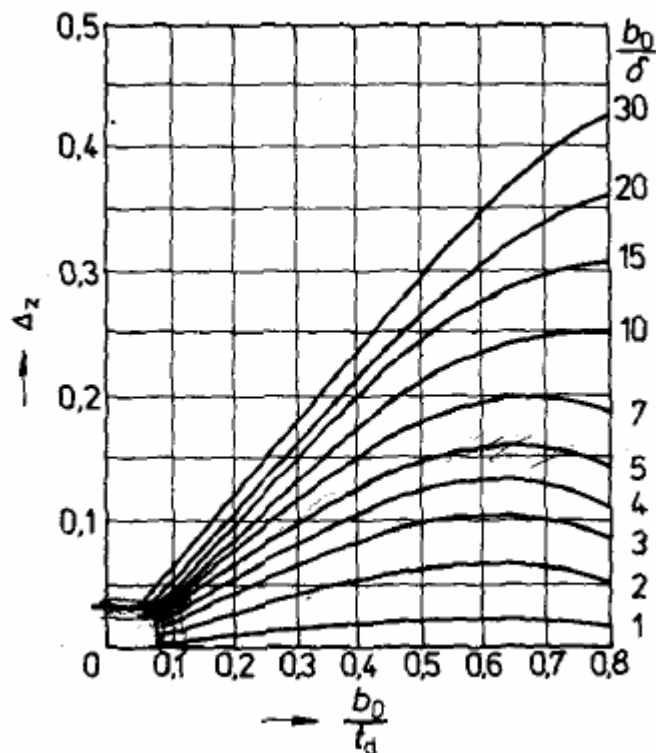
1.7.10.2 Číselník magnetické vodivosti rozptylu čel

$$\begin{aligned} \lambda_{\xi 2} &= \frac{2,3 \cdot D_{kn}}{Q_2 \cdot l_1 \cdot \Delta^2} \cdot \log \frac{4,7 \cdot D_{kn}}{a_{kn} + 2 \cdot b_{kn}} = \frac{2,3 \cdot 0,19671}{56 \cdot 0,135 \cdot 0,445^2} \\ &\quad \cdot \log \frac{4,7 \cdot 0,19671}{9,56 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 33,95 \cdot 10^{-3}} = 0,325 \end{aligned}$$

1.7.10.3 Číselník magnetické vodivosti diferenčního rozptylu klecového rotorového vinutí

$$\begin{aligned} \lambda_{dif2} &= \frac{t_{d2}}{12 \cdot \delta \cdot k_c} \cdot \xi = \frac{0,0129}{12 \cdot 0,48 \cdot 10^{-3} \cdot 1,285} \cdot 0,982 = 1,71 \\ \xi &= 1 \cdot \frac{1}{5} \cdot \left(\frac{\pi \cdot p}{Q_2} \right)^2 - \frac{\Delta_z}{1 - \left(\frac{p}{Q_2} \right)} = 1 \cdot \frac{1}{5} \cdot \left(\frac{\pi \cdot 4}{56} \right)^2 - \frac{0,027}{1 - \left(\frac{4}{56} \right)} = 0,982 \end{aligned}$$

Činitel Δ_z se určí z obrázku 1.7.10.3 z poměru b_0/δ a b_0/t_{d2} a jeho hodnota je $\Delta_z = 0,027$



Obr. 1.7.10.3 Činitel Δ_z

1.7.11 Vliv natočení drážek

$$X_{1\sigma\gamma} = \sigma_\gamma \cdot X_{1\sigma} = 1,156 \cdot 0,89 = 1,02 \, \Omega$$

$$X_{2\sigma\gamma} = \sigma_\gamma \cdot X_{2\sigma} = 1,156 \cdot 132,83 \cdot 10^{-6} = 153,55 \cdot 10^{-6} \, \Omega$$

$$\sigma_\gamma \approx 1 + 0,41 \cdot \left(\frac{b_\gamma}{t_p}\right)^2 \cdot \frac{U_{1N}}{X_{1\sigma} \cdot I_\mu} = 1 + 0,41 \cdot \left(\frac{6,45 \cdot 10^{-6}}{0,0909}\right)^2 \cdot \frac{230}{0,89 \cdot 13,36} = 1,156$$

1.7.12 Rozptylová reaktance jedné fáze rotorového vinutí

$$\begin{aligned} X_{2\sigma} &= 7,9 \cdot f_1 \cdot l_1' \cdot (\lambda_{d2} + \lambda_{\varepsilon 2} + \lambda_{dif2}) = 7,9 \cdot 50 \cdot 0,135 \cdot (0,456 + 0,325 + 1,71) \cdot 10^{-6} \\ &= 132,83 \cdot 10^{-6} \, \Omega \end{aligned}$$

1.7.13 Rozptylová reaktance jednofázového rotorového vinutí přepočtená na statorové vinutí

$$X'_{2\sigma} = X_{2\sigma Y} \cdot 4 \cdot m_1 \cdot \frac{(N_1 \cdot k_{v1})^2}{Q_2} = 1,83 \cdot 10^{-4} \cdot 4 \cdot 3 \cdot \frac{(144 \cdot 0,958)^2}{56} = 0,746 \, \Omega$$

1.7.14 Poměrná hodnota rozptylové reaktance

$$x'_2 = X'_{2\sigma} \cdot \frac{I_{1N}}{U_{1N}} = 0,746 \cdot \frac{29,838}{230} = 0,096$$

1.8 Výpočet ztrát

Ztráty v asynchronních motorech se dělí na ztráty v železe (hlavní a dodatečné), ztráty elektrické ve vinutí (Jouleovy ztráty), mechanické, ventilační a ztráty dodatečné při zatížení

1.8.1 Hlavní ztráty v železe

Hlavní ztráty v železe asynchronních motorů se počítají pouze ve statoru, neboť frekvence přemagnetování rotoru $f_2 = s \cdot f_1$ je při chodu blízkém k jmenovitému velmi nízká a ztráty v železe rotoru jsou i při velkém sycení zanedbatelné.

$$\begin{aligned} \Delta P_{FEH} &= \Delta P_{1,0} \cdot \left(\frac{f_1}{50}\right)^\beta \cdot (k_{dj} \cdot B_{j1}^2 \cdot m_{j1} + k_{dz} \cdot B_{z1}^2 \cdot m_{z1}) \\ &= 2,6 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1,5} \cdot (1,6 \cdot 1,3^2 \cdot 19,67 + 1,8 \cdot 1,8^2 \cdot 7,06) = 245,34 \, W \end{aligned}$$

Měrné ztráty použité oceli $\Delta P_{1,0} = 2,6$ pro plechy **Ei=55** jsou určeny z tabulky 1.8.1. Činitelé k_{dj} a k_{dz} uvažují vliv nerovnoměrnosti rozložení toku v částech magnetického obvodu. Pro stroje do výkonu 250 kW se používají následující hodnoty činitelů $k_{dj} = 1,6$ a $k_{dz} = 1,8$.

Elektrotechnická ocel třídy		Ploušťka plechů (mm)	$\Delta p_{1,0/50}(\text{W}\cdot\text{kg}^{-1})$	β
ČSN	Ei 45	0,5	2,0	1,5
	Ei 55	0,5	2,6	
	Ei 70	0,5	3,0	
	Ei 130	0,35	1,3	

Tab. 1.8.1. Měrné ztráty asynchronních motorů a hodnoty β **Hmotnost železa jha statoru**

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

$$= \pi \cdot (0,313 - 0,021) \cdot 0,021 \cdot 0,135 \cdot 0,97 \cdot 7800 = 19,67 \text{ kg}$$

Hustota oceli se při výpočtech uvažuje $\gamma_{Fe} = 7800 \text{ kg/m}^3$

Hmotnost železa v zubech statoru

$$m_{z1} = h_{z1} \cdot b_{z1} \cdot Q_1 \cdot l_{Fe1} \cdot k_{Fe} \cdot \gamma_{Fe} = 21,58 \cdot 10^{-3} \cdot 4,53 \cdot 10^{-3} \cdot 72 \cdot 0,135 \cdot 0,97 \cdot 7800$$

$$= 7,06 \text{ kg}$$

Výška statorových zubů $h_{z1} = h_{d1} = 21,58 \cdot 10^{-3} \text{ m}$

1.8.2 Povrchové ztráty v rotoru

$$\Delta P_{\delta p2} = P_{\delta p2} \cdot (t_{d2} - b_{02}) \cdot Q_2 \cdot l_{Fe2} = 14,73 \text{ W}$$

Kde $P_{\delta p2}$ je hustota povrchových ztrát v rotoru.

$$P_{\delta p2} = 0,5 \cdot k_{02} \cdot \left(\frac{Q_1 \cdot n}{10000} \right)^{1,5} \cdot (B_{02} \cdot t_{d1} \cdot 10^3)$$

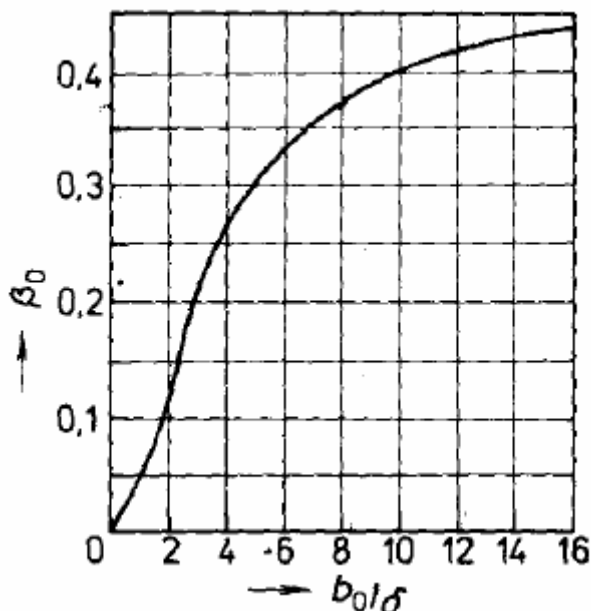
$$= 0,5 \cdot 1,5 \cdot \left(\frac{72 \cdot 750}{10000} \right)^{1,5} \cdot (0,422 \cdot 0,0101 \cdot 10^3) = 170,97 \text{ W}$$

Činitel k_{02} respektuje vliv opracování povrchu hlav zubu pro motory do 160 kW. Zvolil jsem hodnotu $k_{02} = 1,5$.

Amplituda pulsací indukce ve vzduchové mezeře

$$B_{02} = \beta_{02} \cdot k_c \cdot B_\delta = 0,36 \cdot 1,285 \cdot 0,9126 = 0,422 \text{ T}$$

Činitel β_{02} se odečte z obrázku 1.8.2. Jeho velikost je $\beta_{02} = 0,36$



Obr. 1.8.2. Činitel β_{02} pro výpočet povrchových ztrát

1.8.3 Pulsní ztráty v zubech rotoru

$$\Delta P_{p2} = 0,11 \cdot \left(\frac{Q_1 \cdot n}{1000} \cdot B_{p2} \right)^2 \cdot m_{z2} = 0,11 \cdot \left(\frac{72 \cdot 750}{1000} \cdot 0,106 \right)^2 \cdot 10,47 = 37,73 \text{ W}$$

Pro B_{p2} se nejprve musí nalézt amplituda pulsací indukce ve středním zubu rotoru

$$B_{p2} = \frac{\gamma \cdot \delta}{2 \cdot t_{d2}} \cdot B_{z2} = \frac{4,67 \cdot 0,48 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 0,0129} \cdot 1,8 = 0,106 \text{ T}$$

Kde m_{z2} je hmotnost zubů rotoru

$$\begin{aligned} m_{z2} &= h_{z2} \cdot b_{z2} \cdot Q_2 \cdot l_{Fe1} \cdot k_{Fe} \cdot \gamma_{Fe} = 27,16 \cdot 10^{-3} \cdot 6,74 \cdot 10^{-3} \cdot 56 \cdot 0,135 \cdot 0,97 \cdot 7800 \\ &= 10,47 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$h_{z2} = h_{d2}$$

1.8.4 Dodatečné ztráty v železe

Vznikají při chodu naprázdno, lze je rozdělit na ztráty povrchové a pulsní ztráty v železe zubů. Tyto ztráty jsou ve statoru u motoru nakrátko velmi malé, neboť rotorové drážky mají malé otevření b_0 a pulsace indukce ve vzduchové mezeře pod hlavními zuby statoru jsou nepatrné. Proto se tyto ztráty ve statoru motorů nakrátko obvykle nepočítají.

$$\Delta P_{Fed} = \Delta P_{\delta p_2} + \Delta P_{p_2} = 14,73 + 37,73 = 52,46 \text{ W}$$

1.8.5 Celkové ztráty v železe

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_{Feh} + \Delta P_{Fed} = 245,34 + 52,46 = 297,8 \text{ W}$$

1.8.6 Elektrické ztráty ve všech fázích vinutí statoru

$$\Delta P_{j1} = m_1 \cdot R_1 \cdot I_{1N}^2 = 3 \cdot 0,438 \cdot 29,838^2 = 1014,949 \text{ W}$$

1.8.7 Elektrické ztráty v klecovém vinutí

$$\Delta P_{j2} = Q_2 \cdot R_2 \cdot I_2^2 = 56 \cdot 71,14 \cdot 10^{-6} \cdot 418,97^2 = 699,3 \text{ W}$$

1.8.8 Mechanické ztráty

Ztráty způsobené třením ložisek a ventilační ztráty jsou vyjádřeny spolu ve vzorci

$$\Delta P_{mech} = K_t \cdot \left(\frac{n}{10}\right)^2 \cdot D_e^4 = 7 \cdot \left(\frac{750}{10}\right)^2 \cdot 0,313^4 = 377,918 \text{ W}$$

U motorů s $D \geq 0,25 \text{ m}$ je $K_t = 7$ pro $2p \geq 4$

1.8.9 Přídavné ztráty při zatížení

Tyto ztráty vznikají v asynchronních motorech působením rozptylových toků, pulsací indukce ve vzduchové mezeře, další příčinou může být i to, že výsledné magnetické napětí vinutí statoru a rotoru má stupňovitý průběh.

$$\Delta P_d = 0,005 \cdot \frac{P_2}{\eta} = 0,005 \cdot \frac{14000}{0,95} = 73,68 \text{ W}$$

1.8.10 Proud naprázdno

$$I_0 = \sqrt{I_{0\check{c}}^2 + I_{\mu}^2} = \sqrt{1,31^2 + 13,36^2} = 13,42 \text{ A}$$

Kde výpočet činné složky proudu naprázdno je dán vztahem

$$I_{0\check{c}} = \frac{\Delta P_{Fe} + \Delta P_{mech} + \Delta P_{j10}}{3 \cdot U_{iN}} = \frac{297,8 + 377,918 + 234,53}{3 \cdot 230} = 1,31 \text{ A}$$

Kde elektrické ztráty ve statorovém vinutí při chodu naprázdno jsou dány vztahem

$$\Delta P_{j10} = 3 \cdot R_1 \cdot I_{\mu}^2 = 3 \cdot 0,438 \cdot 13,36^2 = 234,53 \text{ W}$$

1.8.11 Účinit naprázdno

$$\cos \varphi_0 = \frac{I_{0\check{c}}}{I_0} = \frac{1,31}{13,42} = 0,097$$

1.8.12 Proud nakrátko

$$I_k = \frac{U_{iN}}{Z_k} = \frac{230}{1,14} = 201,75 \text{ A}$$

Kde impedance je dána vztahem

$$Z_k = \sqrt{R_k^2 + jX_k^2} = \sqrt{0,728^2 + 0,89^2} = 1,14 \Omega$$

Jalová část impedance a odpor jsou spočteny v následujících vztazích

$$jX_k = X_{\delta 1} + X_{\delta 2} = 0,89 + 158,96 \cdot 10^{-6} = 0,890 \Omega$$

$$R_k = R_1 + R_2' = 0,438 + 0,29 = 0,728 \Omega$$

1.8.13 Účinitiv nakrátko

$$\cos \varphi_k = \frac{R_k}{Z_k} = \frac{0,728}{1,14} = 0,638$$

1.8.14 Účinnost stroje

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta_p} = \frac{14000}{14000 + 2462,90} = 0,85$$

$$\begin{aligned} \Delta_p &= \Delta P_{Fe} + \Delta P_{j1} + \Delta P_{j2} + \Delta P_{mech} + \Delta P_d \\ &= 297,8 + 1014,949 + 699,3 + 377,918 + 73,68 = 2462,90 W \end{aligned}$$

2 Konstrukční uspořádání asynchronních strojů

Asynchronní stroje jsou elektrické, točivé, střídavé stroje. Hlavními částmi asynchronního stroje jsou stator a rotor. Stator je netočivá část motoru a od rotoru je oddělen vzduchovou mezerou. Bývá tvořen svazkem plechů, které jsou od sebe navzájem izolované. Ve statoru jsou drážky sloužící k uložení vinutí. Rotor je pevně spojen s hřídelí a při provozu se otáčí. Rozlišujeme dvě možné konstrukce rotoru.

2.1 Rotor nakrátko

Těmto rotorům se také říká rotory s klecí nakrátko. Vinutí je tvořeno tyčemi, které jsou spojeny na obou koncích rotoru kruhy. Rotory nakrátko se mohou lišit tvarem klece. Známe rotor s klecí vírovou, rotor s klínovými drážkami, s dvojitou klecí apod.

2.2 Rotor kroužkový

V drážkách rotoru je trojfázové vinutí spojené do hvězdy. Vývody vinutí jsou připojeny na tři kroužky, které jsou nalisované na hřídeli stroje a ke kterým přiléhají kartáče umožňující vyvedení vinutí na svorkovnici stroje.

Základní konstrukční uspořádání je do značné míry určeno předepsaným tvarem stroje (IM_{xx}), provedením (IP_{xx}) a způsobem chlazení (IC_{xx}).

Značení :

IP_{xy} (ČSN 60529) x znamená ochranu před vniknutím cizích předmětů a před dotykem číslice x = 0 až 6) a y znamená ochranu stroje před vniknutím vody (číslice y = 0 až 8).

Př.: IP 23

Příčemž x = 0 - žádná ochrana

x = 1 - ochrana před velkými předměty a dotykem dlaní (60 až 100 mm)

x = 2 - ochrana před malými předměty a dotykem prstem (12 až 60 mm)

x = 3 - ochrana před drobnými předměty a nástrojem (2,5 až 12,5 mm)

x = 4 - ochrana před velmi drobnými předměty a nástroji (1 až 2,5 mm)

x = 5 - ochrana před vniknutím prachu částečně a jakoukoliv pomůckou

x = 6 - ochrana před vniknutím prachu úplně

Příčemž y = 0 - žádná ochrana

y = 1 - ochrana před volně skapávající vodou

y = 2 - ochrana před kapající vodou (max. pod úhlem 15° od svislice)

y = 3 - ochrana před dešťovou vodou (max. 60° od svislice)

y = 4 - ochrana před stříkající vodou (ze všech směrů)

- y = 5 - ochrana před tryskající vodou
- y = 6 - ochrana před zaplavením
- y = 7 - ochrana před ponořením do hloubky 1 m
- y = 8 - ochrana před tlakovou vodou (ponoření do hloubky více než 1 m)

IM xyz(h(g)) (ČSN 60634-7) znamená konstrukční uspořádání stroje především z hlediska jeho upevnění, uložení rotoru a polohy. Příklad: IM 101ZZ (nově: IM1012). Kde x = 1 až 9 je skupinové číslo, y – konstrukční číslo, z – číslo polohy stroje, h – označení volného konce hřídele.

- Přičemž x = 1 - stroje patkové s ložiskovými štíty
- x = 2 - s ložiskovými štíty, patkami a přírubou na ložiskovém štítu
 - x = 3 - s ložiskovými štíty, bez patek, s přírubou na lož. štítu
 - x = 4 - s ložiskovými štíty, bez patek, s přírubou na kostře
 - x = 5 - stroj bez ložisek
 - x = 6 - stroj s ložiskovými štíty i s ložiskovými stojany
 - x = 7 - stroj s ložiskovými stojany
 - x = 8 - velké svislé stroje (hydroalternátory)
 - x = 9 - speciální provedení stroje
- y - určuje podrobněji konstrukční provedení, jako například umístění a polohu patek, přírub, počet ložiskových stojanů (viz ČSN)
 - z - poloha osy stroje, umístění strany pohonu, umístění na základech (viz ČSN)
 - h - pokud není uvedeno nic, jedná se o válcový konec hřídele na zadní straně stroje

(Doc. Ing. Josef Červený, CSc. 2008 „Projektování elektrických zařízení – přednášky.“)

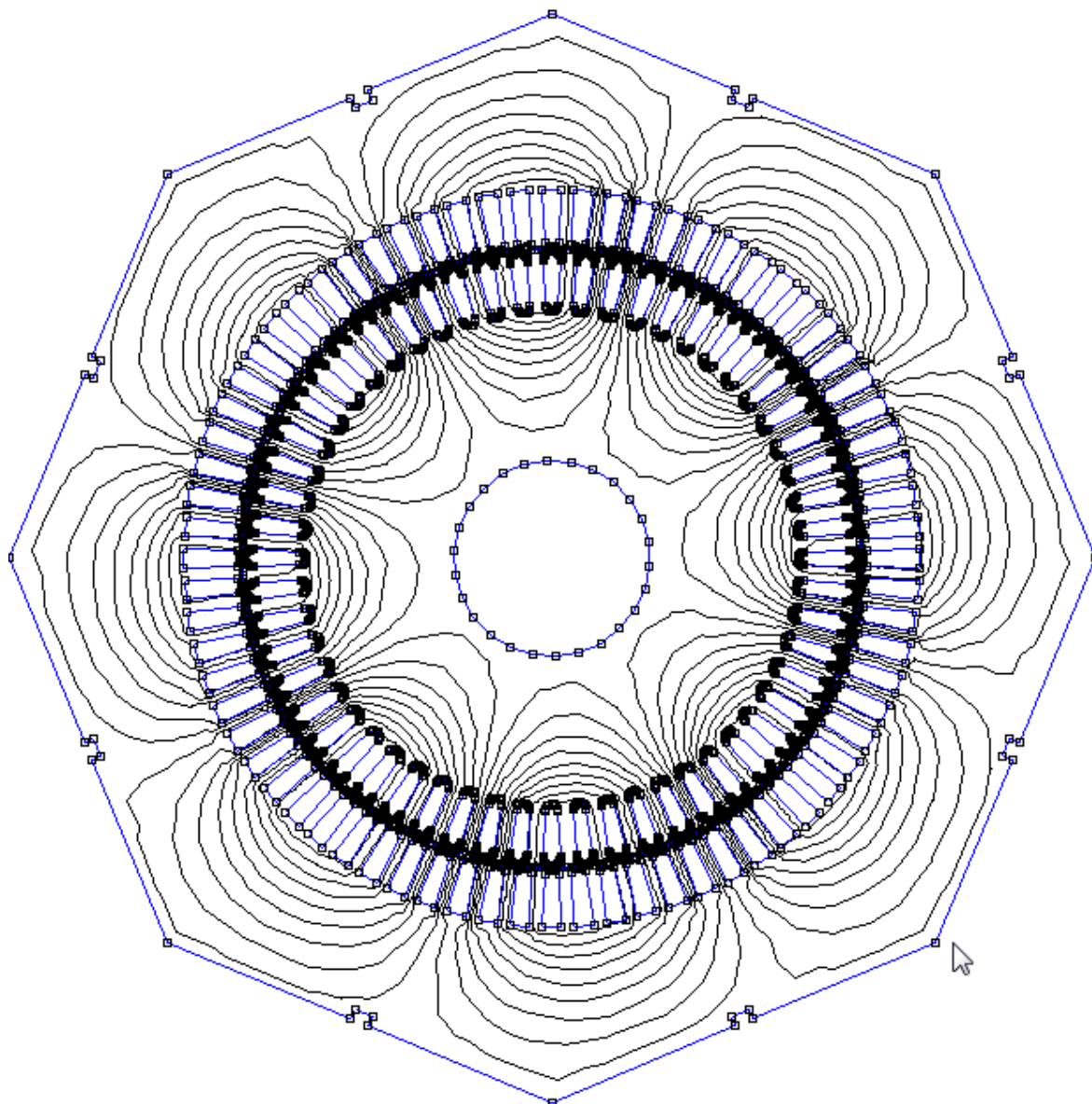
System chlazení stroje je označován písmeny IC (International Cooling), za nimiž je velkým písmenem označen druh chladiva a následně dvojčíslicí charakterizující způsob oběhu chladiva a zdroj energie pro oběh chladiva.(Kopylov, 1988)

3 Návrh konstrukčního řešení stroje

Statorové plechy jsou tvořeny z elektrotechnické oceli, která má zvýšený obsah křemíku. Jednotlivé plechy jsou od sebe izolovány a společně tvoří plechový svazek. Po vnitřním obvodu statoru jsou drážky typu L. V každé drážce je 12 měděných vodičů, které jsou izolovány od plechů statoru. Kostry motorů se vyrábějí ze šedé litiny a tvoří nosný systém pro připevnění statorového svazku s vinutím. Kostra stroje obsahuje žebra, která jsou lisována společně s kostrou. Žebra stroje napomáhají lepšímu chlazení. Hřídel stroje je tvořena z uhlíkové oceli. Je odstupňována podle průměru. Na největším průměru hřídele je rotorový svazek. Dále je na hřídeli uložen větrák a ložiska. Jednotlivé díly, které jsou na hřídeli, se jednou stranou opírají o stranu hřídele s větším průměrem a z druhé strany jsou jištěné pojistnými kroužky. U malých strojů, jako je tento, se používají valivá ložiska, která jsou plněna kuličkami, nebo válečky. Kotva nakrátko byla vybrána pro svou jednoduchost. Je tvořena hliníkovými tyčemi, které jsou na obou koncích spojeny kruhy. Dále byla vybrána ochrana IP 23 před vniknutím cizích předmětů. Hřídel stroje je uložena vertikálně. Ke kostře stroje jsou připevněny patky a ložiskové štíty. Chlazení motoru je tvořené tzv. volným okruhem, kde se chladicí médium nasává i vyfukuje do okolního prostředí. Jako médium byl vybrán vzduch, který je rozháněn ventilátorem připevněným na hřídeli. Vinutí statoru je jednovrstvé, což je při konstrukci technologicky složitější.

4 FEMM

Program FEMM slouží k simulaci magnetických a elektrostatických polí a zobrazování tepelných a proudových toků. Na obrázku 4.1. je zobrazené pole magnetické indukce daného motoru.

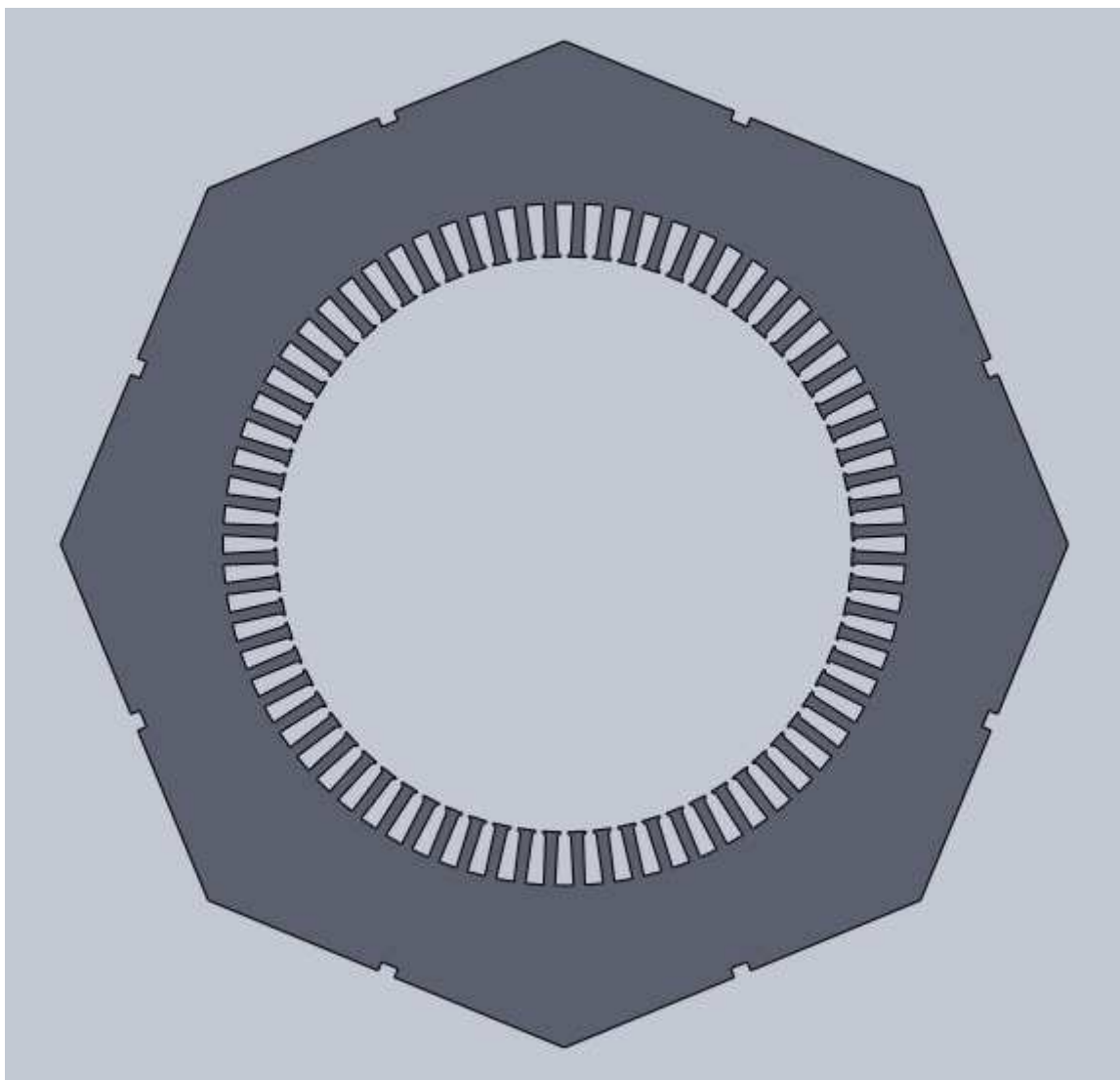


Obr. 4.1. Indukce magnetického pole

5 Konstrukce motoru v 3D CAD programu solidworks

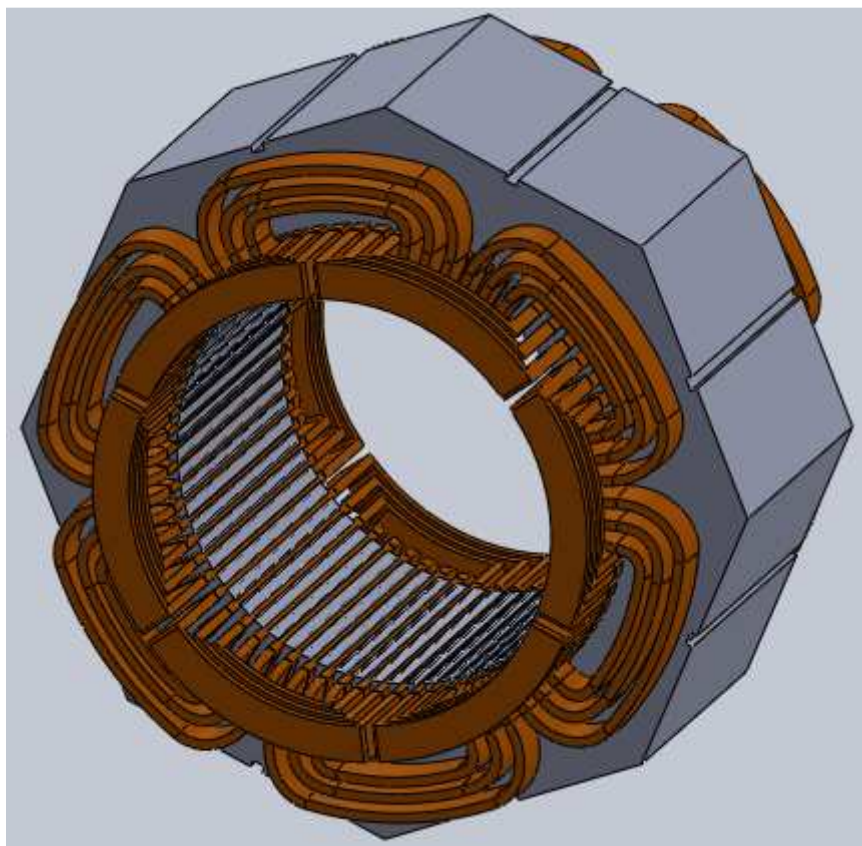
5.1 Stator

Vzhledem k omezené výpočetní technice je stator tvořen jedním kusem železa a není tudíž konstruován z plechů. Podle těchto předpokladů je tedy konstrukce jednoduchá a skládá se z prostého vysunutí skici s drážkami. V pleších jsou drážky i z vnějšku a slouží pro uložení stroje do krytí. Viz obrázek 4.1.1.



Obr. 4.1.1. Plechy statoru

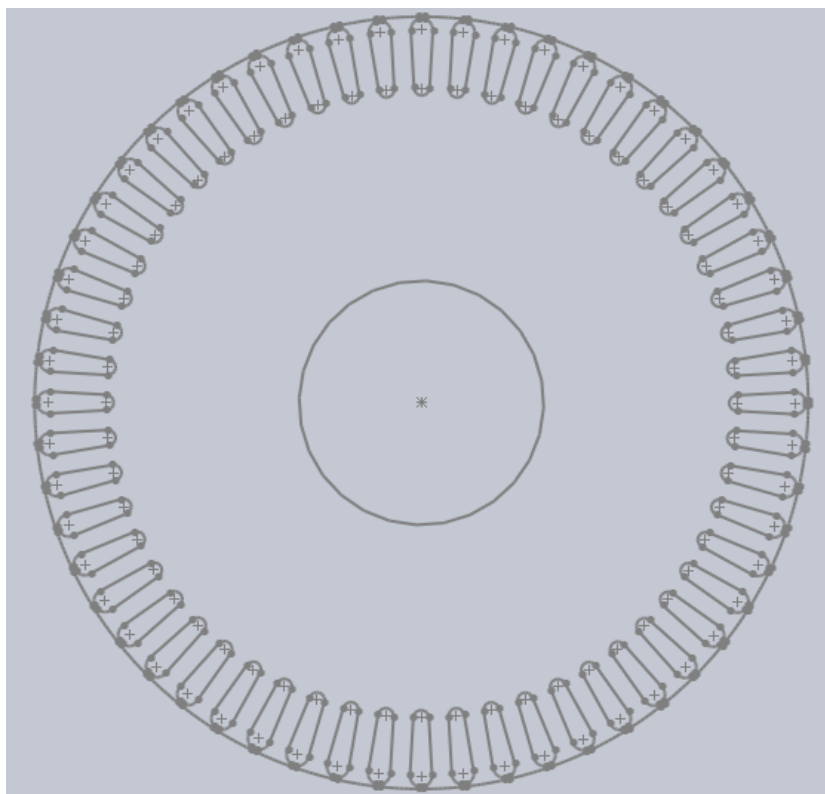
Do plechů statoru je vloženo vinutí, které je tvořeno vysunutím a spojením profilů. Na obrázku 4.1.2. je viděn stator osazen vinutím. Vinutí je do statoru vsazeno pomocí vazeb.



Obr. 4.1.2. Sestava statoru

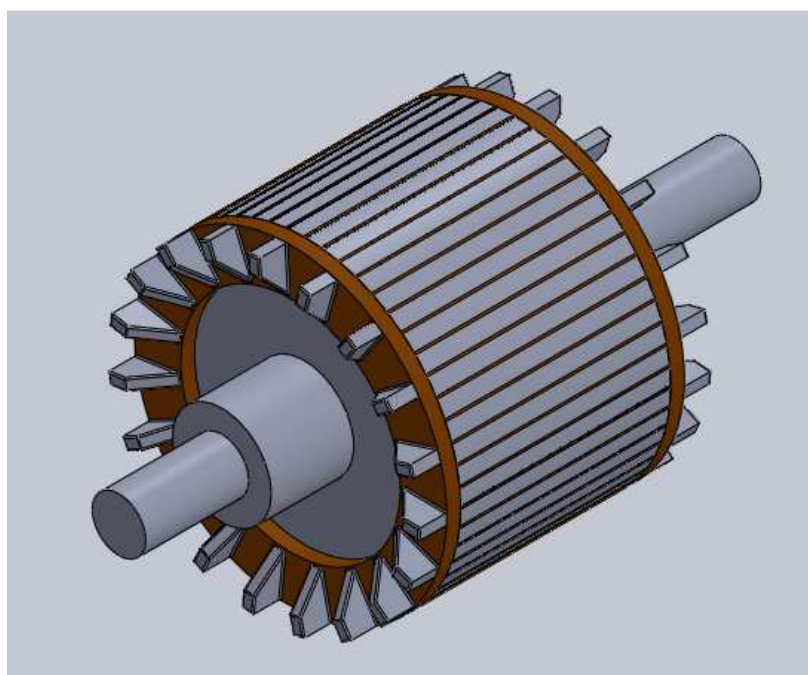
5.2 Rotor

Tato část je opět tvořena z jedné části železa nahrazující plechový svazek. Je tvořena vysunutím ze skici podobné statorové. Skica je viditelná na obrázku 4.2.1.



Obr. 4.2.1. Skica rotoru

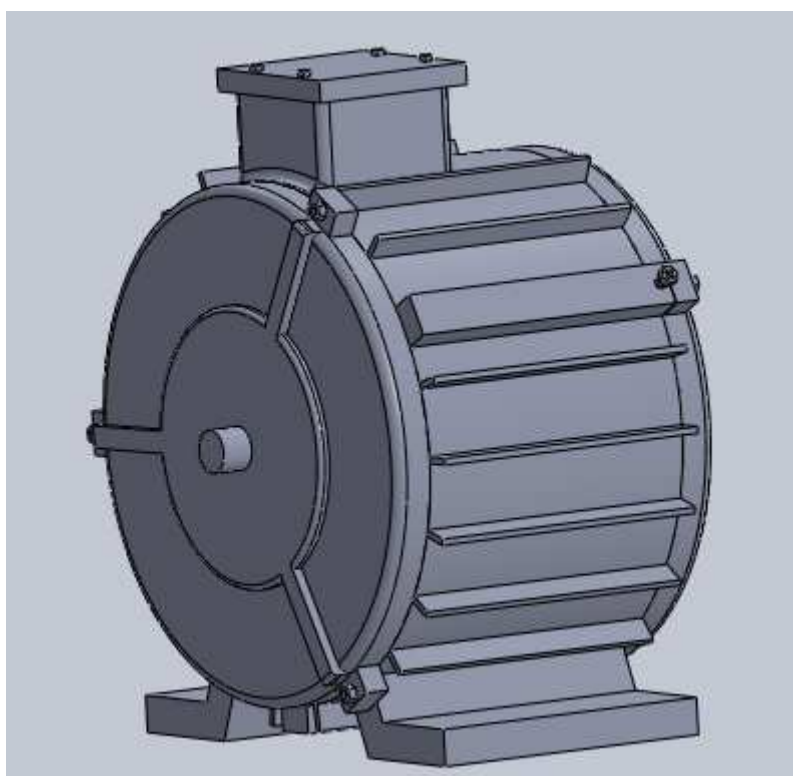
Do svazku rotorových plechů je přes vazby uloženo vinutí spojené na obou koncích kruhy nakrátko. Na kruzích nakrátko jsou přidělané lopatky pro lepší chlazení stroje. Do sestavy je ještě přidána hřídel. Rotorová sestava je na obrázku 4.2.2



Obr. 4.2.2 Sestava rotoru.

5.3 Krytí motoru

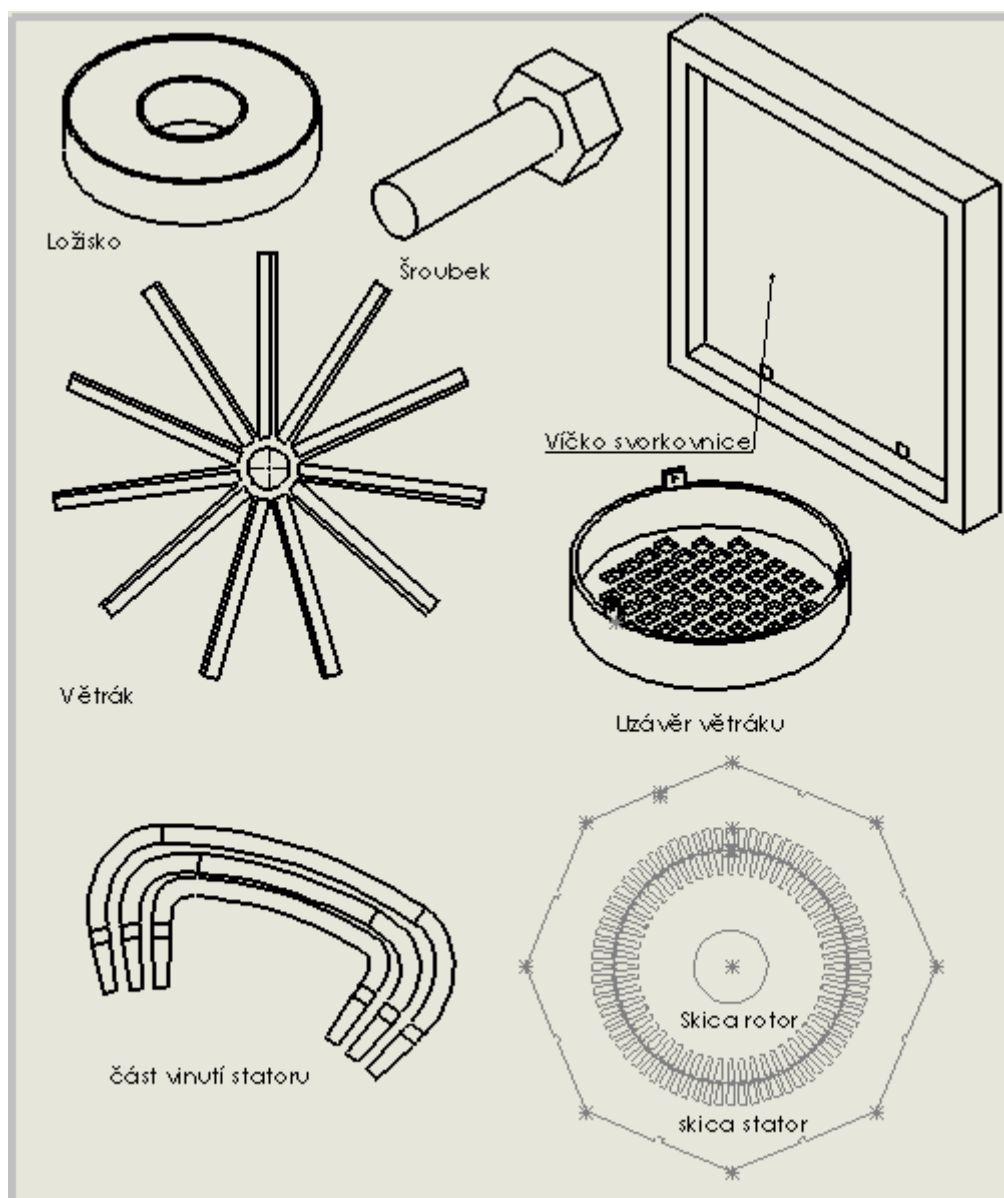
Krytí motoru se skládá ze 4 částí. Základem krytí je kostra motoru, která je vesměs tvořena jednou skicou až na krabičku svorkovnice. Ke kostře motoru jsou pomocí vazeb připevněny ložiskové štíty. Krytí je zobrazeno na obrázku 4.3.1.



Obr. 4.3.1. Krytí motoru

5.4 Ostatní součásti

Model obsahuje další části nutné pro správnou funkci stroje. Jsou to ložiska, šroubky, víčko svorkovnice, větrák, díry pro šrouby apod. Tyto součásti je možné vidět na obrázku 4.4.1.



Obr. 4.4.1. Výkres se součástmi

Závěr

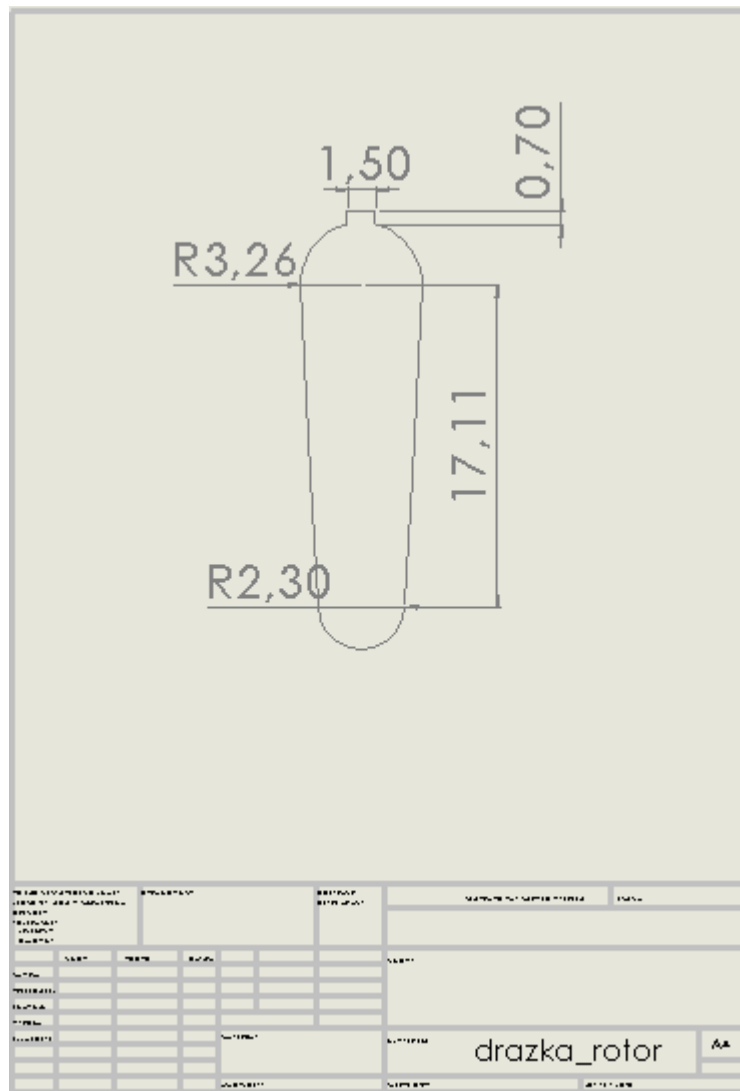
Obsahem této diplomové práce je elektromagnetický návrh třífázového asynchronního motoru s kotvou nakrátko. Návrh obsahuje výpočet rozměrů stroje, odporů, reaktancí, ztrát a účinnosti stroje. Při výpočtu je nutné volit různé rozměry, tvary a velikosti. Například počty a tvary statorových i rotorových drážek. V průběhu návrhu se vyskytují kontrolní výpočty určující správnost výpočtu. V této práci je lehce zvýšený magnetizační proud. Podle norem je nutné změnit rozměry stroje. Magnetizační proud lze také snížit zvětšením vzduchové mezery.

Jako další krok práce je nakreslení navrhnutého motoru v 3D CAD programu solidworks 2012. Při kreslení jsem shledal obtížnějším pouze kreslení vinutí statoru ve kterém jsem musel použít nástroj spojení profilů. Dále jsou v práci použité prvky jako díry, vysunutí, pole, zrcadlení apod. Jednotlivé části jsou spojeny v sestavy pomocí vazeb, aby bylo vidět jak celý stroj vypadá.

Pro zajímavost je k diplomové práci přiložen výkres z programu FEMM, kde je vidět rozložení magnetického pole.

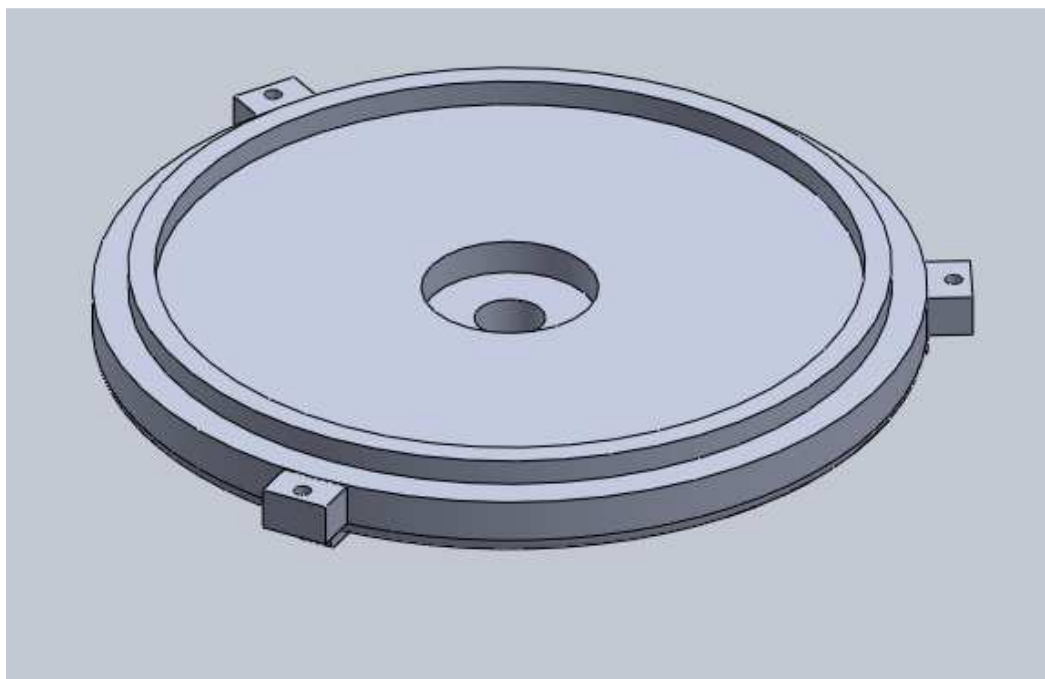
Seznam použité literatury a zdrojů

- [1] I.P. Kopylov a kol.: Stavba elektrických strojů, SNTL Praha, 1988
- [2] L. Cikánek: Stavba elektrických strojů, SNTL Praha, 1958
- [3] M. Blahník: Návrh asynchronního motoru s kotvou nakrátko s parametry $P=10\text{kW}$, $2p=2$, $U_n=400/690\text{ V}$, IP 44 Diplomová práce, Západočeská univerzita v Plzni, 2008
- [4] P. Dupal: Návrh asynchronního motoru s kotvou nakrátko s parametry $P = 10\text{ kW}$, $2p = 6$, $U_n = 400/690\text{ V}$, $m = 3$, IP44 Diplomová práce, Západočeská univerzita v Plzni, 2011.
- [5] <http://webs.zcu.cz/fel/kev/+PEZ/P%fdedn%a0%e7ky/Konstrukce.pdf>
[cit. 25. dubna 2012]
- [6] <http://webs.zcu.cz/fel/kev/+PEZ/P%fdedn%a0%e7ky/Microsoft%20Word%20-%20Projektov%a0n%a1%20elektrick%ecch%20za%fd%a1zen%a1.pdf>
[cit. 25. Dubna 2012]



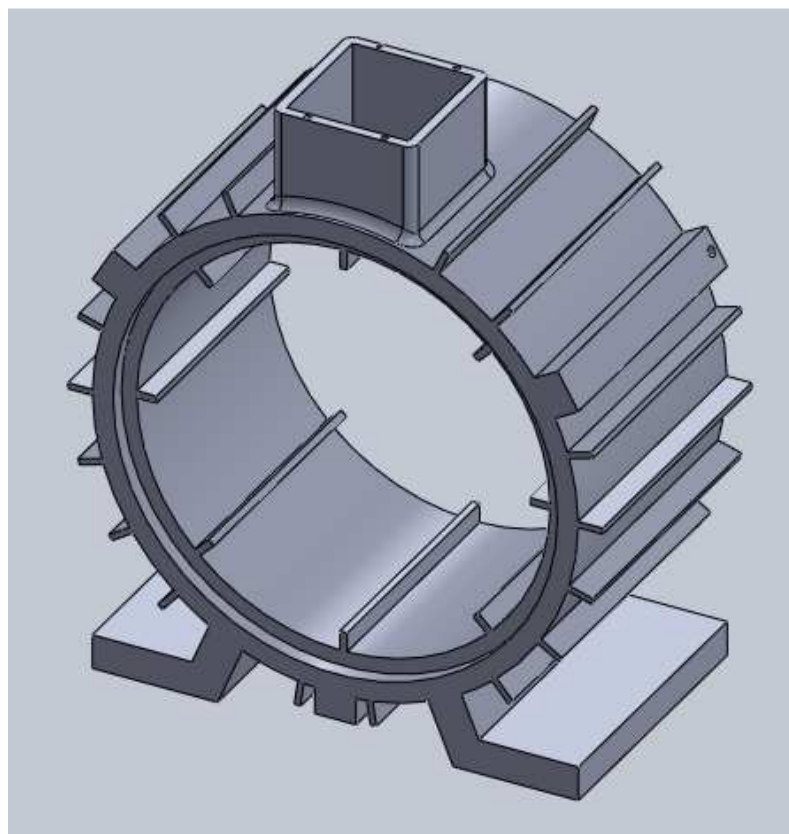
Obr.. Rotorová drážka

Příloha č. 2: Zadní ložiskový štít



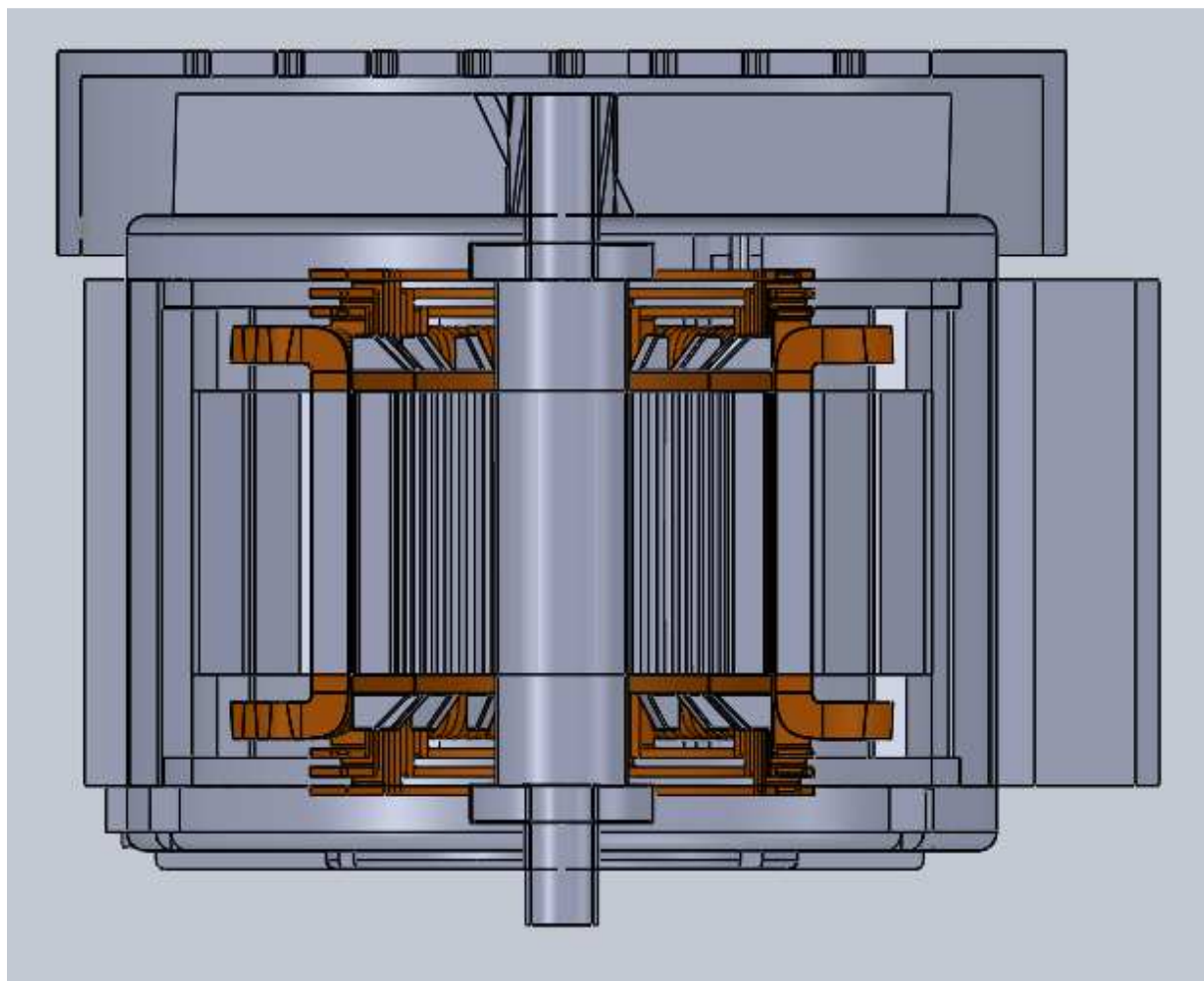
Obr. Zadní ložiskový štít

Příloha č. 3: Kostra motoru



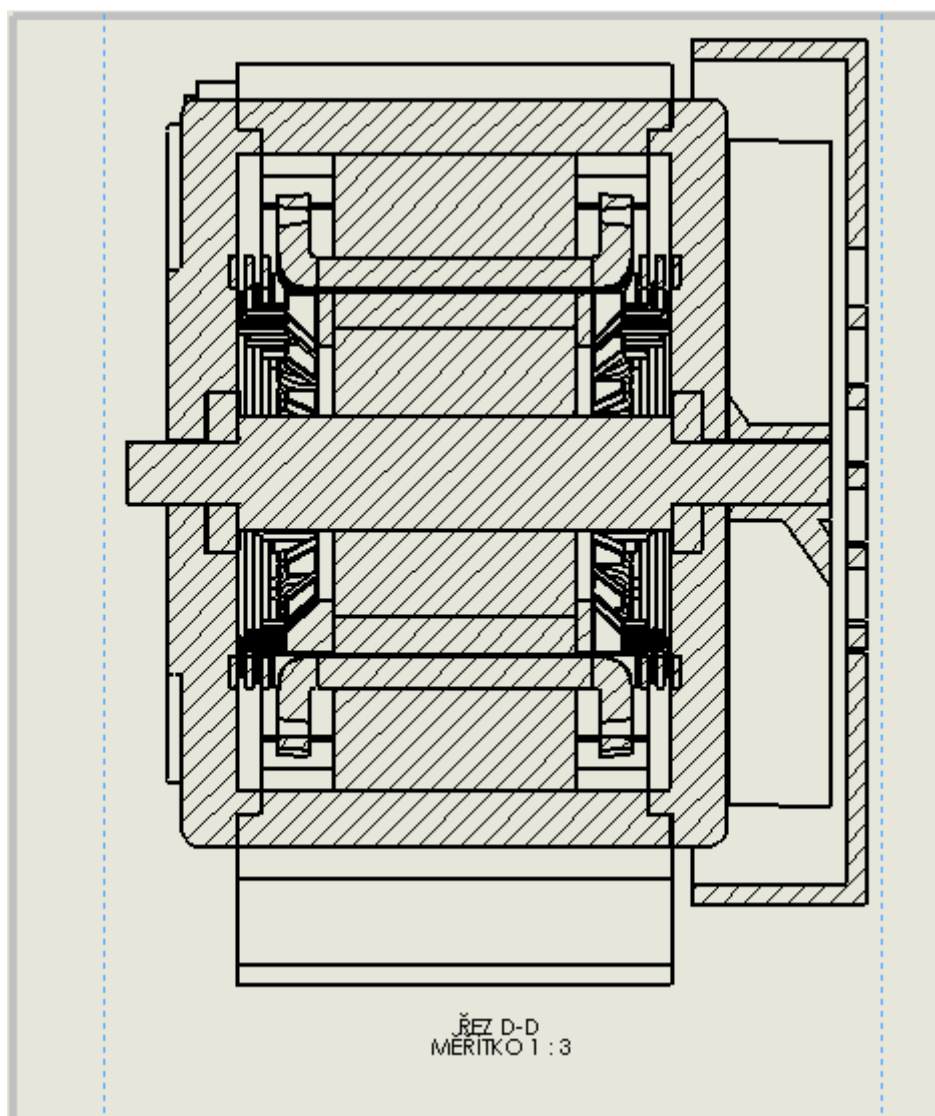
Obr. Kostra motoru

Příloha č. 4: Řez motoru



Obr. Řez motoru

Příloha č. 5: Výkres- řez motoru



Obr. Výkres-řez motoru