

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Návrh řady asynchronních motorů

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2017/2018

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

Jméno a příjmení: Bc. Michal ČERNOCH
Osobní číslo: E16N0046P
Studijní program: N2612 Elektrotechnika a informatika
Studijní obor: Průmyslová elektronika a elektromechanika
Název tématu: Návrh řady asynchronních motorů
Zadávající katedra: Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Zásady pro vypracování:

1. Navrhněte dle zadání vedoucího práce řadu asynchronních strojů s klecí nakrátko.
2. Ověřte návrhy v programu RMXprt (název software pro modelování elektrických strojů).
3. Vytvořte v programu SolidWorks parametrický model asynchronního stroje, který umožní změnu rozměrů na základě tabulky hodnot vypočtených v bodu 1 zadání.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 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. Jan Šobra


Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání diplomové práce: 10. října 2017

Termín odevzdání diplomové práce: 24. května 2018


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




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 10. října 2017

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na návrh řady asynchronních motorů s klecí nakrátko, kde je zadaný počet motorů navržen a dimenzován do stanovených řad. Následně je provedeno stanovení parametrů náhradního schématu, které jsou ověřeny v programu RMxprt. Na základě vypočítaných rozměrů jednotlivých motorů, je vytvořen parametrický model asynchronního stroje v programu SolidWorks, který umožňuje změnu jednotlivých rozměrů jednoduchým dosazením do tabulky v programu MS Excel.

Klíčová slova

Asynchronní stroj, návrh řady asynchronních motorů, elektromagnetický návrh, parametrický model

Abstract

The thesis is focused on the design of a series of squirrel cage induction motors, where the given number of motors are designed and dimensioned into specified series. After that, equivalent circuit parameters of the machines are verified in RMXprt software. Based on the calculated dimensions of the individual motors, a parametric model of the asynchronous machine is created in SolidWorks software, which allows individual dimension changes using MS Excel table.

Key words

Induction machine, design of induction machines series, electromagnetic design, parametric model.

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.

.....

podpis

V Plzni dne 21.5.2018

Bc. Michal Černoch

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval všem, kteří se mnou konzultovali tuto diplomovou práci. Především vedoucímu diplomové práce Ing. Janu Šobrovi za odborný dohled, pomoc a vřelou komunikaci při zpracovávání diplomové práce. Dále pak Bc. Radku Čermákovi za konzultace oteplení stroje a Bc. Zdeňku Frankovi a Ing. Jakubu Levorovi za rady při modelování stroje.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
1 ASYNCHRONNÍ MOTORY	14
2 ŘADY ASYNCHRONNÍCH MOTORU S KLEČÍ NAKRÁTKO	15
2.1 ZÁSADY PRO NÁVRH:	15
2.2 KLASIFIKACE ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ	16
3 NÁVRH VYBRANÉHO STROJE Z ŘADY	17
3.1 VSTUPNÍ HODNOTY PRO ANALYTICKÝ VÝPOČET STROJE D24M	17
3.2 VÝPOČTY ZÁKLADNÍCH ROZMĚRŮ	17
3.3 NÁVRH STATORU.....	18
3.4 ROZMĚRY DRÁŽEK A ZUBŮ STATORU	20
3.5 ROZMĚRY DRÁŽEK A ZUBŮ ROTORU	22
3.6 DIMENZOVÁNÍ MAGNETICKÉHO OBVODU	26
3.7 NÁHRADNÍ PARAMETRY STROJE	28
3.8 STANOVENÍ ZTRÁT VE STROJI	31
3.9 KONTROLA OTEPLENÍ STROJE.....	33
3.10 KONTROLA OTEPLENÍ SOFTWAREM MOTORCAD	35
3.11 NÁVRH VINUTÍ STATORU.....	37
4 POROVNÁNÍ NÁHRADNÍCH PARAMETRŮ STROJE	39
5 POROVNÁNÍ MAGNETICKÝCH INDUKCÍ STROJE	40
6 NAVRŽENÁ ŘADA ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ	42
7 PARAMETRIZOVANÝ MODEL ASYNCHRONNÍHO MOTORU	44
8 ZÁVĚR	46
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	47
PŘÍLOHY	48

Úvod

Navrhování řady asynchronních motorů s sebou přináší řadu specifikací, ale přesto je hojně využíváno výrobci zejména z důvodu standardizace a minimalizace výrobních a skladovacích nákladů na výrobu. Mezi špičkové výrobce v tomto sektoru se řadí zejména firmy Siemens nebo Raveo s.r.o. a mnoho dalších.

Při zaměření na výrobu konkrétního typu asynchronního motoru je vhodné nejprve provést rozbor v jakých podmínkách a za jakým účelem bude stroj používán a je třeba navrhovanou řadu standardizovat nejprve z hlediska provedení stroje, čemuž se věnuje norma ČSN EN 60034-7. Poté je třeba provést rozbor provedení stroje z hlediska krytí živých a točivých částí stroje, to lze nalézt v normě ČSN EN 60034-6. Kritériu chlazení se věnuje norma ČSN EN 60034-6, která jasně definuje provedení typu chlazení.

Při individuálním návrhu celé řady je nutné si specifikovat, pro jaké parametry řadu realizovat. V ideálním případě by bylo vhodné, aby navrhovaná řada obsahovala jen jednu osovou výšku a délku, ale to z důvodu fyzikálních vlastností není možné. Proto se hledají vhodné poměry mezi osovou výškou a délkou stroje. S těmito parametry je především svázán výkon stroje. Obecně se hledá takový poměr, kde se nám do jednoho průměru vejde co nejvíce osových délek, ale ne vždy je možné stroj do nekonečna protahovat s ohledem na délkové omezení a mechanické namáhání hřídele vlivem průhybu stroje. Volit velký průměr a krátkou délku paketu pro navrhovanou řadu, ale také není vhodné, z důvodu velkých jouleových ztrát především v čelech vinutí, které se nepodílejí na vzniku točivého momentu. Mezi další kritéria se poté řadí s jakou točivou rychlostí a jak velkým momentem chceme aby stroj pracoval. To nás při návrhu řady limituje zejména při volbě počtu drážek a typu zapojení vinutí.

Vzhledem k výše uvedenému je tato práce věnována především třífázovým asynchronním motorům s klecí nakrátko v patkovém provedení s krytím IP 44, se snahou najít vhodné poměry mezi jednotlivými technickými parametry stroje, s vlivem na parametry náhradního schématu.

Seznam symbolů a zkratk

Symbol	Název veličiny	Jednotka
(AJ)	Kritérium pro asynchronní stroje	-
A	Obvodová proudová hustota	A/m ²
a	Počet paralelních větví	-
a _{kn}	Vnitřní průměr kruhu nakrátko	m
B _{z1}	Magnetická indukce v zubu statoru	T
B _{z2}	Magnetická indukce v zubu rotoru	T
b ₀	Šířka hrdla drážky	m
b ₁	Šířka dna drážky	m
b ₂	Šířka drážky u dna	m
b _c	Střední šířka cívky	m
B _{j1}	Magnetická indukce ve jhu statoru	T
B _{j1}	Magnetická indukce ve jhu statoru	T
B _{j1}	Magnetická indukce ve jhu rotoru	T
b _{kn}	Vnější průměr kruhu nakrátko	m
b _{z1}	Předběžná šířka zubu	m
b _{z2}	Šířka zubu rotoru	m
B _δ	Indukce ve vzduchové mezeře	T
c ₁	Hopkinsonův činitel rozptylu	-
cosφ	Účinit	-
D _e	Vnější průměr statoru	m
D ₁	Vnitřní průměr statoru	m
f	Frekvence	Hz
f _r	Počet fázových svazků na fázi	-
F _m	Magnetické napětí	A
h ₁	Aktivní hloubka drážky	m
h ₁	Výška drážky	m
h _d	Předběžná hloubka drážky	m
h _d	Celková hloubky drážky	m
h _{j1}	Výška jha statoru	m
h _{j2}	Výška jha rotoru	m
I _{1N}	Jmenovitý proud statoru	A
I _{N2}	Jmenovitý proud v tyčích klece	A

I_{μ}	Magnetizační proud	A
J	Proudová hustota	A/m ²
K	Počet cívek	-
K ₁	Počet cívek ve svazku	-
K _B	Činitel tvaru pole	-
k _č	Koeficient prodloužení čela	m
K _D	Poměr vnitřního a vnějšího průměru statoru	-
K _E	Činitel poměru indukovaného napětí	-
K _{fe}	Činitel plnění železa	-
K _T	Činitel plnění drážky	-
L	Délka vinutí	m
l ₂	Délka rotoru	m
l _{av}	Střední délka závitů	m
l _č	Délka čela vinutí	m
l _{FE}	Délka železa	m
m	Počet fází	-
m'	Počet matematických fází	-
M(s)	Průběh momentu	Nm
m _{j1}	Hmotnost jha statoru	kg
m _{j2}	Hmotnost jha rotoru	kg
M _{max}	Skluz v bodě zvratu	-
M _n	Jmenovitý moment	Nm
m _{z1}	Hmotnost zubů statoru	kg
m _{z2}	Hmotnost zubů rotoru	kg
N ₁	Počet závitů	-
n ₂	Jmenovité otáčky hřídele	ot./min
n _s	Jmenovité otáčky statoru	ot/min
p	Počet pólů stroje	-
p _i	Činitel převodu proudů	-
P ₂	Výkon stroje	W
P _i	Příkon stroje	W
P _{opi}	Povrchové ztráty ve statoru a rotoru	W
q	Počet drážek na pól a fázi	-
Q	Potřebný průchod vzduchu pro ventilaci	m/s

Q_1	Počet drážek statoru	-
Q_{1max}	Maximální počet drážek statoru	-
Q_{1min}	Minimální počet drážek statoru	-
Q_d	Odvod drážky	m
R_1	Odpor vinutí statoru	Ω
R_{Fe}	Odpor příčné větve	Ω
R_t	Odpor tyče rotoru	Ω
Sc	Počet fázových svazků	-
S_d	Plocha drážky pro vinutí	m ²
S_{kn}	Plocha kruhu nakrátko	m ²
s_n	Jmenovitý skluz	-
S_t	Plocha tyče rotoru	m ²
s_{zv}	Skluz v bodě zvratu	-
td_1	Drážková rozteč statoru	-
td_2	Drážková rozteč rotoru	m
td_{max}	Maximální drážková rozteč	m
td_{min}	Minimální drážková rozteč	m
tp	Pólová rozteč	m
U_{j1}	Magnetické napětí jha statoru	A
U_{j2}	Magnetické napětí ve jhu statoru	A
U_{z1}	Magnetické napětí v zubu statoru	A
U_{z2}	Magnetické napětí v zubu rotoru	A
U_δ	Magnetické napětí ve vzduchové mezeře	A
V_d	Poče vodičů v drážce	-
X_{1d}	Rozptylová reaktance vinutí statoru	Ω
X_{2d}	Rozptylová reaktance vinutí rotoru	Ω
X_μ	Magnetizační reaktance	Ω
y_1	Přední cívkový krok	-
y_{1d}	Přední cívkový krok v počtu drážek na pól	-
y_2	Spojkový krok	-
α_δ	Činitel pólového krytí	-
γ_1	Pulzní ztráty	W
δ	Šířka vzduchové mezery	m
ΔP	Celkové ztráty	W

ΔP_{FE}	Celkové ztráty v železe	W
Δp_{j1}	Ztráty ve vinutí statoru	W
Δp_{j2}	Ztráty ve vinutí rotoru	W
$\Delta p_{j\acute{c}1}$	Jouleovy ztráty ve vinutí	W
Δp_{jd1}	Jouleovy ztráty v drážkové části	W
Δp_{mech}	Mechanické a ventilační ztráty	W
$\Delta p_{přid}$	Přídavné ztráty	W
Δt	Rozdíl teplot	°C
$\Delta \vartheta_{FE}$	Oteplení železa	°C
$\Delta \vartheta_{z\acute{c}}$	Teplotní spád izolace čela vinutí	°C
$\Delta \vartheta_{izd}$	Teplotní závislost v drážkové části	°C
$\Delta \vartheta_{pov\acute{c}}$	Oteplení povrchu čel nad teplotu vzduchu	°C
$\Delta \vartheta_{vin}$	Oteplení vinutí na teplotu vnitřního vzduchu	°C
$\Delta \vartheta_{vinutí}$	Oteplení vinutí na teplotu vnitřního vzduchu	°C
$\Delta \vartheta_{Vz}$	Oteplení vnitřního vzduchu	°C
η	Účinnost	-
$\lambda_{\acute{c}}$	Činitel magnetické vodivosti čel vinutí statoru/rotoru	-
λ_d	Činitel magnetické vodivosti statorové/rotorové drážky	-
λ_{dif}	Činitel magnetické vodivosti diferenčního rozptylu vinutí	-
ρ	Měrný elektrický odpor	Ωm
Φ	Magnetický indukční tok	Wb
ω	Úhlová rychlost	rad/s

1 Asynchronní motory

Trojfázové asynchronní motory s klecí nakrátko do výkonu 20 kW jsou považovány za malé asynchronní motory, které se většinou používají k pohonu průmyslových zařízení jako jsou pohony dopravníků, lisů, obráběcích strojů, čerpadel apod. Větší asynchronní stroje je možné spatřit například v trakčních vozidlech městské hromadné dopravy nebo jsou součástí velkých průmyslových ventilátorů.

Na konkrétním využití asynchronního stroje závisí předně jeho provedení kostry a typ chlazení. Tyto motory lze snadno doplnit také o frekvenční měniče a mechanické spojky, a právě díky těmto aspektům, s příspěvkem jednoduché konstrukce a velice spolehlivému provozu, je možné provozovat tyto motory i desítky let bez větší údržby.

Pro snadnější projektování a umístění tak asynchronního motoru do funkčního zařízení se obvykle tyto menší motory vyrábějí v předem definovaných výkonových řadách a lze si tak zvolit potřebný pohon pro danou aplikaci s požadovanými parametry. Právě v takovéto řadě jsou jednotlivé stroje odstupňovány s určitým výkonovým rozdílem. Řady lze také sestavit pro různé počty pólů stroje, na kterých jsou posléze závislé jmenovité otáčky a točivý moment. Dále tyto stroje můžeme srovnávat podle jejich osových výšek a délek.

Výrobci výkonových řad motorů se snaží dodávat stroje s co nejlepší účinností a vhodnými parametry, ale vytvoření výkonové řady asynchronních motorů často tak vede ke zhoršení některých náhradních parametrů, rozběhových parametrů, snížení účinnosti a podobných faktorů. Proto mohou motory z výkonové řady jen těžko svými vlastnostmi konkurovat prototypové výrobě strojů, které jsou stavěny za konkrétním účelem. Avšak mezi nespornou výhodou řad motorů patří jejich ekonomické náklady na výrobu, spojené s naskladněním potřebného materiálu a obráběcích nástrojů na výrobu. Díky nízkým výrobním nákladům a návaznosti na snadné nahrazení jednotlivých komponentů, je velký předpoklad pro růst jejich užití i v budoucnu. [1]

2 Řady asynchronních motorů s klecí nakrátko

2.1 Zásady pro návrh:

- Třífázový asynchronní motor s klecí nakrátko
- Patkové provedení, IP 44
- Chlazení vlastní – žebra kostry ofukovaná axiálním ventilátorem na hřídeli
- Trvalý chod S1, teplota okolí do +40 °C, teplotní třída izolace F
- Návrh na napájecí frekvenci 50 Hz
- Snaha použít co nejmenší počet příčných řezů magnetických obvodu pro stroje z tabulky. Tedy rozdělit všechny kombinace výkonů a počtů pólů, kde pro každou osovou výšku bude zachován počet, tvar a rozměry drážek a výška jha. Dosažení vyššího/nížšího výkonu by tedy mělo být realizováno prodloužením/zkrácením paketu.

P [kW]	2p [-]	U Δ / Y [V]
1,5	2 / 4 / 6	230 / 400
2,2	2 / 4 / 6	230 / 400
3	2 / 4 / 6	230 / 400
5,5	2 / 4 / 6	230 / 400
7,5	2 / 4 / 6	230 / 400
11	2 / 4 / 6	230 / 400
15	2 / 4 / 6	230 / 400

Tab. 2.1: Navrhované motory

2.2 Klasifikace asynchronních motorů

2P = 2									
Průměr	D1			D2			D3		
D _e (mm)	150			200			250		
Délka stroje	S	M	L	S	M	L	S	M	L
L _{FE} (mm)	23	33	46	47	64	94	82	-	-
P (kW)	1,5	2,2	3	5,5	7,5	11	15	-	-
Popis	D12S	D12M	D12L	D22S	D22M	D22L	D32S	-	-

2P = 4									
Průměr	D1			D2			D3		
D _e (mm)	150			200			250		
Délka stroje	S	M	L	S	M	L	S	M	L
L _{FE} (mm)	-	46	67	51	94	128	120	164	-
P (kW)	-	1,5	2,2	3	5,5	7,5	11	15	-
Popis	-	D14M	D14L	D24S	D24M	D24L	D34S	D34M	-

2P = 6									
Průměr	D1			D2			D3		
D _e (mm)	150			200			250		
Délka stroje	S	M	L	S	M	L	S	M	L
L _{FE} (mm)	-	-	137	56	64	141	123	180	246
P (kW)	-	-	1,5	2,2	3	5,5	7,5	11	15
Popis	-	-	D16L	D26S	D26M	D26L	D36S	D36M	D36L

Tab. 2.2: Klasifikace asynchronních motorů

3 Návrh vybraného stroje z řady

Níže uvedený návrh asynchronního motoru jednoho vybraného stroje z řady je proveden pomocí analytických výpočtů dle uvedené literatury z předem definovaných vstupních parametrů. Ostatní stroje z řady jsou od něj odvozeny se změnou velikostí geometrie pro dosažení požadovaných výkonů dle zásad pro návrh řady z kapitoly 2.

3.1 Vstupní hodnoty pro analytický výpočet stroje D24M

Výkon stroje na hřídeli	$P_2 = 5500 \text{ W}$
Sdružené napětí	$U_N = 400 \text{ V}$
Napájecí frekvence	$f_1 = 50 \text{ Hz}$
Počet fází stroje	$m = 3$
Počet pólů	$2p = 4$

3.2 Výpočty základních rozměrů

Výpočet asynchronního motoru je proveden dle literatury [1].

Výška osy stroje

Nejprve zvolíme vnější průměr statorového paketu $D_e = 0,2 \text{ m}$. vnitřní průměr vrtání statoru D_1 stanovíme pomocí zvoleného poměru $K_D = 0,68$

Vnitřní průměr statoru

$$D_1 = K_D \cdot D_e = 0,68 \cdot 0,2 = 0,136 \text{ m} \quad (3.2.1)$$

Pólová rozteč

$$t_p = \frac{\pi \cdot D_1}{2p} = \frac{\pi \cdot 0,136}{4} = 0,107 \text{ m} \quad (3.2.2)$$

Vnitřní výkon stroje

$$S_i = P_2 \cdot \frac{k_E}{\eta \cdot \cos \varphi} = 5,5 \cdot \frac{0,975}{0,9 \cdot 0,9} = 6500 \text{ VA} \quad (3.2.3)$$

Kde k_E je poměr indukovaného napětí ke jmenovitému napětí statoru, η předběžná účinnost stroje, $\cos \varphi$ účinník.

Zvolené rozměry

Obvodová proudová hustota $A = 38\,000 \text{ A/mm}$ volená s ohledem na provedení stroje IP44

Činitel jednovrstvého vinutí $k_{v1} = 0,958$

Indukce ve vzduchové mezeře $B_\delta = 0,8 \text{ T}$

Činitel tvaru pole pro sinusové napětí $k_B = 1,11$

Ideální délka vzduchové mezery

$$l_{fe} = \frac{2 \cdot P_i}{D_1^2 \cdot \omega_s \cdot k_B \cdot k_v \cdot A \cdot B_\delta} \quad (3.2.4)$$

$$= \frac{2 \cdot 5500}{0,136^2 \cdot 157,1 \cdot 1,11 \cdot 0,958 \cdot 28000 \cdot 0,8} = 0,094 \text{ m}$$

Pro výpočet vzduchové mezery je potřeba si stanovit synchronní úhlovou rychlost

$$\omega_s = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{p} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 50}{2} = 157,1 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1} \quad (3.2.5)$$

Počet plechů

Vzhledem k omezení ztrát vířivými proudy je nutné stator a rotor složit z magnetických plechů. Pro tento typ strojů byly zvoleny plechy SURA 350-50A, jejich magnetizační charakteristiky jsou uvedené v příloze 1.

Tloušťka plechů $l_p = 0,5 \text{ mm}$

Počet plechů na svazek

$$p_{pl} = \frac{l_{fe}}{l_p} = \frac{0,136}{0,5} = 188 \quad (3.2.6)$$

3.3 Návrh statoru**Stanovení počtu drážek**

Navrhovaný statorový paket musí mít počet drážek takový, aby bylo možno zapojit jednovrstvé smyčkové vinutí v provedení stroje $2p = 2, 4$ a 6 . Je potřeba zvolit počet, který odpovídá podmínce $q = \frac{Q_1}{2p \cdot m}$, přičemž q musí být celé číslo pro všechny typy pólpárů. Vinutí bude provozováno sériově zapojené pro snadné automatické navinutí cívek, což také zužuje možnost volby. Počet drážek statoru volíme $Q_1 = 36$.

Počet drážek na pól a fázi

$$q = \frac{Q_1}{2p \cdot m} = \frac{36}{4 \cdot 3} = 3 \quad (3.3.1)$$

Drážková rozteč statoru bude pro tento stroj bude

$$t_{d1} = \frac{\pi \cdot D_1}{2p \cdot m \cdot q} = \frac{\pi \cdot 0,136}{4 \cdot 3 \cdot 3} = 0,0119 \text{ m} \quad (3.3.2)$$

Jmenovitý proud statoru

$$I_{1N} = \frac{P_2}{m \cdot U_N \cdot \eta \cdot \cos\varphi} = \frac{5500}{3 \cdot 231 \cdot 0,9 \cdot 0,9} = 9,8 \text{ A} \quad (3.3.3)$$

Předběžný počet vodičů v drážce

$$V'_d = \frac{\pi \cdot D_1 \cdot A}{I_{1N} \cdot Q_1} = \frac{\pi \cdot 0,136 \cdot 28000}{9,8 \cdot 36} = 34 \quad (3.3.4)$$

Skutečný počet vodičů v drážce na cívku

$$V_d = a \cdot V'_d = 1 \cdot 34 = 34 \quad (3.3.5)$$

Počet závitů

$$N_1 = \frac{V_d \cdot Q_1}{2 \cdot a \cdot m} = \frac{34 \cdot 36}{2 \cdot 3} = 204 \quad (3.3.6)$$

Kontrola zvolené obvodové proudové hustoty

$$A = \frac{2 \cdot m \cdot N_1 \cdot I_{1N}}{\pi \cdot D_1} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 204 \cdot 9,8}{\pi \cdot 0,136} = 28077 \text{ A/m} \quad (3.3.7)$$

Magnetický indukční tok na pólpár

$$\Phi = \frac{K_E \cdot U_{1N}}{4 \cdot k_B \cdot N_1 \cdot f_1 \cdot k_v} = \frac{0,975 \cdot 231}{4 \cdot 1,11 \cdot 204 \cdot 50 \cdot 0,958} = 5,1 \cdot 10^{-3} \text{ Wb} \quad (3.3.8)$$

Indukce ve vzduchové mezeře

$$B_\delta = \frac{p \cdot \Phi}{D_1 \cdot l_{Fe}} = \frac{2 \cdot 0,0051}{0,136 \cdot 0,094} = 0,798 \text{ T} \quad (3.3.9)$$

Průřez efektivního vodiče

$$S_{ef1} = \frac{I_{1N}}{a \cdot J} = \frac{9,8}{2 \cdot 280000} = 0,98 \text{ mm}^2 \quad (3.3.10)$$

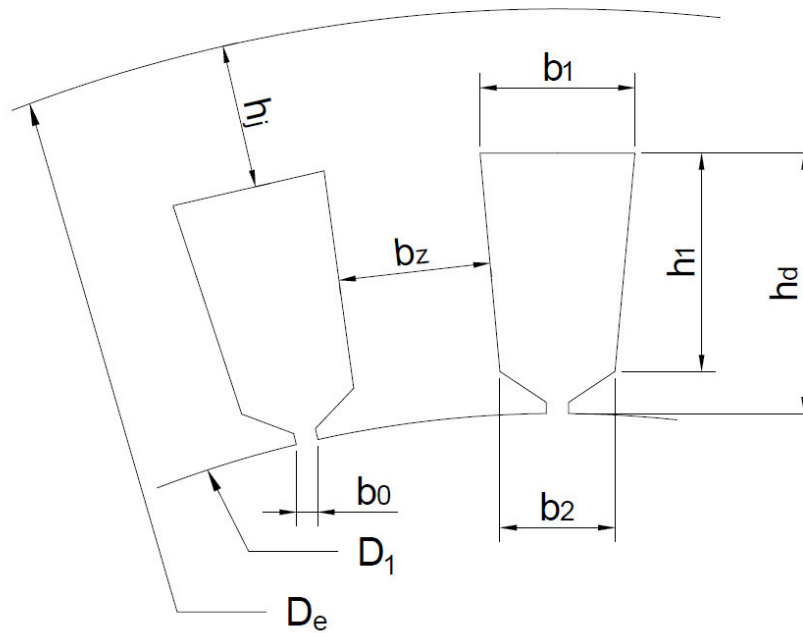
Dle normy ČSN EN 60317-01 je využit nejbližší vyšší možný průřez vodiče $D_v = 1 \text{ mm}^2$ s prvním stupněm přírůstkem na izolaci vodiče $S_{iz} = 0,034 \text{ mm}$.

Šířka vzduchové mezery

$$\delta = (0,25 + D_1) \cdot 10^{-3} = (0,25 + 0,136) \cdot 10^{-3} = 0,39 \text{ mm} \quad (3.3.11)$$

Šířku vzduchové mezery je normalizována na $\delta = 0,4 \text{ mm}$

3.4 Rozměry drážek a zubů statoru



Obr. 3.4.1: Statorová drážka

Předběžná šířka zubu statoru

$$b_{z1} = \frac{B_{\delta} \cdot t_d \cdot l_{Fe}}{B_z \cdot l_{Fe} \cdot k_{Fe}} = \frac{0,798 \cdot 0,0119 \cdot 0,094}{2 \cdot 0,094 \cdot 0,97} = 4,9 \text{ mm} \quad (3.4.1)$$

Výška statorového jha

$$h_{j1} = \frac{\phi}{2 \cdot B_{j1} \cdot l_{Fe} \cdot k_{Fe}} = \frac{5,1 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 1,6 \cdot 0,094 \cdot 0,97} = 17,5 \text{ mm} \quad (3.4.2)$$

Hloubka drážky

$$h_d = \frac{D_e - D_1}{2} - h_{j1} = \frac{0,2 - 0,136}{2} - 0,0175 = 14,5 \text{ mm} \quad (3.4.3)$$

Šířka drážky u paty zubu

$$b_1 = \frac{\pi \cdot (D_1 + 2 \cdot h_d)}{Q_1} - b_{z1} = \frac{\pi \cdot (0,136 + 2 \cdot 0,018)}{36} - 0,049 = 9,5 \text{ mm} \quad (3.4.4)$$

Předběžnou výšku vrcholu drážky volíme normalizovanou hodnotu
 $h_0 = 0,5 \text{ mm}$

Šířka drážky v horní části

$$b_2 = \frac{\pi \cdot (D_1 + 2 \cdot h_0 - b_0) - Q_1 \cdot b_{z1}}{Q_1 - \pi} = \quad (3.4.5)$$

$$b_2 = \frac{\pi \cdot (136 + 2 \cdot 0,5 - 1,5) - 36 \cdot 4,9}{36 - \pi} = 7,6 \text{ mm}$$

Aktivní hloubka drážky

$$h_1 = h_{d1} - \left(h_0 + \frac{b_2 - b_0}{2} \right) = 14,5 - \left(0,5 + \frac{7,6 - 1,5}{2} \right) = 11 \text{ mm} \quad (3.4.6)$$

Aktivní plocha příčného řezu drážky

$$S_d = \frac{b_1 + b_2}{2} \cdot h_1 = \frac{9,5 + 7,6}{2} \cdot 11 = 71 \text{ mm}^2 \quad (3.4.7)$$

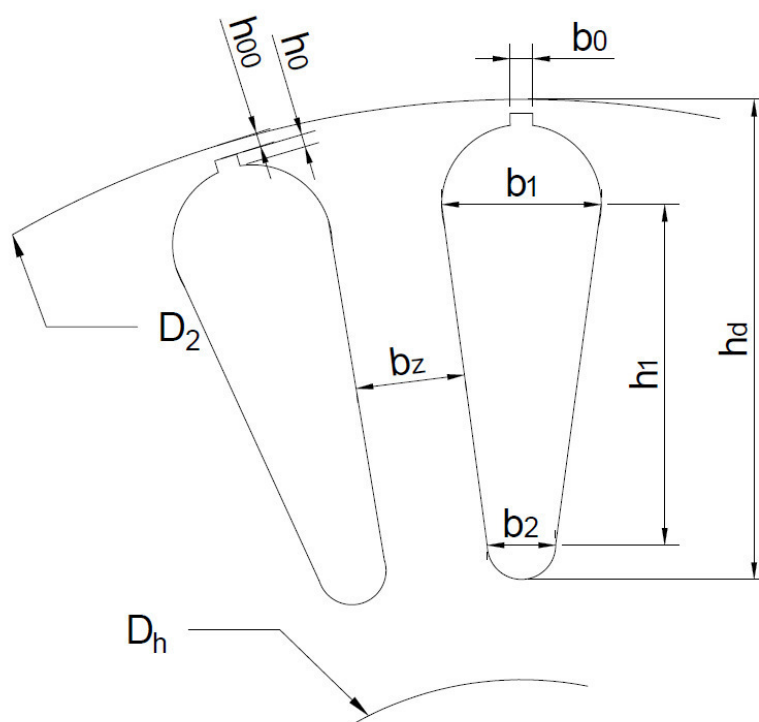
Činitel plnění drážky

$$K_T = \frac{\pi \cdot D_v^2 \cdot V'_d \cdot a}{4 \cdot S_d} = \frac{\pi \cdot 1^2 \cdot 30}{4 \cdot 74} = 0,61 \quad (3.4.8)$$

3.5 Rozměry drážek a zubů rotoru

Pro návrh rozměrů rotoru je potřeba si předem zvolit počet drážek na rotoru Q_2 . Je třeba vzít v úvahu, že do rotoru dochází k indukovaní vyšších harmonických, které ovlivňují průběh momentové charakteristiky momentovými sedly. Počet drážek na rotoru pro malé asynchronní motory se obvykle volí číslo menší než je počet drážek na statoru a nesmí být dělitelný počtem fází stroje. [1]

Dále je třeba vzít v potaz, že počet drážek na rotoru bude zabírat s polem indukovaným státorem, který je tvořen 36 drážkami a musí být společný pro volbu všech zvolených typů zapojení statorového vinutí v provedení počtu pólů $2p = 2, 4$ a 6 .



Obr.3.5.1: Rotorová drážka

Zvolený počet drážek rotoru $Q_2 = 26$

Vnější průměr rotoru

$$D_2 = D_1 - 2\delta = 0,136 - 2 \cdot 0,4 = 135,2 \text{ mm} \quad (3.5.1)$$

Délka rotoru

$$l_2 = l_1 = 94 \text{ mm} \quad (3.5.2)$$

Drážková rozteč

$$t_{d2} = \frac{\pi \cdot D_2}{Q_2} = \frac{\pi \cdot 135,2}{26} = 0,016 \text{ m} \quad (3.5.3)$$

Vnitřní průměr rotoru

Protože se jedná o malý asynchronní motor, tak rotorový svazek je přímo nasazen na hřídeli, tudíž vnitřní průměr rotoru je roven průměru hřídele, kde je třeba brát ohled na dostatečnou tloušťku hřídele, aby nedošlo k jejímu zkroucení vlivem působících momentů.

$$D_h = 0,23 \cdot D_e = 0,23 \cdot 0,2 = 45 \text{ mm} \quad (3.5.4)$$

Proud v tyči rotorové klece

Kde k_i je činitel přepočtu proudů zvolen $k_i = 0,9$

$$I_t = k_i \cdot I_{1N} \cdot p_i = 0,9 \cdot 9,8 \cdot 45 = 400 \text{ A} \quad (3.5.5)$$

Činitel převodu proudů

$$p_i = \frac{2 \cdot m_1 \cdot N_1 \cdot k_v}{Q_2} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 204 \cdot 0,958}{26} = 45 \quad (3.5.6)$$

Průřez tyče klece

J_2 je zvolená proudová hustota hliníku. Hliníkovou klec volíme z důvodu nízkých cenových nákladů na výrobu rotoru a menšího momentu setrvačnosti oproti kleci měděné. A také z důvodu technologické zvládnutelnosti odlévání klece. Hliník má oproti mědi nižší teplotu tání a při vstřikování hliníku do klece rotoru nedochází vlivem viskozity k nehomogenitám.

(3.5.7)

$$S_t = \frac{I_{N2}}{J_2} = \frac{400}{30 \cdot 10^6} = 133 \text{ mm}^2$$

Dovolená šířka zubu

$$b_{z2} = \frac{B_\delta \cdot t_{d2}}{B_{z2} \cdot k_{Fe}} = \frac{0,789 \cdot 16}{2 \cdot 0,97} = 6,7 \text{ mm} \quad (3.5.8)$$

Šířka rotorové drážky u krčku

$$b_1 = \frac{\pi \cdot (D_2 - 2h_0) - Q_2 \cdot b_{z2}}{\pi + Q_2} \quad (3.5.9)$$

$$b_1 = \frac{\pi \cdot (135,2 - 2 \cdot 0,7) - 26 \cdot 6,7}{\pi + 26} = 8,3 \text{ mm}$$

Šířka rotorové drážky u dna

Šířku rotorové drážky u dna volíme s ohledem na možnou technologickou proveditelnost, aby došlo k úplnému vyplnění drážky rotoru hliníkem. Proto je zvolena nejmenší možná doporučená šířka u dna drážky.

$$b_2 = 2,5 \text{ mm}$$

Hloubka drážky

$$h_1 = (b_1 - b_2) \cdot \frac{Q_2}{2\pi} = (8,3 - 2,5) \cdot \frac{26}{2\pi} = 24 \text{ mm} \quad (3.5.10)$$

Celková hloubka drážky

Rozměry drážky u krčku	$b_0 = 1,5 \text{ mm}$
	$h_0 = 0,7 \text{ mm}$
	$h_0' = 0,5 \text{ mm}$

$$h_{d2} = h_1 + \frac{b_2 - b_0}{2} + h_0 = 24 + \frac{2,5 - 1,5}{2} + 0,7 = 30 \text{ mm} \quad (3.5.11)$$

Skutečná plocha hliníkové tyče

$$\begin{aligned} S_t &= \frac{\pi}{8} (b_1^2 + b_2^2) + \frac{1}{2} (b_1 + b_2) h_1 \\ &= \frac{\pi}{8} \cdot (8,3^2 + 2,5^2) + 0,5 \cdot (8,3 + 2,5) \cdot 24 = 160 \text{ mm}^2 \end{aligned} \quad (3.5.12)$$

Proudová hustota tyče

$$J_t = \frac{I_{N2}}{S_t} = \frac{400}{160 \cdot 10^{-6}} = 2,5 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2} \quad (3.5.13)$$

Proud v kruhu nakrátko

$$I_{kn} = \frac{I_{N2}}{\Delta} = \frac{400}{0,47} = 830 \text{ A} \quad (3.5.14)$$

$$\text{kde } \Delta = 2 \cdot \sin \frac{\pi p}{Q_2} = 2 \cdot \sin \frac{\pi \cdot 4}{26} = 0,47$$

Průřez kruhu nakrátko

Proudová hustota v kruhu nakrátko se volí alespoň o 10 až 15 % menší než v tyčích rotoru, aby mezi tyčemi rotoru a kruhem nakrátko vznikl teplotní spád, a docházelo tak k lepšímu přenosu tepla vlivem vedení směrem ven ze stroje.

$$S'_{kn} = \frac{I_{kn}}{J_{kn}} = \frac{830}{2,15 \cdot 10^6} = 390 \text{ mm}^2 \quad (3.5.15)$$

Rozměry kruhů nakrátko

$$b_{kn} = 1,2 \cdot h_d = 1,2 \cdot 19 = 36 \text{ mm} \quad (3.5.16)$$

$$a_{kn} = \frac{S'_{kn}}{b_{kn}} = \frac{390}{36} = 10,5 \text{ mm} \quad (3.5.17)$$

$$S_{kn} = a_{kn} \cdot b_{kn} = 12 \cdot 23 = 390 \text{ mm}^2 \quad (3.5.18)$$

$$D_{kn} = D_2 - b_{kn} = 136,2 - 36 = 100 \text{ mm} \quad (3.5.19)$$

3.6 Dimenzování magnetického obvodu

Skutečná indukce v zubu statoru

$$B_{z1} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{d1} \cdot l_{Fe}}{b_{z1} \cdot l_{Fe} \cdot k_{Fe}} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{d1}}{b_{z1} \cdot k_{Fe}} = \frac{0,798 \cdot 0,0119}{0,0049 \cdot 0,97} = 2 \text{ T} \quad (3.6.1)$$

Skutečná indukce ve jhu statoru

$$B_{j1} = \frac{\phi}{2 \cdot h_{j1} \cdot l_{Fe} \cdot k_{Fe}} = \frac{0,0051}{2 \cdot 0,0175 \cdot 0,094 \cdot 0,97} = 1,6 \text{ T} \quad (3.6.2)$$

Skutečná indukce v zubu rotoru

$$B_{z2} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{d2} \cdot l_{Fe}}{b_{z2} \cdot l_{Fe} \cdot k_{Fe}} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{d2}}{b_{z2} \cdot k_{Fe}} = \frac{0,798 \cdot 0,016}{0,0067 \cdot 0,97} = 2 \text{ T} \quad (3.6.3)$$

Skutečná indukce ve jhu rotoru

$$B_{j2} = \frac{\phi}{2 \cdot h_{j2} \cdot l_{Fe} \cdot k_{Fe}} = \frac{0,0051}{2 \cdot 0,023 \cdot 0,094 \cdot 0,97} = 1,21 \text{ T} \quad (3.6.4)$$

Magnetické napětí ve vzduchové mezeře

$$U_{\delta} = \frac{2}{\mu_0} \cdot B_{\delta} \cdot \delta \cdot k_c = \frac{2}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot 0,798 \cdot 0,4 \cdot 10^{-3} \cdot 1,06 = 526 \text{ A} \quad (3.6.5)$$

Carterův činitel

$$k_c = \frac{t_{d1}}{(t_{d1} - \gamma \cdot \delta)} = \frac{0,0119}{(0,0119 - 1,61 \cdot 0,4)} = 1,06 \quad (3.6.6)$$

$$\gamma = \frac{\left(\frac{b_0}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{b_0}{\delta}} = \frac{\left(\frac{1,5}{0,4}\right)^2}{5 + \frac{1,5}{0,4}} = 1,61$$

Magnetické napětí v zubu statoru

$$U_{z1} = 2 \cdot h_d \cdot H_{z1} = 2 \cdot 14,5 \cdot 10^{-3} \cdot 2200 = 64 \text{ A} \quad (3.6.7)$$

Magnetické napětí Jha statoru

$$l_{j1} = \frac{\pi \cdot (D_{se} - h_{j1})}{2p} + h_{j1} = \frac{\pi \cdot (200 - 17,5)}{4} + 17,5 = 143 \text{ mm} \quad (3.6.8)$$

$$U_{j1} = l_{j1} \cdot H_{j1} = 143 \cdot 10^{-3} \cdot 900 = 129 \text{ A} \quad (3.6.9)$$

Magnetické napětí v zubu rotoru

$$h_{z2} = h_d - 0,1b_2 = 30 - 0,1 \cdot 2,5 = 29,75 \text{ mm} \quad (3.6.10)$$

$$U_{z2} = 2 \cdot h_{z2} \cdot H_{z2} = 2 \cdot 29,75 \cdot 10^{-3} \cdot 2200 = 134 \text{ A} \quad (3.6.11)$$

Magnetické napětí ve jhu rotoru

$$l_{j2} = \frac{\pi \cdot (D_h + h_{j2})}{2p} + h_{j2} = \frac{\pi \cdot (45 + 23)}{4} + 23 = 53 \text{ mm} \quad (3.6.12)$$

$$U_{j2} = l_{j2} \cdot H_{j2} = 53 \cdot 10^{-3} \cdot 109 = 5,8 \text{ A} \quad (3.6.13)$$

Magnetické napětí na pólpár

$$F_m = U_\delta + U_{z1} + U_{j1} + U_{z2} + U_{j2} \quad (3.6.14)$$

$$= 526 + 64 + 129 + 134 + 5,8 = 859 \text{ A}$$

Magnetizační proud

$$I_\mu = \frac{p \cdot F_m}{0,9 \cdot m_1 \cdot N_1 \cdot k_{v1}} = \frac{2 \cdot 859}{0,9 \cdot 3 \cdot 204 \cdot 0,958} = 3,25 \text{ A} \quad (3.6.15)$$

Magnetizační proud v poměru ke jmenovitému proudu

$$i_\mu = \frac{I_\mu}{I_N} = \frac{3,25}{9,8} = 0,33 \quad (3.6.16)$$

3.7 Náhradní parametry stroje

Odpor vinutí statoru

Střední délka závitu

$$l_{av} = 2 \cdot (l_{fe} + l_{\xi}) = 2 \cdot (94 + 164) = 515 \text{ mm} \quad (3.7.1)$$

Délka čela statorového vinutí

Kde B představuje výběh vinutí z drážky, volíme $B = 0,01\text{m}$
 k_{ξ} koeficient prodloužení čela vlivem izolace a vyvázání $k_{\xi} = 1,3$

$$l_{\xi} = k_{\xi} \cdot b_c + 2 \cdot B = 1,3 \cdot 0,118 + 2 \cdot 0,01 = 164 \text{ mm} \quad (3.7.2)$$

Délka vinutí

$$L = l_{av} \cdot N = 0,515 \cdot 204 = 105 \text{ m} \quad (3.7.3)$$

Odpor jedné fáze vinutí statoru

$$R_1 = \rho \cdot \frac{L}{S_{ef} \cdot a} = 0,0172 \cdot \frac{105}{1 \cdot 1} = 2,3 \Omega \quad (3.7.4)$$

Odpor klece rotoru

Odpor tyče rotoru

$$R_t = \rho \cdot \frac{l_t}{S_t} = 0,0314 \cdot \frac{0,094}{160} = 18,6 \mu\Omega \quad (3.7.5)$$

Odpor kruhu rotoru

$$R_{kn} = \rho \cdot \frac{\pi \cdot D_{kn}}{Q_2 \cdot S_{kn}} = 0,0290 \cdot \frac{\pi \cdot 0,1}{26 \cdot 0,00039} = 0,95 \mu\Omega \quad (3.7.6)$$

Odpor fáze rotorové klece

$$R_2 = R_t + 2 \cdot \frac{R_{kn}}{\Delta^2} = 18,6 + 2 \cdot \frac{0,95}{0,47^2} = 27 \mu\Omega \quad (3.7.7)$$

Kde

$$\Delta = 2 \sin \frac{\pi \cdot p}{Q_2}$$

Odpor rotoru přepočítaný na stator

$$R'_2 = R_2 \cdot \frac{4 \cdot m \cdot (N_1 \cdot k_{v1})^2}{Q_2} = 27 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{4 \cdot 3 \cdot (204 \cdot 0,958)^2}{26} = 0,48 \Omega \quad (3.7.8)$$

Rozptylová reaktance fáze statoru

$$\begin{aligned}
 X_{1\sigma} &= 15,8 \cdot \frac{f}{100} \cdot \left(\frac{N_1}{100}\right)^2 \cdot \left(\frac{l_1}{p \cdot q}\right) \cdot (\lambda_d + \lambda_{\xi} + \lambda_{dif}) = & (3.7.9) \\
 &= 15,8 \cdot \frac{50}{100} \cdot \left(\frac{204}{100}\right)^2 \cdot \left(\frac{0,094}{2 \cdot 3}\right) \cdot (3,19 + 1,03 + 1,38) = 2,34 \Omega
 \end{aligned}$$

Činitel magnetické vodivosti statorové drážky

$$\begin{aligned}
 \lambda_d &= \frac{h_3}{3 \cdot b} \cdot k_{\beta} + \left(\frac{h_2}{b} + \frac{3 \cdot h_1}{b + 2 \cdot b_0} + \frac{h_0}{b_0}\right) \cdot k'_{\beta} = & (3.7.10) \\
 &= \frac{30}{3 \cdot 5,4} \cdot 1 + \left(\frac{30}{5,4} + \frac{3 \cdot 24}{b + 2 \cdot 1,5} + \frac{0,7}{1,5}\right) = 2,13
 \end{aligned}$$

Činitel magnetické vodivosti čel vinutí statoru

$$\begin{aligned}
 \lambda_{\xi} &= 0,34 \cdot \frac{q}{p} \cdot (l_{\xi} - 0,64 \cdot \beta \cdot t_p) = & (3.7.11) \\
 &= 0,34 \cdot \frac{3}{2} \cdot (0,16 - 0,64 \cdot 1 \cdot 0,107) = 1,03
 \end{aligned}$$

Činitel magnetické vodivosti diferenčního rozptylu

$$\begin{aligned}
 \lambda_{dif} &= \frac{t_{d1}}{12 \cdot \delta \cdot k_c} \cdot \xi = \frac{0,0119}{12 \cdot 0,0004 \cdot 1,06} \cdot 0,59 = 1,6 & (3.7.12) \\
 \xi &= \left(2 \cdot \frac{t_{d2}}{t_{d1}} - \frac{t_{d1}}{t_{d2}} \cdot \Delta_z\right) k_{\beta} - k_{v1} \cdot \left(\frac{t_{d2}}{t_{d1}}\right)^2 = \\
 &= \left(2 \cdot \frac{16,3}{11,9} - \frac{16,3}{11,9} \cdot 0,8\right) - 0,958 \left(\frac{16,3}{11,9}\right)^2 = 0,59
 \end{aligned}$$

Rozptylová reaktance klece rotoru

$$\begin{aligned}
 X_{2\sigma} &= 7,9 \cdot f_1 \cdot l_2 \cdot (\lambda_d + \lambda_{\xi} + \lambda_{dif}) \cdot 10^{-3} & (3.7.13) \\
 &= 7,9 \cdot 50 \cdot 94 \cdot (3,19 + 0,27 + 1,63) \cdot 10^{-3} = 18,9 \text{ m}\Omega
 \end{aligned}$$

Rozptylová reaktance rotoru přepočítaná na stator

$$\begin{aligned}
 X'_{2\sigma} &= X_{2\sigma} \cdot p = X_{2\sigma} \cdot 4 \cdot m \cdot \frac{(N_1 \cdot k_{v1})^2}{Q_2} = & (3.7.14) \\
 &= 18,9 \cdot 10^{-3} \cdot 4 \cdot 3 \cdot \frac{(204 \cdot 0,958)^2}{26} = 3,35 \Omega
 \end{aligned}$$

Činitel magnetické vodivosti drážky rotoru

$$\begin{aligned}
 \lambda_d &= \left[\frac{h_1}{3 \cdot b} \left(1 - \frac{\pi \cdot b^2}{8 \cdot S_t}\right)^2 + 0,06 - \frac{b_0}{2 \cdot b} \right] k_d + \frac{h_0}{b_0} = & (3.7.15) \\
 &= \left[\frac{24}{3 \cdot 5,6} \left(1 - \frac{\pi \cdot 5,6^2}{8 \cdot 160}\right)^2 + 0,06 - \frac{1,5}{2 \cdot 5,6} \right] + \frac{0,5}{1,5} = 3,19 \Omega
 \end{aligned}$$

Činitel magnetické vodivosti čel klece rotoru

$$\begin{aligned}\lambda_{\xi} &= \frac{2,3 \cdot D_{kn}}{Q_2 \cdot l_i \cdot \Delta_2} \cdot \log \left(\frac{4,7 \cdot D_{kn}}{2 \cdot a_{kn} + b_{kn}} \right) = & (3.7.16) \\ &= \frac{2,3 \cdot 0,1}{26 \cdot 0,094 \cdot 0,5} \cdot \log \left(\frac{4,7 \cdot 0,1}{2 \cdot 0,01 + 0,03} \right) = 0,027 \\ \Delta_2 &= 2 \cdot \sin \left(\frac{\pi \cdot p}{Q_2} \right) = 2 \cdot \sin \left(\frac{\pi \cdot 2}{26} \right) = 0,5\end{aligned}$$

Činitel diferenčního rozptylu rotorové klece

$$\begin{aligned}\lambda_{dif} &= \frac{t_{d2}}{12 \cdot \delta \cdot k_c} \cdot \xi = \frac{0,0163}{12 \cdot 0,0004 \cdot 1,06} \cdot 0,509 = 1,64 & (3.7.17) \\ \xi &= 1 + \frac{1}{5} \cdot \left(\frac{\pi \cdot p}{Q_2} \right) - \frac{\Delta_z}{1 - \left(\frac{p}{Q_2} \right)^2} = 1 + \frac{1}{5} \cdot \left(\frac{\pi \cdot 2}{26} \right) - \frac{0,5}{1 + \left(\frac{2}{26} \right)^2} = 0,509\end{aligned}$$

Odpor magnetického obvodu železa

$$R_{Fe} = \frac{\Delta P_{Fe}}{m \cdot I_{\mu}^2} = \frac{53}{3 \cdot 3,25^2} = 2215 \Omega \quad (3.7.18)$$

Magnetizační reaktance asynchronního motoru

$$X_{\mu} = \frac{U_i}{I_{\mu}} = \frac{198}{3,25} = 61 \Omega \quad (3.7.19)$$

Indukované napětí

$$U_i = U_{1N} - \sqrt{(R_1^2 + X_{1\sigma}^2)} \cdot I_{1N} = 231 - \sqrt{(2,3^2 + 2,34^2)} \cdot 9,8 = 198 V \quad (3.7.20)$$

3.8 Stanovení ztrát ve stroji

Ztráty v magnetickém obvodu

$$\begin{aligned} \Delta P_{FEh} &= \Delta p_{1,0} \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^\beta \cdot (k_{dj} \cdot B_{j1}^2 \cdot m_{j1} + k_{dz} \cdot B_{z1}^2 \cdot m_{z1}) = & (3.8.1) \\ &= 1,3 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^1 \cdot (1,6 \cdot 1,6^2 \cdot 7,13 + 1,8 \cdot 2^2 \cdot 1,81) = 42 \text{ W} \end{aligned}$$

Pro stanovení ztrát v magnetickém obvodu stroje je důležité nejdříve vyčíslit hmotnosti jednotlivých dílů magnetického obvodu na statoru i rotoru.

Hmotnost jha statoru

$$\begin{aligned} m_{j1} &= \frac{\pi}{4} \cdot (D_e^2 - (D_e - 2 \cdot h_{j1})^2) \cdot l_{FE} \cdot \rho_{FE} = & (3.8.2) \\ &= \frac{\pi}{4} \cdot (0,2^2 - (0,2 - 2 \cdot 0,0175)^2) \cdot 0,94 \cdot 7800 = 7,13 \text{ kg} \end{aligned}$$

Hmotnost zubů statoru

$$\begin{aligned} m_{z1} &= h_{z1} \cdot b_{z1} \cdot Q_1 \cdot l_{FE} \cdot \rho_{FE} = & (3.8.3) \\ &= 14,5 \cdot 4,9 \cdot 36 \cdot 0,094 \cdot 7800 = 1,81 \text{ kg} \end{aligned}$$

Hmotnost jha rotoru

$$\begin{aligned} m_{j2} &= \frac{\pi}{4} \cdot (D_2^2 - (D_2 - 2 \cdot D_h)^2) \cdot l_{Fe} \cdot \rho_{FE} = & (3.8.4) \\ &= \frac{\pi}{4} \cdot (0,1352^2 - (0,1352 - 2 \cdot 0,045)^2) \cdot 0,094 \cdot 7800 = 9,3 \text{ kg} \end{aligned}$$

Hmotnost zubů rotoru

$$\begin{aligned} m_{z2} &= Q_2 \cdot h_{z2} \cdot b_{z2} \cdot l_{Fe2} \cdot k_{Fe} \cdot \rho_{FE} = & (3.8.5) \\ &= 26 \cdot 30,5 \cdot 6,7 \cdot 0,094 \cdot 0,97 \cdot 7800 = 3,78 \text{ kg} \end{aligned}$$

Povrchové ztráty

Amplituda pulzací indukce ve vzduchové mezeře nad zuby

$$\begin{aligned} B_{0i} &= \beta_0 \cdot k_c \cdot B_\delta & (3.8.6) \\ B_{01} &= 0,3 \cdot 1,06 \cdot 0,798 = 0,25 \text{ T} \\ B_{02} &= 0,32 \cdot 1,06 \cdot 0,798 = 0,27 \text{ T} \end{aligned}$$

Hustota povrchových ztrát

$$\begin{aligned} p_{\delta pi} &= 0,5 \cdot k_{oi} \cdot \left(\frac{Q_i \cdot n}{10000}\right)^{1,5} \cdot (B_{0i} \cdot t_{dX} \cdot 10^3)^2 & (3.8.7) \\ p_{\delta p1} &= 0,5 \cdot 1,6 \cdot \left(\frac{36 \cdot 1500}{10000}\right)^{1,5} \cdot (0,25 \cdot 0,0119 \cdot 10^3)^2 = 111 \text{ W/m}^2 \\ p_{\delta p2} &= 0,5 \cdot 1,6 \cdot \left(\frac{26 \cdot 1500}{10000}\right)^{1,5} \cdot (0,27 \cdot 0,0166 \cdot 10^3)^2 = 109 \text{ W/m}^2 \end{aligned}$$

Celkové povrchové ztráty

$$\begin{aligned}\Delta P_{\delta pi} &= p_{\delta pi} \cdot (t_{di} - b_{oi}) \cdot Q_i \cdot l_{FEi} & (3.8.8) \\ \Delta P_{\delta p1} &= 111 \cdot (0,0119 - 0,0015) \cdot 36 \cdot 0,094 = 4 \text{ W} \\ \Delta P_{\delta p2} &= 109 \cdot (0,0166 - 0,0015) \cdot 26 \cdot 0,094 = 4 \text{ W}\end{aligned}$$

Jouleovo ztráty ve všech fázích stroje

Jouleovo ztráty ve vinutí statoru

$$\Delta P_{j1} = m_1 \cdot R_1 \cdot I_1^2 = 3 \cdot 2,3 \cdot 9,8^2 = 663 \text{ W} \quad (3.8.9)$$

Jouleovo ztráty v kleci nakrátko rotoru

$$\Delta P_{j2} = m_2 \cdot R_2 \cdot I_2^2 = 26 \cdot 27 \cdot 10^{-6} \cdot 400^2 = 111 \text{ W} \quad (3.8.10)$$

Mechanické a ventilační ztráty

$$\begin{aligned}\Delta P_{mech} &= K_T \cdot \left(\frac{n}{1000}\right)^2 \cdot (10 \cdot D_e)^3 = & (3.8.11) \\ &= 4 \cdot \left(\frac{1500}{1000}\right)^2 \cdot (10 \cdot 0,2)^3 = 144 \text{ W}\end{aligned}$$

Celkové ztráty ve stroji

$$\begin{aligned}\Delta P &= \Delta P_{FE} + \Delta P_j + \Delta P_{mech} + \Delta P_{přid} = & (3.8.12) \\ &= 53 + 663 + 73 + 111 + 144 = 972 \text{ W}\end{aligned}$$

Účinnost stroje

$$\eta = 1 - \frac{\Delta P}{P_1} = 1 - \frac{972}{6500} = 0,85 \quad (3.8.13)$$

Jmenovitý skluz

$$s_n = R'_2 \cdot \frac{I_1}{U_{f1}} = 0,47 \cdot \frac{9,8}{231} = 0,019 \quad (3.8.14)$$

Jmenovité otáčky stroje

$$n_2 = n_1 \cdot (1 - s_n) = 1500 \cdot (1 - 0,019) = 1470 \text{ ot./min} \quad (3.8.15)$$

Jmenovitý moment stroje

$$M_n = \frac{P_2}{\omega_2} = \frac{5500}{153,2} = 35,9 \text{ Nm} \quad (3.8.16)$$

3.9 Kontrola oteplení stroje

Oteplení statoru nad teplotu vzduchu uvnitř motoru

$$\Delta\vartheta_{pov1} = K \cdot \frac{\Delta P'_{jd1} + \Delta P_{Feh}}{\pi \cdot D_1 \cdot l_{Fe} \cdot \alpha_1} = 0,2 \cdot \frac{259 + 42}{\pi \cdot 0,2 \cdot 0,094 \cdot 108} = 14^\circ\text{C} \quad (3.9.1)$$

Oteplení povrchu čel nad teplotu vzduchu uvnitř motoru

$$\Delta\vartheta_{povč1} = \frac{K \cdot \Delta P_{jč1}}{2 \cdot \pi \cdot D \cdot \alpha_1 \cdot l_{v1}} = \frac{0,2 \cdot 451}{2 \cdot \pi \cdot 0,2 \cdot 108 \cdot 0,5} = 19^\circ\text{C} \quad (3.9.2)$$

Jouleovo ztráty v drážkové části cívek

$$\Delta P'_{jd1} = k_\rho \cdot \Delta P_{j1} \cdot \frac{2 \cdot l_{Fe}}{l_{av}} = 1,07 \cdot 663 \cdot \frac{2 \cdot 0,094}{0,5} = 259 \text{ W} \quad (3.9.3)$$

Jouleovo ztráty v čelech cívek

$$\Delta P'_{jč1} = k_\rho \cdot \Delta P_{j1} \cdot \frac{2 \cdot l_{č1}}{l_{av}} = 1,07 \cdot 663 \cdot \frac{2 \cdot 0,16}{0,5} = 451 \text{ W} \quad (3.9.4)$$

Teplotní spád v izolaci drážkové části

$$\begin{aligned} \Delta\vartheta_{id1} &= \frac{\Delta P_{jd1}}{Q_1 \cdot Q_2 \cdot l_{Fe}} \cdot \left(\frac{b_i}{\lambda_i} + \frac{b_1 + b_2}{16 \cdot \lambda_{ekv}} \right) = \\ &= \frac{259}{36 \cdot 26 \cdot 0,094} \cdot \left(\frac{0,0004}{0,16} + \frac{9,5 + 7,6}{16 \cdot 1,1} \right) = 5,7^\circ\text{C} \end{aligned} \quad (3.9.5)$$

Obvod cívek v drážkové části a čelech vinutí

$$O_d = O_\zeta = 2 \cdot h_d + b_1 + b_2 = 46 \text{ mm} \quad (3.9.6)$$

Teplotní spád na izolaci čel

$$\Delta T_{povč} = \frac{K \cdot \Delta P_{jč1}}{2 \cdot \pi \cdot D \cdot \alpha_1 \cdot l_{v1}} = \frac{0,2 \cdot 451}{2 \cdot \pi \cdot 0,2 \cdot 108 \cdot 0,5} = 1^\circ\text{C} \quad (3.9.7)$$

Střední oteplení statorového vinutí

$$\begin{aligned} \Delta\vartheta'_1 &= \frac{(\Delta\vartheta_{pov1} + \Delta\vartheta_{id1}) \cdot 2 \cdot l_{Fe}}{l_{av1}} + \frac{(\Delta\vartheta_{ič1} + \Delta\vartheta_{povč1}) \cdot 2 \cdot l_{č1}}{l_{av1}} = \\ &= \frac{(14 + 5,7) \cdot 2 \cdot 0,094}{0,5} + \frac{(19 + 1) \cdot 0,16}{0,5} = 19,6^\circ\text{C} \end{aligned} \quad (3.9.8)$$

Oteplení vzduchu ve stroji nad teplotu okolí

$$\Delta\vartheta_v = \frac{\sum\Delta P'_v}{S_{těl} \cdot \alpha_v} = \frac{\sum\Delta P' - (1 - K) \cdot (\Delta P'_{jd1} + \Delta P_{Feh}) - 0,9 \cdot \Delta P_{mech}}{(\pi \cdot D_e + 8 \cdot O_z) \cdot (l_{Fe} + 2 \cdot l_{v1}) \cdot \alpha_v} = \quad (3.9.9)$$

$$= \frac{656 - (1 - 0,2) \cdot (259 + 42) - 0,9 \cdot 144}{(\pi \cdot 0,2 + 8 \cdot 0,046) \cdot (0,094 + 2 \cdot 0,05) \cdot 20} = 50 \text{ } ^\circ\text{C}$$

kde

$$\begin{aligned} \sum\Delta P' &= \sum\Delta P + (k_p - 1)(\Delta P_{j1} \cdot \Delta P_{j2}) = \quad (3.9.10) \\ &= 1026 + (1,07 - 1)(663 + 111) = 656 \text{ W} \end{aligned}$$

Střední oteplení statorového vinutí nad teplotu okolí

$$\Delta\vartheta_1 = \Delta\vartheta'_1 + \Delta\vartheta_v = 19,6 + 50 = 70^\circ\text{C} \quad (3.9.11)$$

Potřebný průtok vzduchu pro ventilaci

$$Q_v = \frac{m \cdot \sqrt{D_e \cdot \frac{n}{100}} \cdot \sum\Delta P'_v}{1100 \cdot \Delta\vartheta_v} = \frac{3 \cdot \sqrt{0,2 \cdot \frac{1500}{100}} \cdot 656}{1100 \cdot 50} = 0,051 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \quad (3.9.12)$$

Průtok vzduchu vnějším ventilátorem

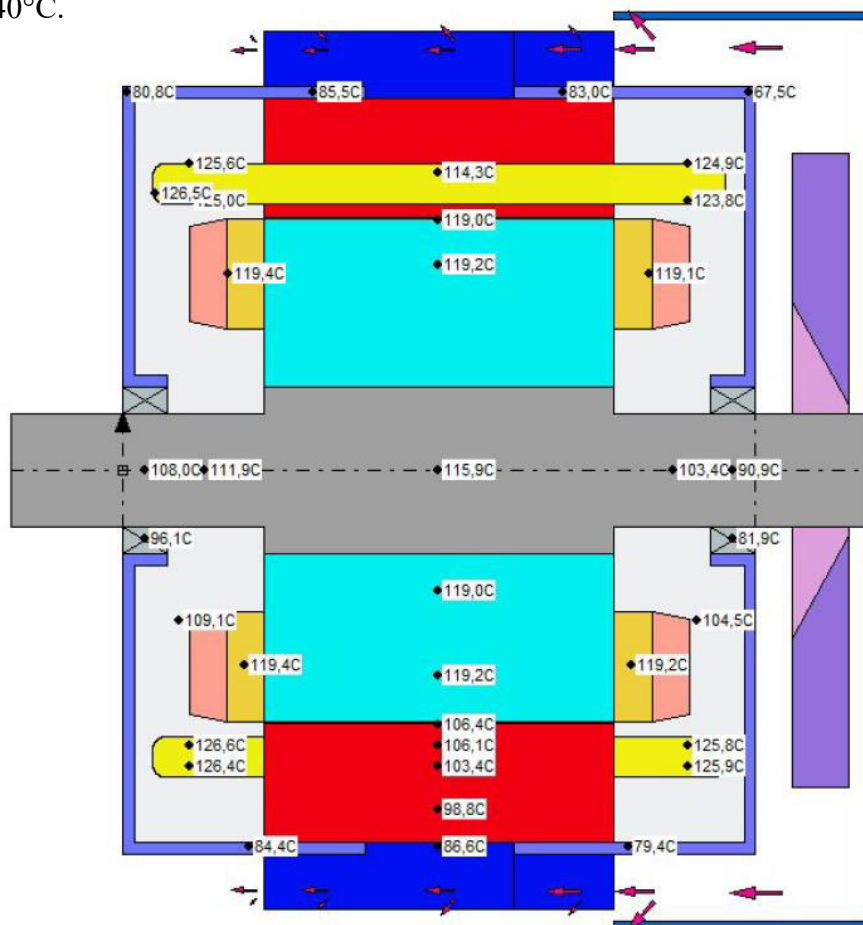
$$Q = 0,6 \cdot D_e^3 \cdot \frac{n}{100} = 0,6 \cdot 0,2^3 \cdot \frac{1500}{100} = 0,072 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \quad (3.9.13)$$

Návrh stroje byl proveden dle literatury [1].

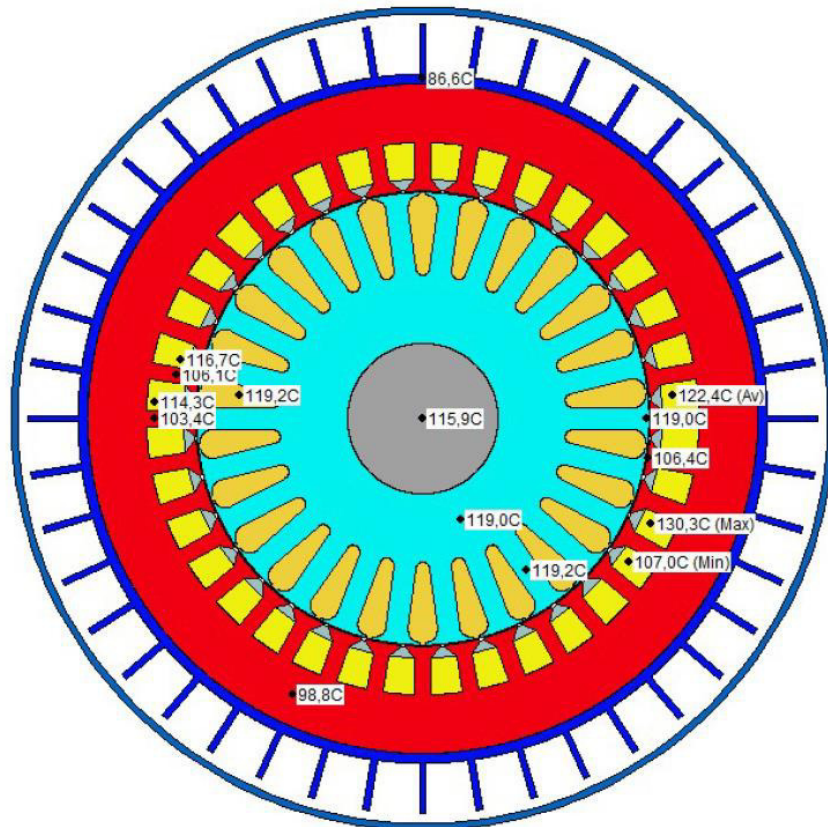
3.10 Kontrola oteplení softwarem MotorCAD

Ověření oteplení stroje, tak aby vyhovoval zvolené izolaci vinutí třídy F bylo provedeno v softwaru Motor CAD, který je součástí produktu Motor Design a využívá odborné znalosti v oblasti návrhu elektrických motorů, aby poskytl software a podporu návrhářům elektrických strojů u některých z nejprestižnějších firem na světě, jako je řešení tepelných problémů až po kompletní návrh elektromotoru pro různé a složité průmyslové aplikace. [6]

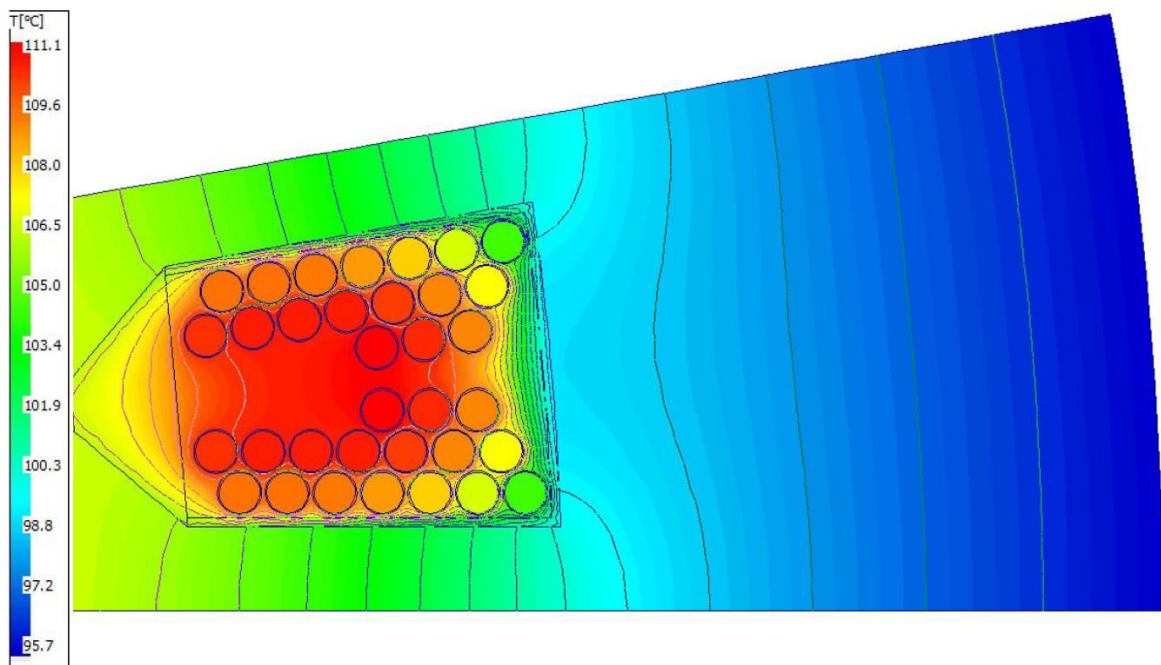
Definice rozměrových parametrů modelu byla pro elektromagnetický obvod nastavena dle výpočtů provedených v kapitole 3. Vstupní hodnoty pro výpočet oteplení v jednotlivých částech stroje byly zvoleny dle získaných výsledků ztrát ve vinutí a magnetickém obvodu stroje. Konstrukční prvky jsou sjednoceny s parametrizovaným modelem, ale nebyly podrobeny přesnějšímu dimenzování. Přesto bylo dosaženo výsledných oteplení dle obr.3.10.1-3, ze kterých je názorně vidět, že hodnoty oteplení nepřekročily maximální požadované oteplení stroje 155°C a je zde navíc rezerva pro mírné přetížení stroje nebo zhoršení klimatických podmínek. Teplota v okolí stroje byla standardně zvolena na 40°C.



Obr.3.10.1: Podélný řez stroje



Obr. 3.10.2: Příčný řez stroje



Obr. 3.10.3 Oteplení statorové drážky

3.11 Návrh vinutí statoru

Vinutí všech strojů navrhované řady je provedené v podobě jednovrstvého, sériově zapojeného vinutí. V případě dvoupólového, čtyřpólového provedení stroje je vinutí rozstříháno na šest matematických fází. Činitel kroku vinutí je pro jednoduchost navíjení roven jedné. To má důsledek zvýšení diferenčního rozptylu a nižšího potlačení vyšších harmonických. Pilové schéma zapojení vinutí je uvedeno v příloze 2.

Vstupní parametry

Počet drážek	$Q = 36$
Počet fází	$m = 3$
Matematický počet fází	$m' = 6$
Vinutí jednovrstvé	$2u = 1$

Návrh vinutí pro dvoupólový stroj

Počet cívek

$$K = Q \cdot u = 36 \cdot 0,5 = 18 \quad (3.11.1)$$

Počet cívek na pól a fázi

$$q = \frac{Q_1}{2p \cdot m} = \frac{36}{2 \cdot 3} = 6 \quad (3.11.2)$$

Počet cívek na fázi

$$Q_f = \frac{Q}{m} = \frac{36}{3} = 12 \quad (3.11.3)$$

Počet cívek na pól

$$Q_p = \frac{Q}{2p} = \frac{36}{2} = 18 \quad (3.11.4)$$

Přední cívkový

$$y_1 = y_{1d} = 18 \quad (3.11.5)$$

Počet svazků cívek

$$S_c = m' \cdot a = 6 \cdot 1 = 6 \quad (3.11.6)$$

Počet cívek na fázi

$$S_f = \frac{S_c}{m} = \frac{6}{3} = 2 \quad (3.11.7)$$

Počet cívek ve svazku

$$K_1 = \frac{K}{S_c} = \frac{18}{6} = 3 \quad (3.11.8)$$

Návrh vinutí pro čtyřpólový stroj

Počet cívek na pól a fázi

$$q = \frac{Q_1}{2p \cdot m} = \frac{36}{4 \cdot 3} = 3 \quad (3.11.9)$$

Počet cívek na pól

$$Q_p = \frac{Q}{2p} = \frac{36}{4} = 9 \quad (3.11.10)$$

Přední cívkový

$$y_1 = y_{1d} = 9 \quad (3.11.11)$$

Počet svazků cívek

$$S_c = m' \cdot a = 6 \cdot 1 = 6 \quad (3.11.12)$$

Počet cívek na fázi

$$S_f = \frac{S_c}{m} = \frac{6}{3} = 2 \quad (3.11.13)$$

Počet cívek ve svazku

$$K_1 = \frac{K}{S_c} = \frac{18}{6} = 3 \quad (3.11.14)$$

Návrh vinutí pro šestipólový stroj

Počet cívek na pól a fázi

$$q = \frac{Q_1}{2p \cdot m} = \frac{36}{6 \cdot 3} = 2 \quad (3.11.15)$$

Počet cívek na pól

$$Q_p = \frac{Q}{2p} = \frac{36}{6} = 6 \quad (3.11.16)$$

Přední cívkový

$$y_1 = y_{1d} = 6 \quad (3.11.17)$$

Počet svazků cívek na fázi

$$S_c = m' \cdot a = 6 \cdot 1 = 6 \quad (3.11.18)$$

Počet cívek na fázi

$$S_f = \frac{S_c}{m} = \frac{6}{3} = 2 \quad (3.11.19)$$

Počet cívek ve svazku

$$K_1 = \frac{K}{S_c} = \frac{18}{6} = 3 \quad (3.11.20)$$

4 Porovnání náhradních parametrů stroje

Tato kapitola je věnována porovnání shodnosti parametrů mezi analytickým výpočtem na základě rozměrů získaných výpočtem dle [1] ve srovnání s výsledky získanými analytickým výpočtem softwaru RMxprt. Který je nadstavbou softwaru Ansys pro 3D modelování metodou FEM.

Náhradní parametry	Značka	Jednotky	Analytický výpočet	RMxprt
Odpor vinutí statoru	R_1	Ω	2,30	2,33
Rozptylová reaktance statoru	$X_{1\delta}$	Ω	2,34	2,30
Odpor klece rotoru	R'_2	Ω	0,47	0,41
Rozptylová reaktance rotoru	$X_{2\delta}$	Ω	3,36	3,16
Magnetizační reaktance	X_μ	Ω	61,1	67,5
Odpor ztrát v železe	R_{Fe}	$k\Omega$	2,215	2,211
Jmenovitý proud statoru	I_{1N}	A	9,8	10,4
Magnetizační proud	I_μ	A	3,25	2,94
Jmenovitý moment	M_N	Nm	36,9	32,6
Účinnost	η	%	85	84

Tab.4.1: Porovnání náhradních parametrů

Po sjednocení použitých materiálů na vodiče a plechů Sura 350-50A dle přílohy 1 a provozní teploty, bylo dosaženo přesnosti výsledků do 10% dle přiložené tabulky 4.1. Do výpočtového softwaru byly zahrnuty jednotlivé rozměry stroje s respektováním rozměrů drážek a klece rotoru. Rozdíl mezi výpočty je způsoben rozdílnou aproximací magnetizační charakteristiky. A především definice čel statorového vinutí stroje, která je pro jednoduchost softwarem automaticky vygenerována, přesto bylo dosaženo poměrně velké přesnosti výsledků. Největší rozdíl výsledků vznikl u magnetizační reaktance X_μ , který je způsoben přesností výpočtu střední hodnoty magnetické indukce při jmenovitém stavu stroje v zubech statoru a rotoru.

5 Porovnání magnetických indukcí stroje

	Značka	Navrhovaná indukce ve stavu naprázdno	Analytická kontrola indukce ve stavu naprázdno	Střední hodnota indukce ve jmenovitém stavu z RMxprt
Magnetická indukce v zubu statoru	B_{z1} (T)	2,00	2,00	1,68
Magnetická indukce ve jhu statoru	B_{j1} (T)	1,65	1,60	1,45
Magnetická indukce v zubu rotoru	B_{z2} (T)	2,00	2,00	1,69
Magnetická indukce ve jhu rotoru	B_{j2} (T)	1,50	1,20	0,71

Tab. 5.1: Porovnání magnetických indukcí

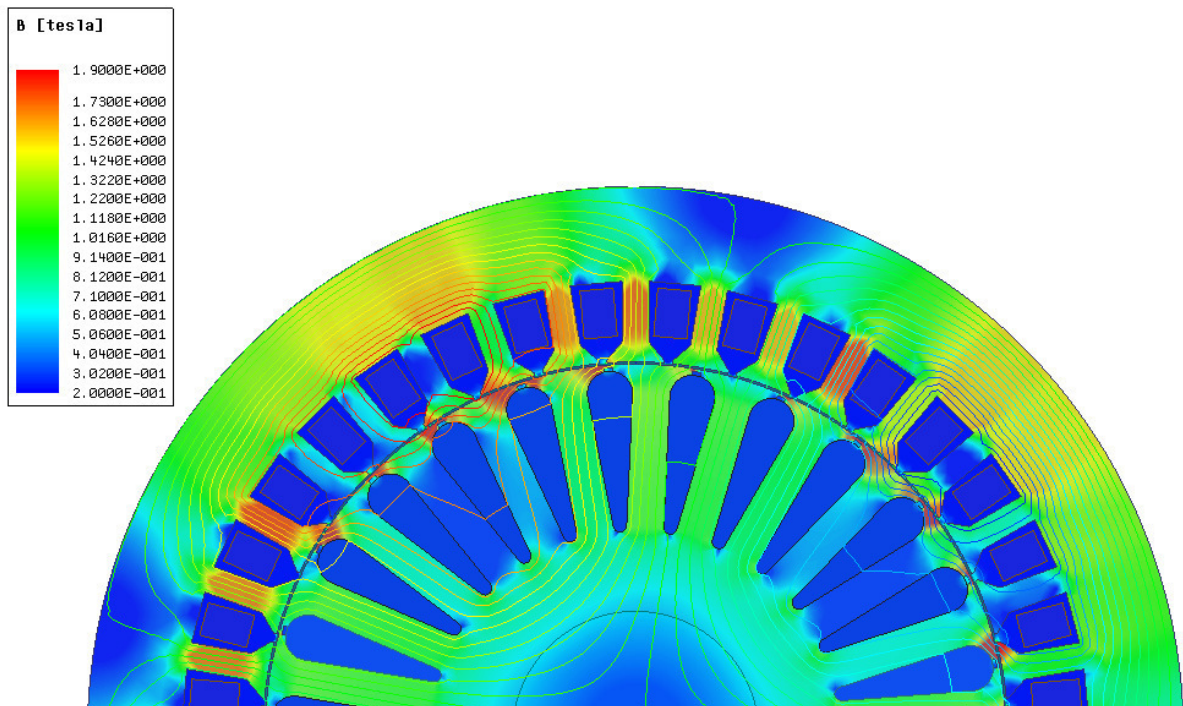
Pro návrh magnetického obvodu se volí magnetické indukce v jednotlivých částech obvodu pro poměrně velké přesycení zubů statoru a rotoru, to znamená, že se volí hodnota magnetické indukce až za ohybem lineární částí magnetizační křivky z přílohy 2. Tudíž pak dochází ke zploštění křivky základní harmonické, proto se při výpočtech zavádí činitel tvaru pole $k_B = 1,11$. Ovšem je nutné zvolit takovou hodnotu, aby ve jmenovitém stavu nedocházelo k příliš velkým ztrátám v magnetickém obvodu vlivem přesycení. Magnetické indukce v jednotlivých částech jsou zvoleny dle tabulky 5.

Zpětným výpočtem ze získaných rozměrů zubů byla provedena kontrola velikostí jednotlivých indukcí. Vzhledem k volbě paralelních zubů na statoru i rotoru nedochází k téměř žádné chybě ve výpočtu.

Hodnota kontroly magnetické indukce ve jhu rotoru je silně ovlivněna volbou velikostí hřídele a také typem použitého materiálu pro hřídel. Pro námi navrhovanou řadu byla zvolena hřídel z magnetické oceli, tudíž se přes ní uzavírá část magnetického toku ve jhu rotoru.

Další kontrola velikosti magnetické indukce byla provedena softwarem RMxprt pro jmenovitý stav stroje. Získané hodnoty jsou uvedeny v tab.5.

Pro grafické zobrazení indukce a indukčních čar byl použit software Ansys pro numerické modelování magnetických polí. Pro výstupní 2D zobrazení stroje společně s rozměry a výslednými hodnotami byly použity výsledky ze softwaru RMxprt.



Obr.5.1: Grafické zobrazení magnetického pole stroje

Pro grafickou kontrolu citlivostní analýzou byl zvolen čtyřpólový stroj, který je uveden v názorném výpočtu stroje v kapitole 3, tomu také odpovídá rozložení magnetických indukčních toků. Z analýzy je zřetelné, že při jmenovitém chodu stroje dochází pouze k lokálnímu přesycování krčků zubů.

6 Navržená řada asynchronních motorů

			2P = 2								
			D1			D2			D3		
Typ Průměru			S	M	L	S	M	L	S	M	L
Délka stroje			S	M	L	S	M	L	S	M	L
P (kW)			1,5	2,2	3	5,5	7,5	11	15	-	-
Popis			D12S	D12M	D12L	D22S	D22M	D22L	D32S	-	-
Jmenovité parametry											
Jmenovité otáčky	n ₂	min ⁻¹	2720	2798	2840	2905	2924	2942	2956	-	-
Účinnost	η	%	64	72	77	76	81	85	82	-	-
Jmenovitý proud při U _n	I _{1N}	A	2,7	3,9	5,4	9,8	13,4	19,6	26,7	-	-
Jmenovitý moment	M _N	Nm	3	6	9	16	23	36	47	-	-
Účinník	cosφ	-	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	-	-
Náhradní parametry											
Odpor statoru	R ₁	Ω	24,0	11,5	6,4	3,3	1,8	0,9	0,7	-	-
Rozptylová reaktance statoru	X _{1σ}	Ω	14,7	7,4	4,4	2,9	1,8	1,0	1,0	-	-
Odpor rotoru	R' ₂	Ω	8,00	3,90	2,30	0,74	0,44	0,22	0,13	-	-
Rozptylová reaktance rotoru	X _{2σ}	Ω	7,1	4,5	3,2	1,8	1,3	0,8	0,7	-	-
Magnetizační reaktance	X _μ	Ω	260	200	158	100	77	54	45	-	-
Odpor ztrát v železe	R _{fe}	Ω	6740	6000	5000	2740	2220	1630	1125	-	-

			2P = 4								
			D1			D2			D3		
Typ Průměru			S	M	L	S	M	L	S	M	L
Délka stroje			S	M	L	S	M	L	S	M	L
P (kW)			-	1,5	2,2	3	5,5	7,5	11	15	-
Popis			-	D14M	D14L	D24S	D24M	D24L	D34S	D34M	-
Jmenovité parametry											
Jmenovité otáčky	n ₂	min ⁻¹	-	1430	1440	1462	1470	1450	1481	1483	-
Účinnost	η	%	-	76	80	79	85	80	87	89	-
Jmenovitý proud při U _n	I _{1N}	A	-	2,7	3,9	5,3	9,8	13,4	19,6	26,7	-
Jmenovitý moment	M _N	Nm	-	9	14	18	36	46	73	102	-
Účinník	cosφ	-	-	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	-
Náhradní parametry											
Odpor statoru	R ₁	Ω	-	15,7	8,1	6,3	2,3	1,4	0,9	0,6	-
Rozptylová reaktance statoru	X _{1σ}	Ω	-	8,9	5,3	5,0	2,3	1,6	1,4	0,9	-
Odpor rotoru	R' ₂	Ω	-	4,00	2,37	1,08	0,48	0,32	0,14	0,10	-
Rozptylová reaktance rotoru	X _{2σ}	Ω	-	12,9	8,5	6,3	3,4	2,4	1,8	1,3	-
Magnetizační reaktance	X _μ	Ω	-	173	124	104	61	45	36	27	-
Odpor ztrát v železe	R _{fe}	Ω	-	6890	5260	3615	2215	1680	1100	840	-

		2P = 6									
Typ Průměru		D1			D2			D3			
Délka stroje		S	M	L	S	M	L	S	M	L	
P (kW)		-	-	1,5	2,2	3	5,5	7,5	11	15	
Popis		-	-	D16L	D26S	D26M	D26L	D36S	D36M	D36L	
Jmenovité parametry											
Jmenovité otáčky	n2	min-1	-	-	955	972	977	976	985	986	986
Účinnost	η	%	-	-	83	79	83	86	80	83	85
Jmenovitý proud při Un	I1N	A	-	-	5,4	3,9	5,4	9,8	13,4	19,6	26,7
Jmenovitý moment	MN	Nm	-	-	29	20	29	55	68	103	146
Účinník	cos ϕ	-	-	-	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83
Náhradní parametry											
Odpor statoru	R1	Ω	-	-	5,0	9,4	5,2	2,3	2,8	1,6	1,0
Rozptylová reaktance statoru	X1 σ	Ω	-	-	4,6	8,3	4,9	3,0	1,4	0,8	0,6
Odpor rotoru	R'2	Ω	-	-	1,93	1,64	0,98	0,56	0,24	0,16	0,12
Rozptylová reaktance rotoru	X2 σ	Ω	-	-	9,0	13,0	7,9	5,0	3,8	2,5	2,0
Magnetizační reaktance	X μ	Ω	-	-	64	98	68	42	27	19	15
Odpor ztrát v železe	Rfe	Ω	-	-	2615	3447	3236	1570	1080	795	611

Tab.6.1: Navržená řada asynchronních motorů

Navrhovanou řadu strojů se dle zadání podařilo realizovat do třech zvolených průměrů strojů označených v tabulce 5 symboly D1, 2 a 3, které jsou vždy realizovány v provedení short, medium a long, toho se dosahuje rozdílným počtem plechů statorového a rotorového svazku, podle potřeby požadovaného výkonu na hřídeli. Pro návrh strojů o zvoleném průměru se nejdříve zvolí stroj, který nejvíce respektuje škálu požadovaných výkonů a počtu pólů. Po zachování potřebných rozměrů drážek statoru a rotoru se od něj odvíjí ostatní délky strojů v daném průměru pro dosažení vyššího či nižšího výkonu a počtu otáček.

Z tabulky je vidět, že pro všechny typy strojů byl zachován stejný magnetický tok, tudíž stejný účinník, poměr činného a zdánlivého výkonu. Toho bylo dosaženo rozdílným počtem závitů a průměru vodiče v drážkách vinutí stroje. Aby bylo zachováno sycení stroje. Tudíž drážky jsou pro jeden typ průměru shodné, ale liší se jejich činitel plnění. Vodiče v drážkách byly voleny dle normy ČSN EN 60317-01.

Podle účinnosti jednotlivých strojů lze soudit, že pokud dochází k prodlužování stroje, dochází k nárůstu drážkové části stroje, a tudíž ke zvyšování účinnosti od středu navrhované řady. Naproti tomu, stroje s krátkou drážkovou částí mají již velmi vysoký podíl čel vinutí a dochází u nich ke značnému snížení účinnosti. To je poté vhodné dostatečně optimalizovat pro konkrétní a rozměrové omezení řady asynchronních motorů.

7 Parametrizovaný model asynchronního motoru

Pro parametrizaci modelu asynchronního motoru byl použit software SolidWorks pro platformu Windows pro 3D modelování a konstruování. V SolidWorksu byl nakreslen model celého stroje. Stator a rotor odpovídají rozměrům navrženým pro danou řadu asynchronních motorů, ostatní konstrukční součásti jsou také parametrizované, ale nejsou předmětem řešení výpočtu konstrukčních částí, tudíž slouží jen ilustrativně, přesto jsou jejich rozměry také parametrizovány. [7]

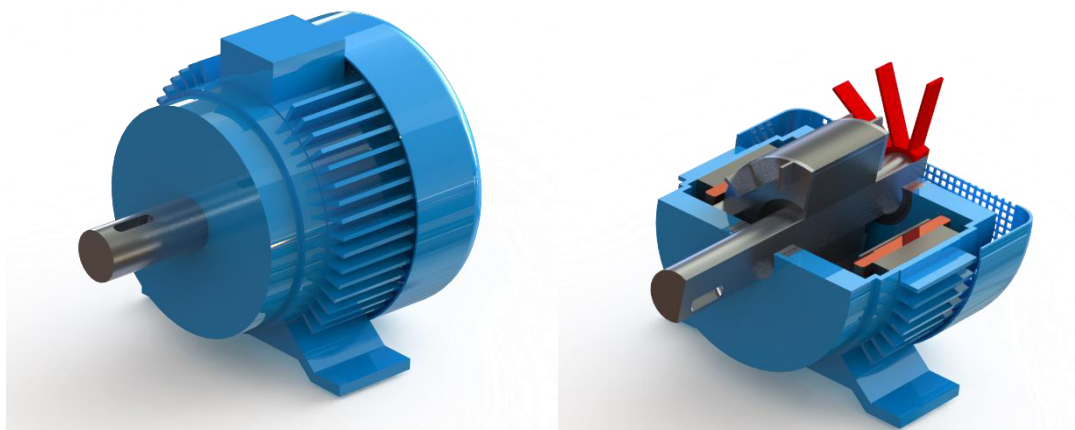
Na CD v příloze diplomové práce je umístěn celý model motoru včetně všech dílčích prvků. Ke každému prvku je přidělena tabulka v softwaru Excel s odpovídajícím názvem dané součásti v níž najdeme pojmenované jednotlivé kóty a jim odpovídající rozměry, které se dají v rámci navržené řady téměř libovolně měnit a na jejich základě se stroj poté překreslí.

Parametrizace má ale i svá omezení, u některých prvků nelze překračovat počet prvků které jsou v softwaru nakresleny, prvky se myslí například počet lopatek ventilátoru. Změnou na jiný počet může dojít ke znehodnocení části dané soustavy, protože pro jednotlivé plochy jsou nastaveny dané úkony a při změně jejich počtu může dojít k neočekávanému výsledku.

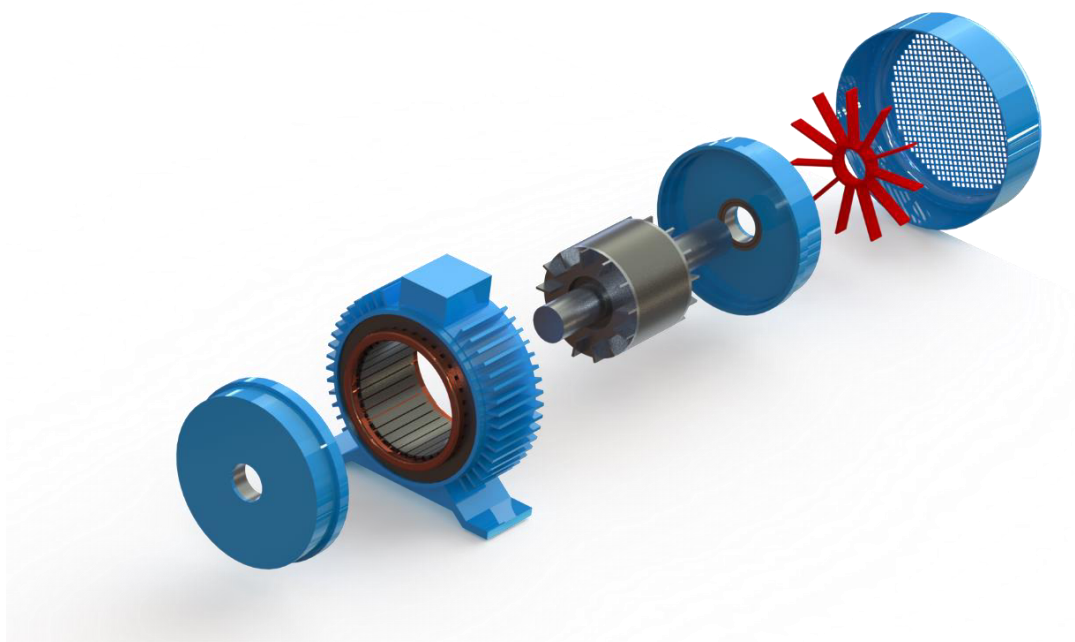
Pro danou navrhovanou řadu, to ovšem není překážkou, protože v rámci celé řady se počty prvků nemění a mění se jen jejich velikosti.

Pro změnu velikostí jednotlivých součástí je třeba ji provádět tak, aby nedocházelo k vytvoření přesahů mezi jednotlivými komponenty stroje. Přesahy dílčích prvků by tak vedly k porušení vazeb mezi jednotlivými prvky celého modelu. Tomu jsme se snažili předejít vazbami dílčích ploch a jejich vystředováním tak, aby se vzájemně neprotínaly.

Pro ilustrativní účel je na obrázku 7 zobrazena celá sestava dílčích prvků stroje s podélným řezem. Model tvoří potřebné konstrukční prvky, jako jsou kostra s patkovým usazením, svorkovnicí a chladícími žebry, statorový a rotorový paket, zjednodušený model vinutí, ložisek, ložiskových štítů a ventilátoru. Jednotlivé díly neobsahují montážní a stahovací prvky.



Obr. 7.1: 3D model asynchronního stroje v řezu



Obr. 7.2: Rozložená soustava dílů asynchronního stroje

8 Závěr

Návrh jednotlivých asynchronních motorů z výkonové řady byl proveden standartním způsobem. Z daného zvoleného průměru vrtání statoru byl vždy zvolen jako výchozí motor ze středu lineárně prodlužované a zkracované délky paketu. Je obecně známé, že stroj, který vychází z výkonové rovnice tak je jeho výkon úměrný jeho objemu. Poměr mezi drážkovou a čelovou částí vinutí pak silně ovlivňuje účinnost stroje a přenos tepla v něm. Pro optimalizaci celé řady strojů by proto bylo vhodné dále blíže specifikovat další výrobní a konstrukční omezení a podrobit je detailnějšímu rozboru ve vývinu jeho parametrů mechanického namáhání a oteplení. Navrhovaná výkonová řada, kladla omezení pouze škálou požadovaných výkonů a synchronních otáček strojů a použitou třídu izolace.

Všechny stroje byly navrhovány ve standartním patkovém provedení s krytím IP 44. Pro třídu izolace F, tvořenou izolačními materiály na bázi slídy. Statorový a rotorový paket je složen z elektrotechnických plechů Sura 350-50A s polootevřenými statorovými drážkami typu „M“ pro snadné navinutí vsypávaného měděného vinutí a rotorovými „V“ drážkami pro klec nakrátko.

Celá sestava asynchronního motoru byla poté namodelována v softwaru SolidWorks, kde díky vytvoření parametrického modelu je možnost snadno rozměry motoru upravit a vytvořit k nim další simulace v celé škále nabízených simulací, počínaje kontrolou oteplení až po statické namáhání. Celá sestava je pak doplněna o konstrukční prvky tvořené ofukovanou kostrou s vnější ventilací umístěnou na hřídeli, ložisky, ložiskovými štíty a ventilátorem s jeho krytem.

Pro vytvoření parametrizovaného modelu byla zvolena parametrizace jednotlivých dílů, které jsou k sobě v sestavě vazbeny. To přináší možnost pohybovat s jednotlivými částmi stroje nebo je vyměňovat za jiné, což však přináší s sebou komplikovanější přepínání mezi stroji z navržené výkonové řady. Řešením by bylo nakreslit a parametrizovat celý 3D model jako jeden velký díl, ale přišli bychom o možnost pohybu a vyměnitelnosti komponentů v rámci sestavy.

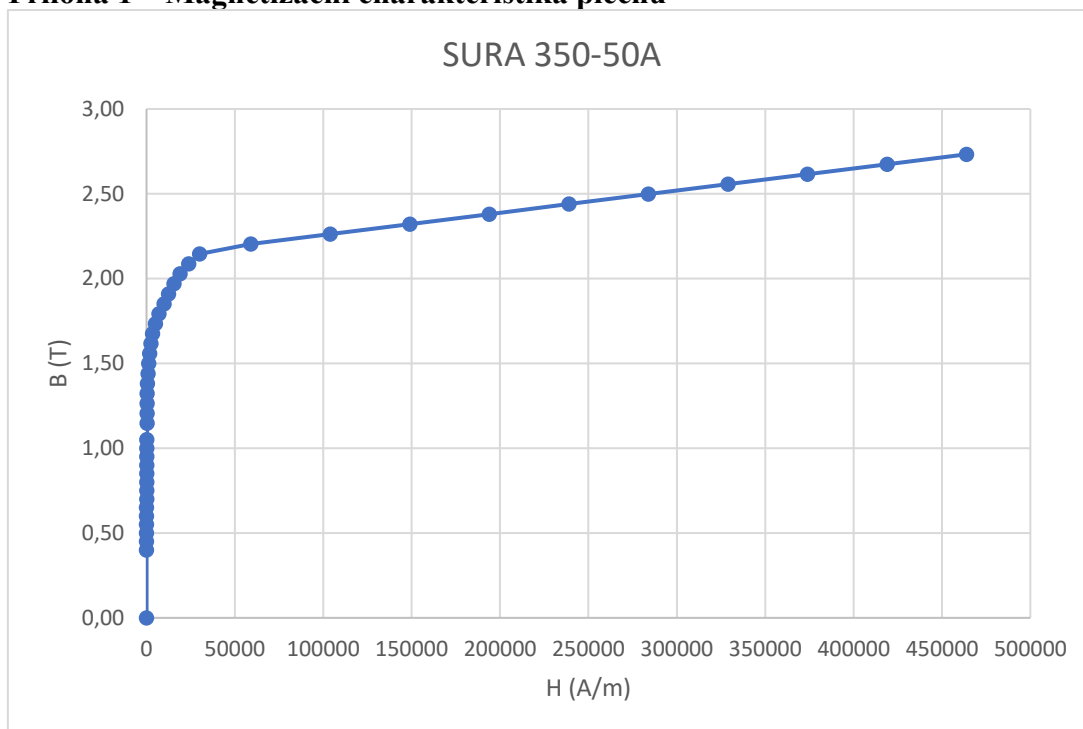
Výstupem práce je provedená výkonová řada dle zadání pro škálu vybraných výkonů a umístěných do třech zvolených průměrů induktu s výpočtem náhradních elektrických parametrů uvedených v tabulce 6.1. Cílem práce bylo navrhnout řadu průmyslových motorů a přiblížit se nabízeným strojům od výrobců jako jsou Siemens nebo Raveo.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] KOPYLOV I. P. a kol. Stavba elektrických strojů. 1.vyd SNTL Praha v r. 1988 L25C3-IV-41f/58667
- [2] CIGÁNEK LADISLAV. Stavba elektrických strojů. 1.vyd SNTL Praha v r. 1958 L25b-C3-4-II/5198
- [3] PETROV, Georgij N. Elektrické stroje 2: asynchronní stroje - synchronní stroje. Vyd. 1. Praha: Academia, 1982. 728 s.
- [4] Bartoš, Václav. Teorie elektrických strojů. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2006. 230 s. ISBN 80-7043-509-7.
- [5] PYRHONEN, Juha., Tapani JOKINEN a Valeria. HRABOVCOVÁ. Design of rotating electrical machines. Second edition. Chichester, West Sussex, United Kingdom: Wiley, 2014. ISBN 9781118701621.
- [6] Motor-CAD Software. [online]. [Cit. 8.5.2018] Dostupné z <https://www.motor-design.com/motor-cad-software/>
- [7] SolidWorks. [online]. [Cit. 22.4.2018] Dostupné z <https://www.solidworks.cz/>
- [8] Siemens. [online] [Cit. 5.3.2018] Dostupné z <https://www.siemens.com/global/en/home.html>

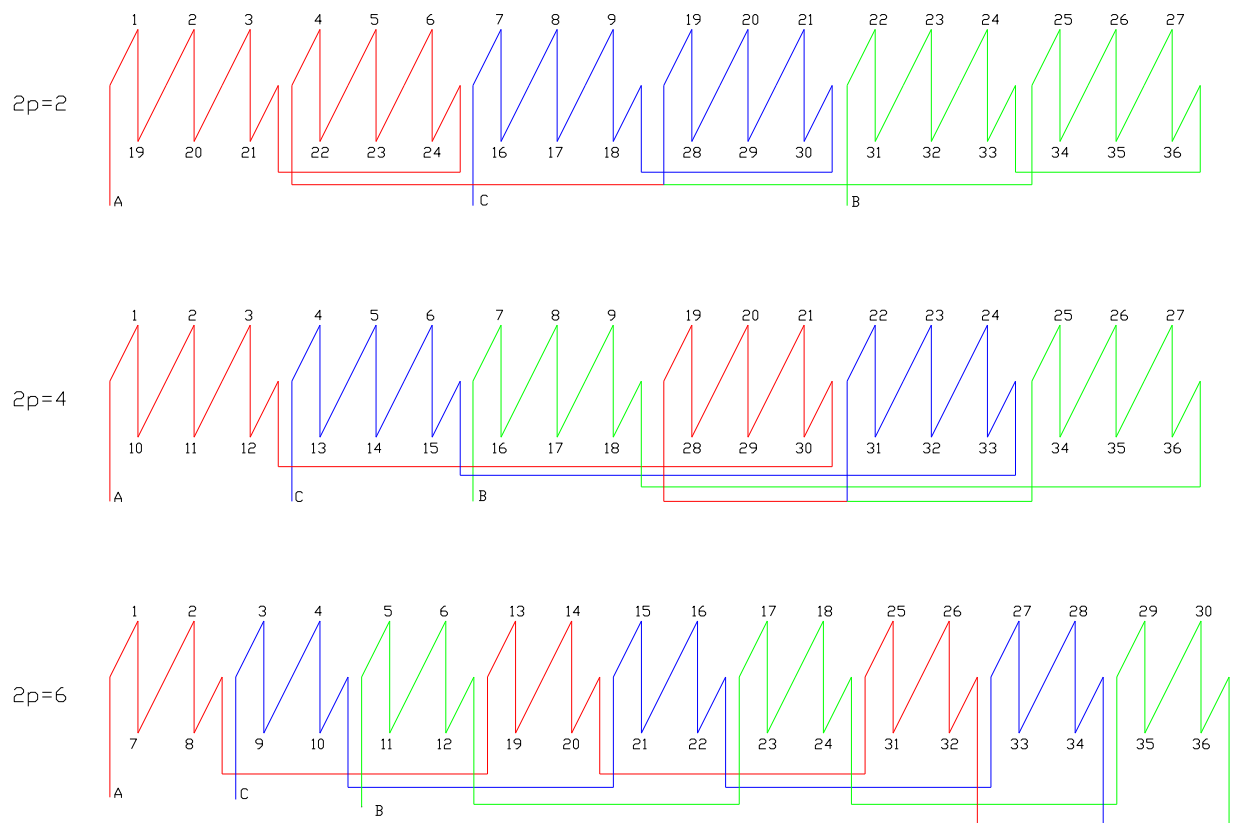
Přílohy

Příloha 1 – Magnetizační charakteristika plechů



B (T)	H (A/m)	B (T)	H (A/m)
0,00	0	1,56	1750
0,40	67	1,62	2500
0,45	72	1,68	3540
0,50	77	1,73	5000
0,55	83	1,79	7120
0,60	90	1,85	10000
0,65	99	1,91	12500
0,70	109	1,97	15600
0,75	119	2,03	19100
0,80	133	2,09	23900
0,85	147	2,15	30000
0,90	166	2,20	59000
0,95	187	2,26	104000
1,00	217	2,32	149000
1,05	252	2,38	194000
1,15	295	2,44	239000
1,21	344	2,50	284000
1,26	399	2,56	329000
1,32	460	2,62	374000
1,38	585	2,67	419000
1,44	860	2,73	464000
1,50	1230		

Příloha 2 – Pilové schéma zapojení vinutí



4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

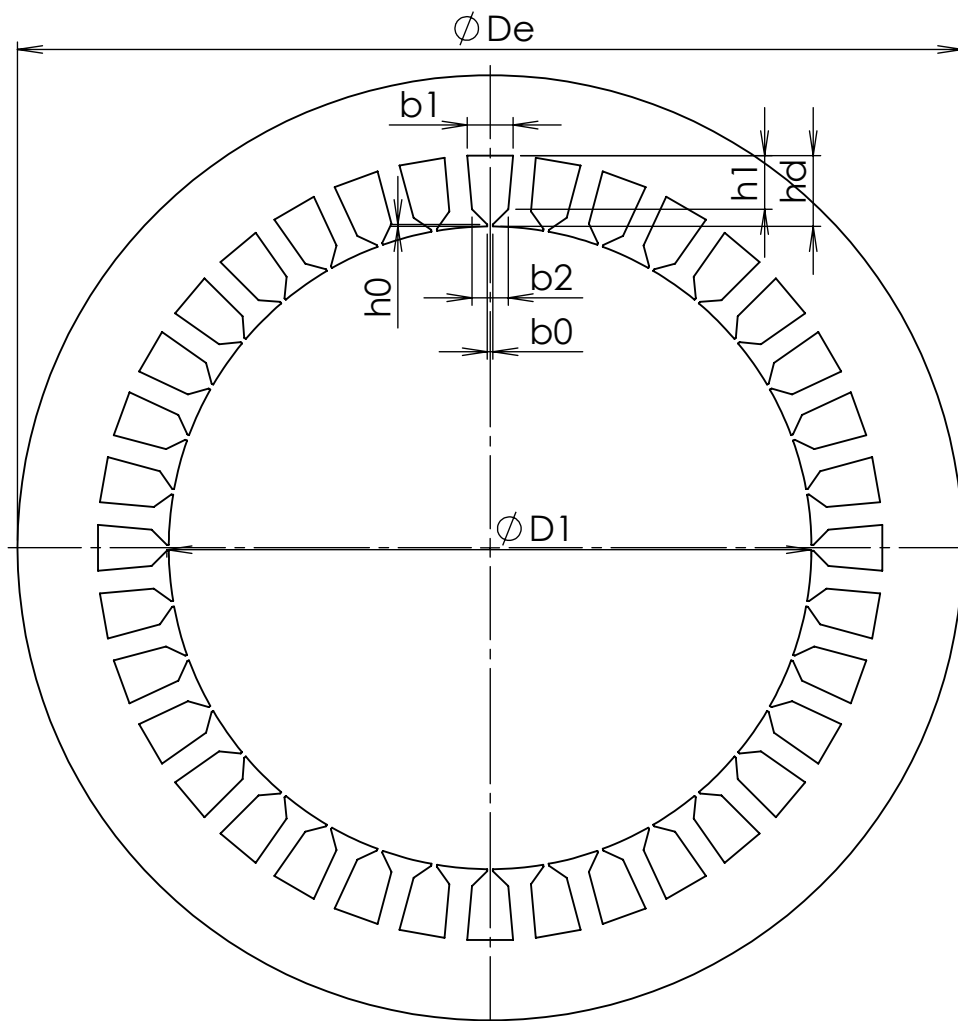
C

B

B

A

A



Fakulta elektrotechnická ZČU Plzeň
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

číslo přílohy:

3

Diplomová práce: Návrh řady asynchronních motorů

formát výkresu:

A4

Název výkresu: Statorový plech

číslo výkresu:

1

datum:

24.5.2018

Zpracoval:

Bc. Michal Černoš

Vedoucí práce:

Ing. Jan Šobra

měřítko:

-

4

3

2

1

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

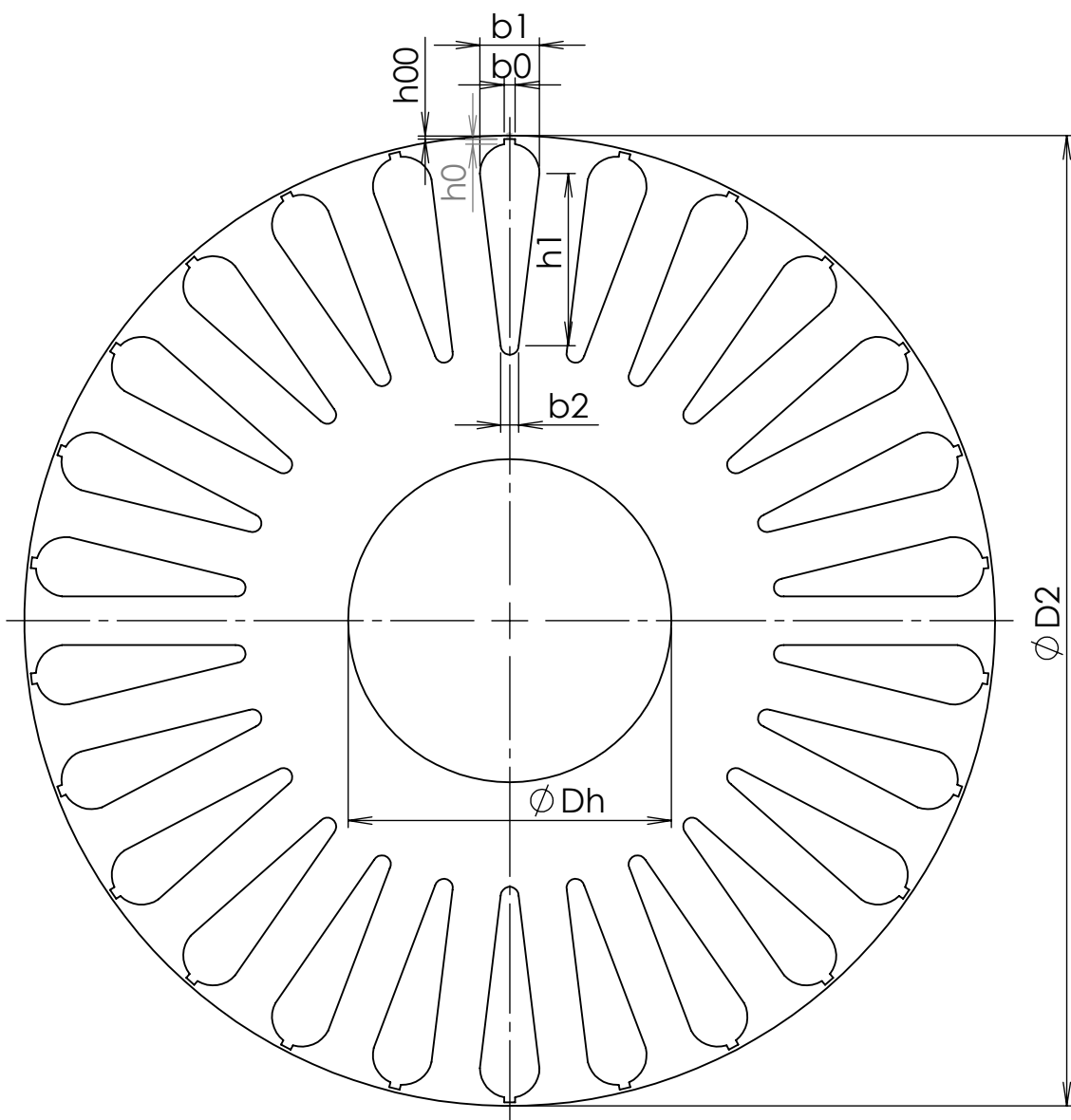
C

B

B

A

A



Fakulta elektrotechnická ZČU Plzeň
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

číslo přílohy:

3

Diplomová práce: Návrh řady asynchronních motorů

formát výkresu:

A4

Název výkresu: Rotorový plech

číslo výkresu:

2

datum:

24.5.2018

Zpracoval: Bc. Michal Černoš

Vedoucí práce: Ing. Jan Šobra

měřítko:

-

4

3

2

1

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

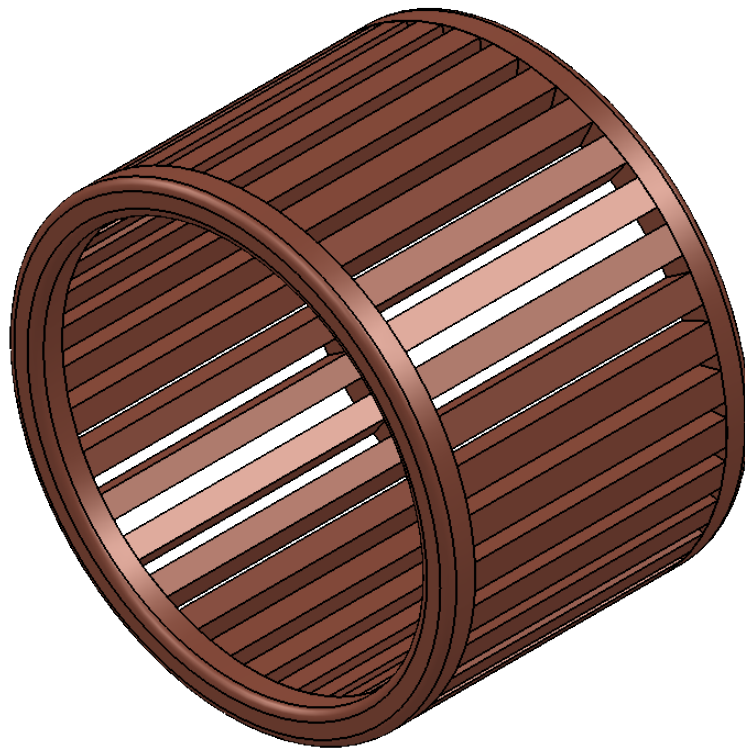
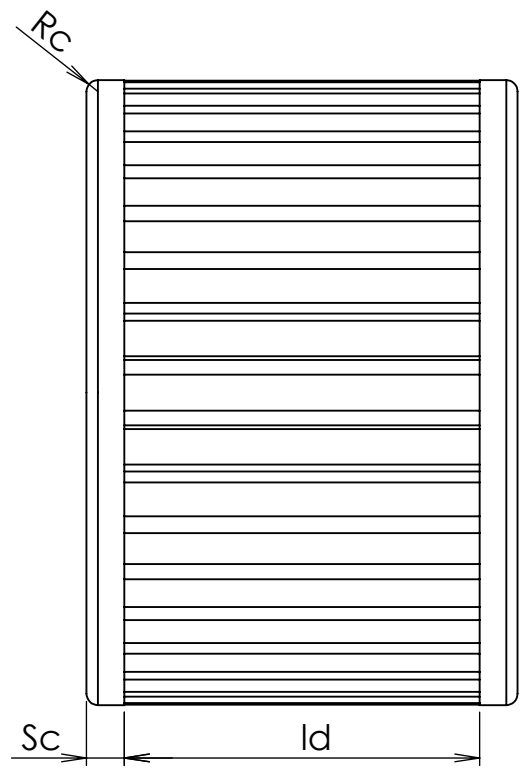
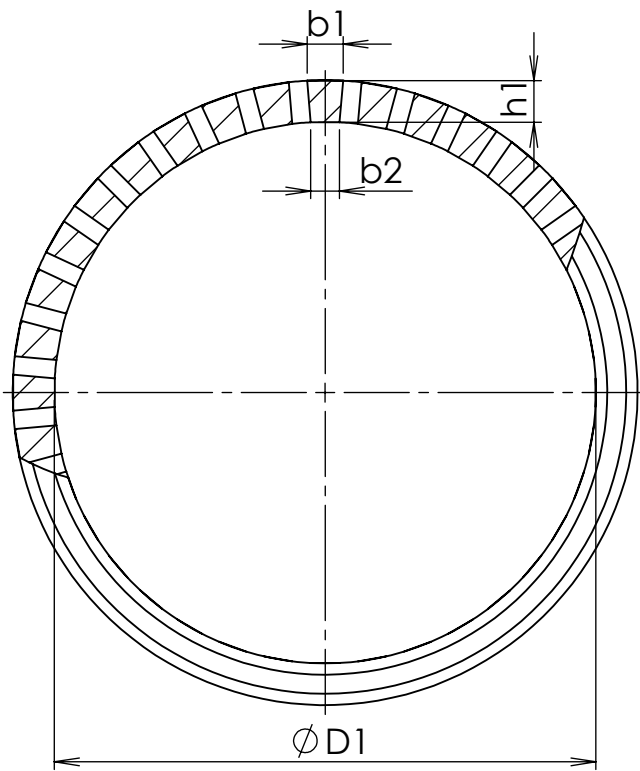
C

B

B

A

A



Fakulta elektrotechnická ZČU Plzeň
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

číslo přílohy:

3

Diplomová práce: Návrh řady asynchronních motorů

formát výkresu: A4

Název výkresu: Vinutí

číslo výkresu: 3

datum: 24.5.2018

Zpracoval: Bc. Michal Černocho

Vedoucí práce: Ing. Jan Šobra

měřítko: -

4

3

2

1

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

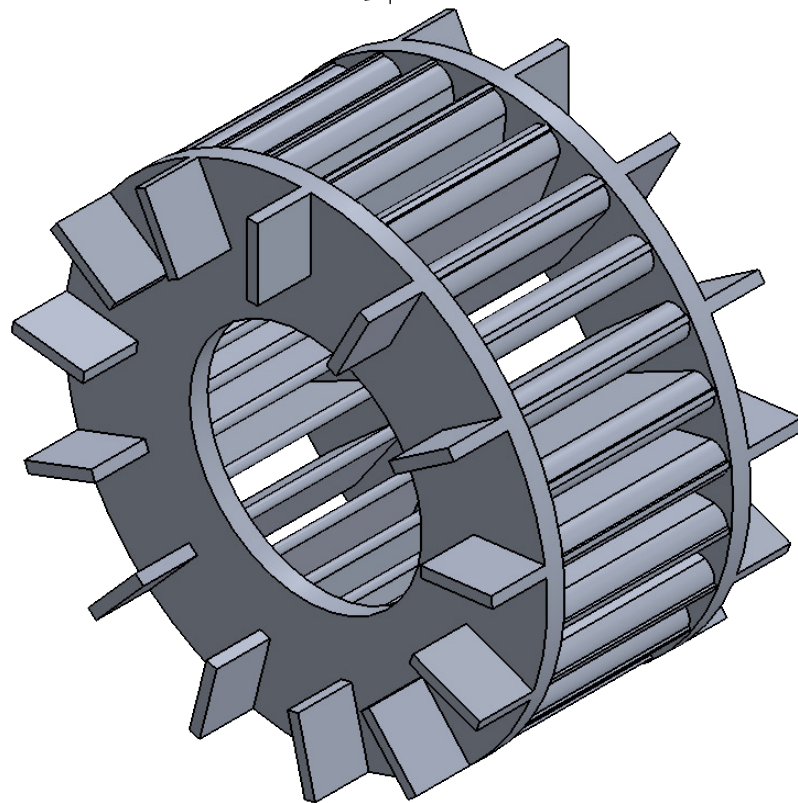
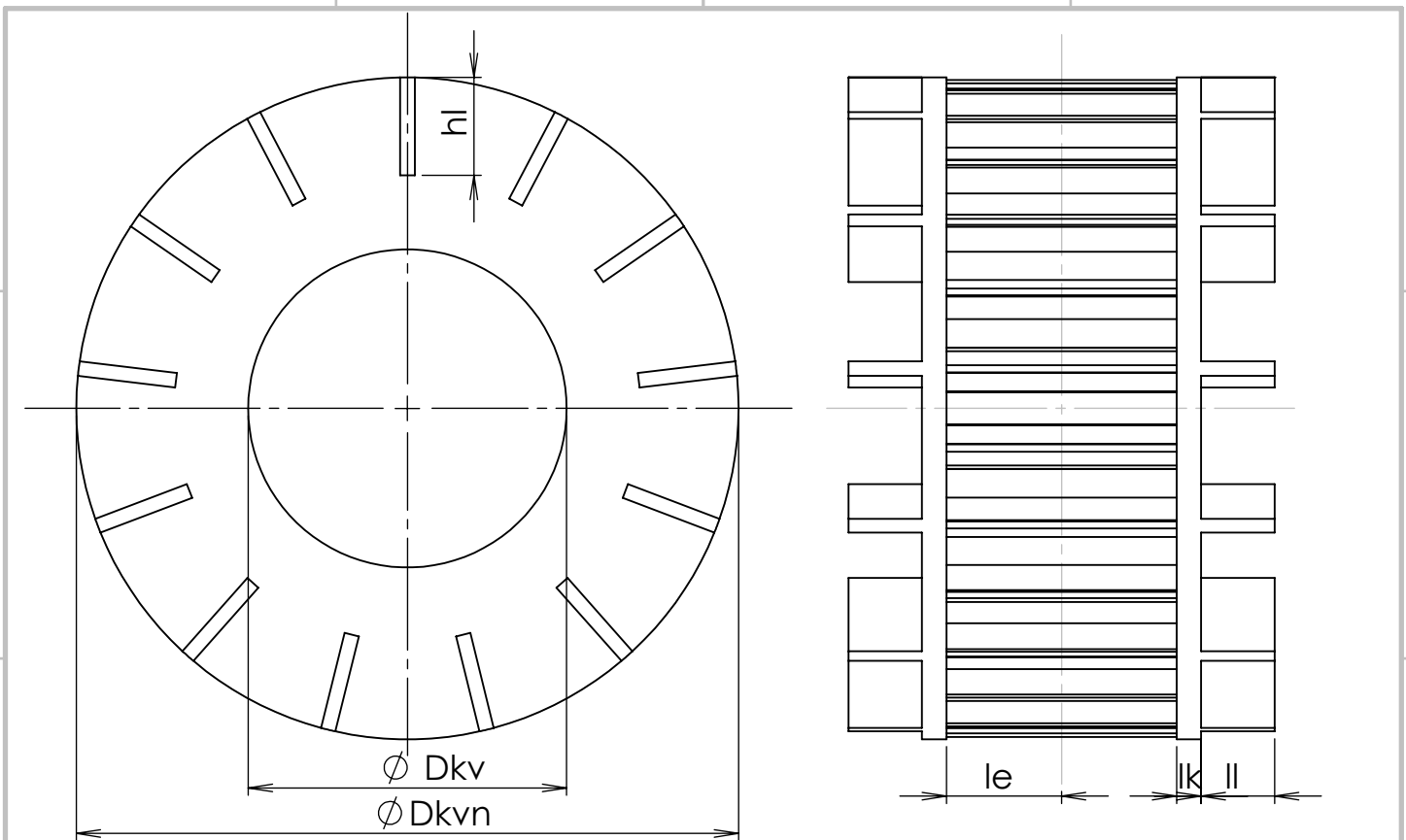
C

B

B

A

A



Fakulta elektrotechnická ZČU Plzeň
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

číslo přílohy:

3

Diplomová práce: Návrh řady asynchronních motorů

formát výkresu: A4

Název výkresu: Klec nakrátko

číslo výkresu: 4

datum: 24.5.2018

Zpracoval: Bc. Michal Černoš

Vedoucí práce: Ing. Jan Šobra

měřítko: -

4

3

2

1

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

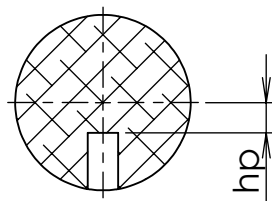
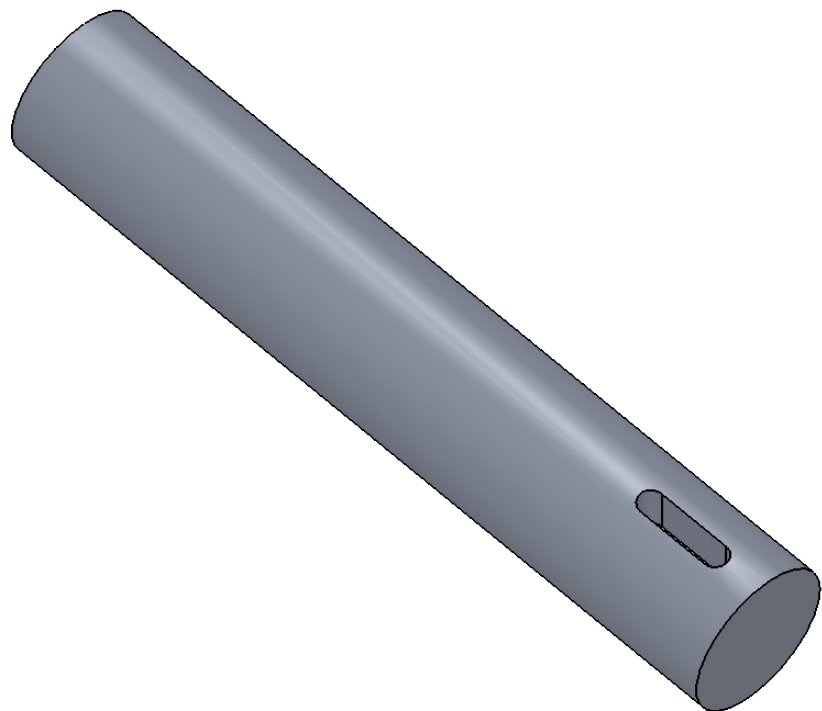
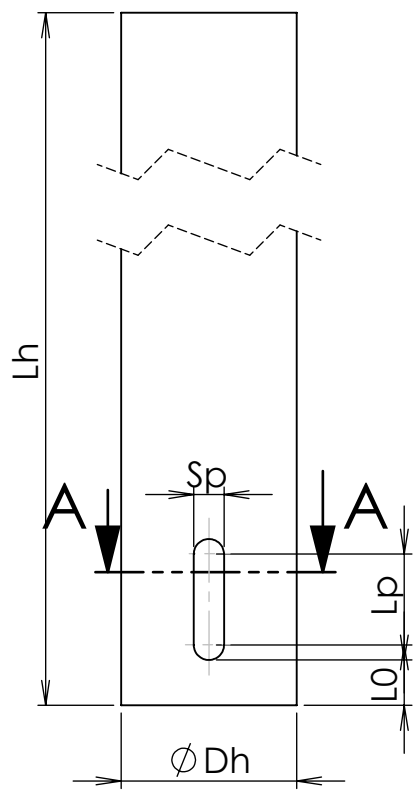
C

B

B

A

A



ŘEZ A-A

Fakulta elektrotechnická ZČU Plzeň
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

číslo přílohy:

3

Diplomová práce: Návrh řady asynchronních motorů

formát výkresu:

A4

Název výkresu: Hřídel

číslo výkresu:

5

datum:

24.5.2018

Zpracoval: Bc. Michal Černoš

Vedoucí práce: Ing. Jan Šobra

měřítko:

-

4

3

2

1

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

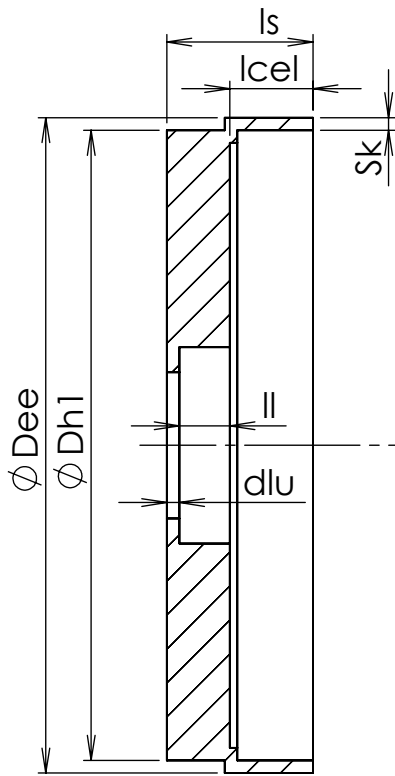
C

B

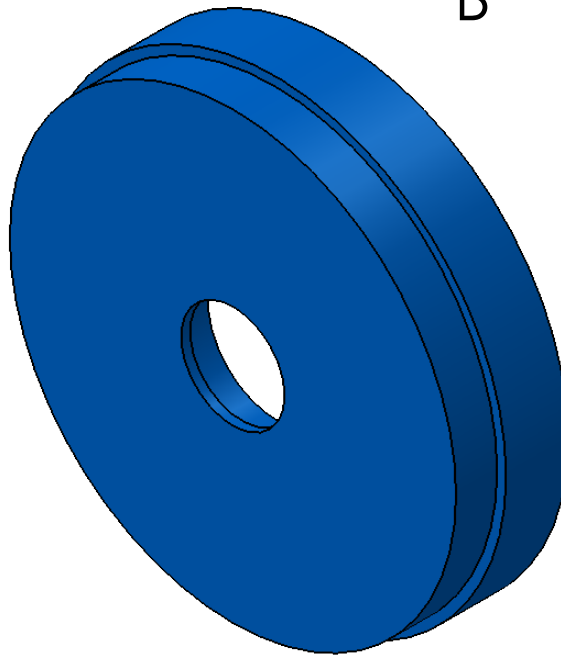
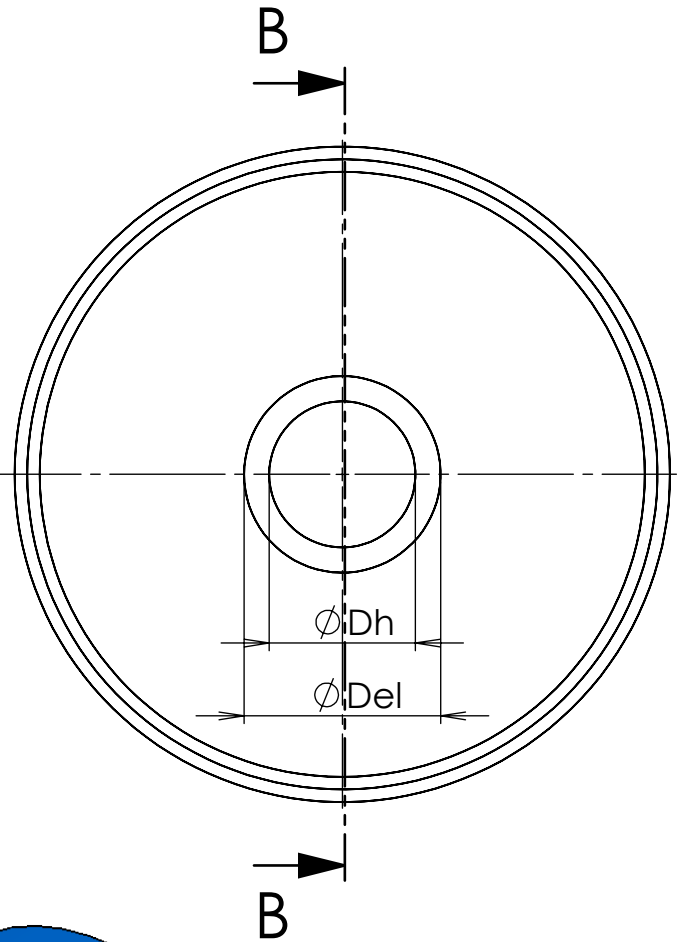
B

A

A



ŘEZ B-B



Fakulta elektrotechnická ZČU Plzeň
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

číslo přílohy:

3

Diplomová práce: Návrh řady asynchronních motorů

formát výkresu:

A4

Název výkresu:
Ložiskový štít

číslo výkresu:

6

datum:

24.5.2018

Zpracoval: Bc. Michal Černoš

Vedoucí práce: Ing. Jan Šobra

měřítko:

-

4

3

2

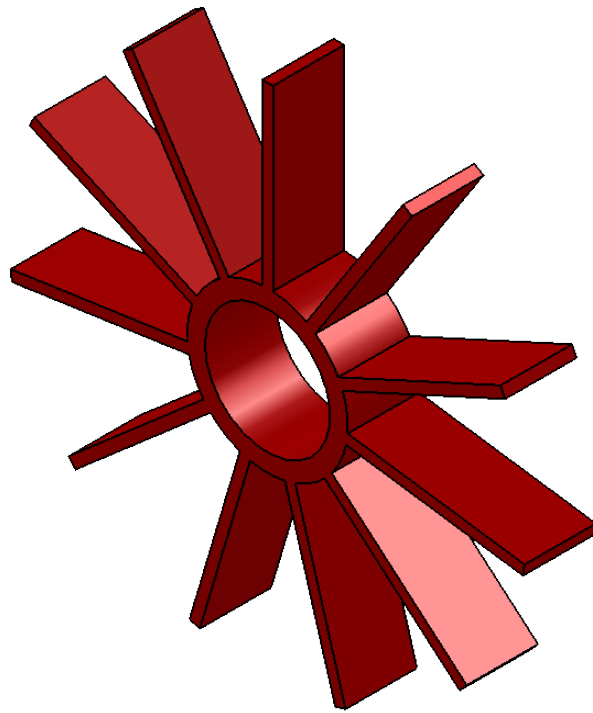
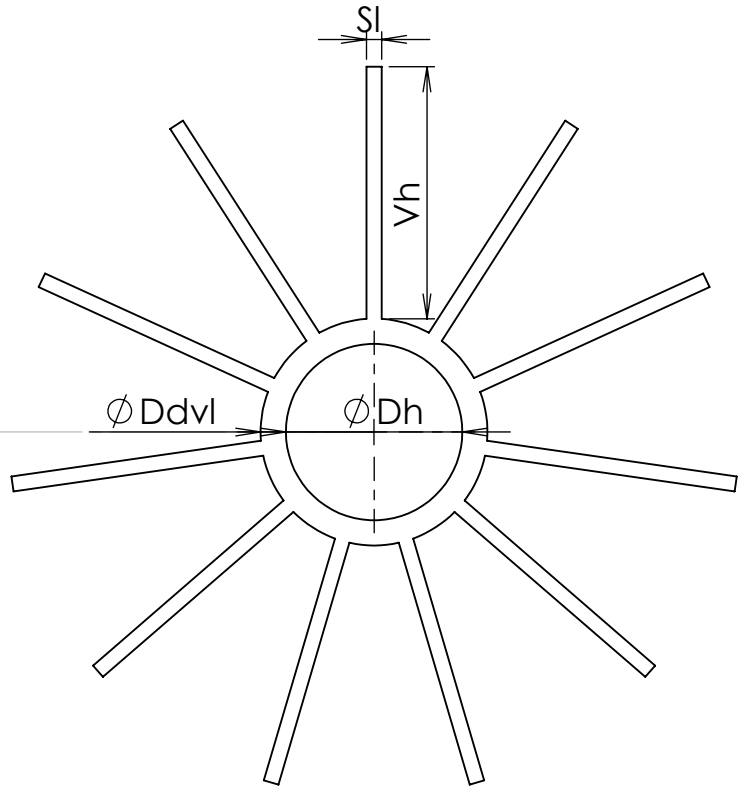
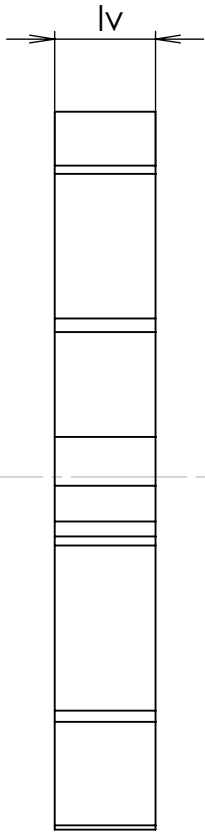
1

4

3

2

1



Fakulta elektrotechnická ZČU Plzeň
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

číslo přílohy:

3

Diplomová práce: Návrh řady asynchronních motorů

formát výkresu:

A4

Název výkresu: Ventilátor

číslo výkresu:

7

datum:

24.5.2018

Zpracoval: Bc. Michal Černoš

Vedoucí práce: Ing. Jan Šobra

měřítko:

-

4

3

2

1

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

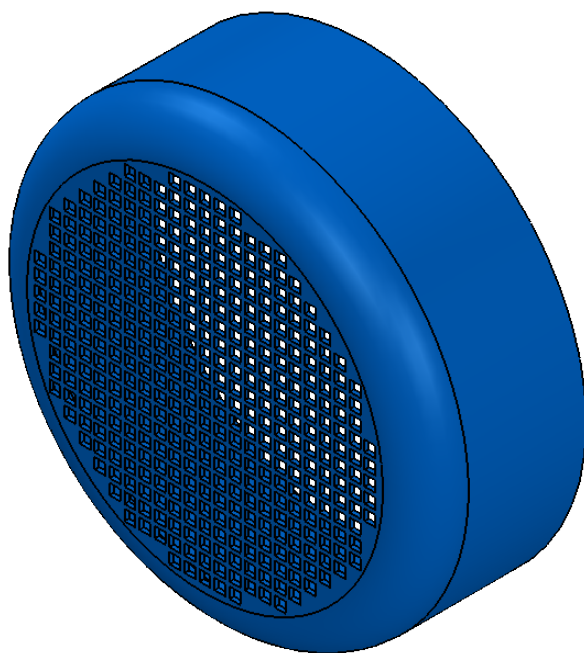
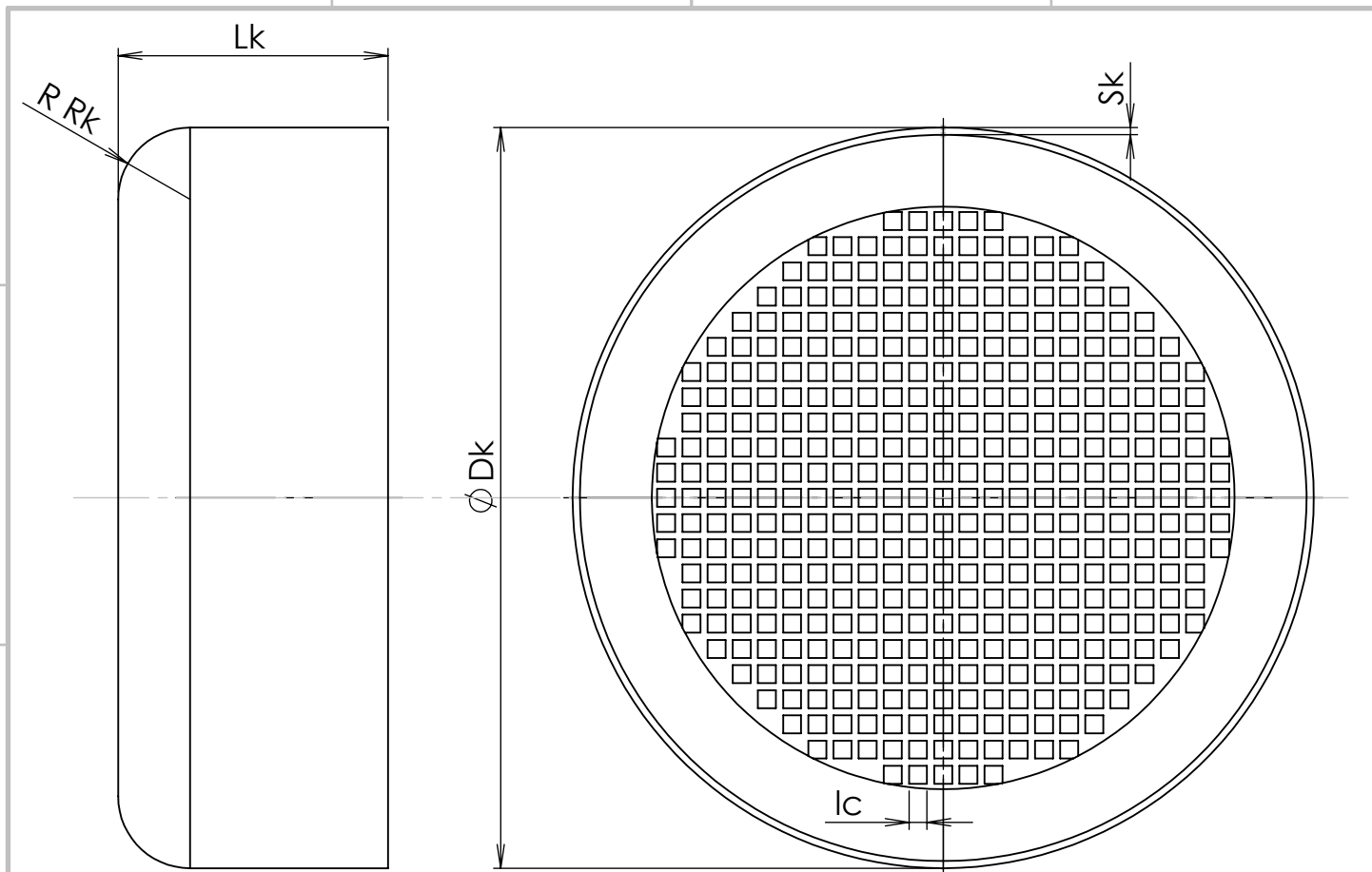
C

B

B

A

A



Fakulta elektrotechnická ZČU Plzeň
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

číslo přílohy:

3

Diplomová práce: Návrh řady asynchronních motorů

formát výkresu:

A4

Název výkresu: Kryt ventilátoru

číslo výkresu:

8

datum:

24.5.2018

Zpracoval:

Bc. Michal Černochoch

Vedoucí práce:

Ing. Jan Šobra

měřítko:

-

4

3

2

1

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

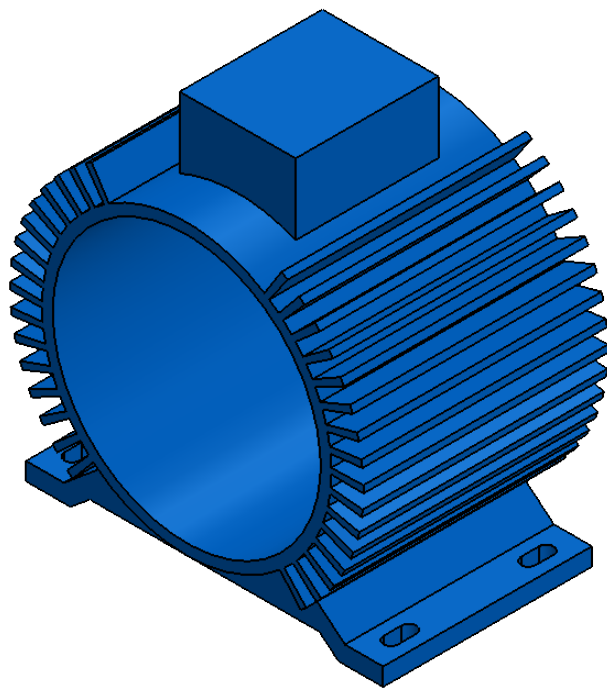
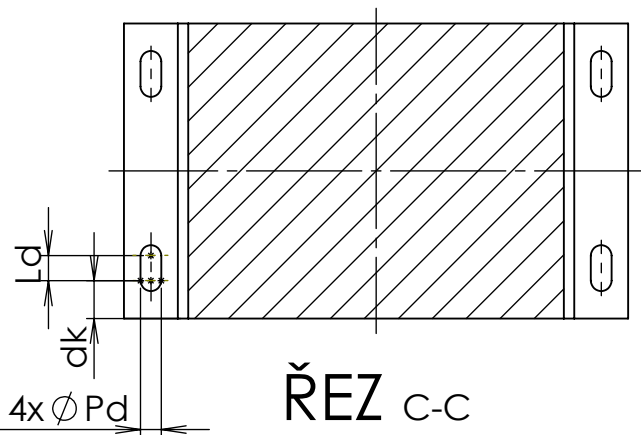
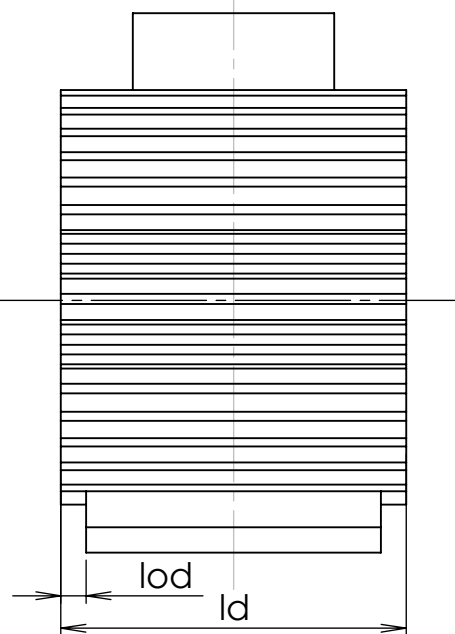
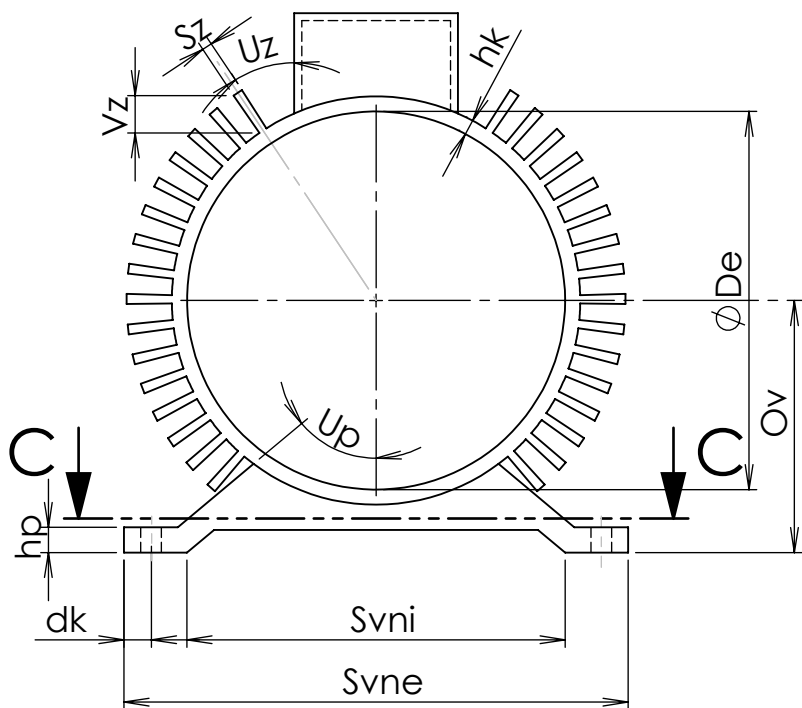
C

B

B

A

A



Fakulta elektrotechnická ZČU Plzeň
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

číslo přílohy:

3

Diplomová práce: Návrh řady asynchronních motorů

formát výkresu:

A4

Název výkresu:

Kostra stroje

číslo výkresu:

9

datum:

24.5.2018

Zpracoval:

Bc. Michal Černoš

Vedoucí práce:

Ing. Jan Šobra

měřítko:

-

4

3

2

1