

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Návrh asynchronního stroje s klecí nakrátko

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Michal ČERNOCH**
Osobní číslo: **E12B0501P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Název tématu: **Návrh asynchronního stroje s klecí nakrátko**
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Popište princip činnosti, náhradní schéma a momentovou charakteristiku asynchronního stroje.
2. Proveďte elektromagnetický návrh asynchronního stroje dle zadání vedoucího práce.
3. Na základě elektromagnetického návrhu určete parametry náhradního schématu a momentovou charakteristiku stroje.
4. Určete parametry náhradního schématu pomocí MKP (Metoda konečných prvků) a porovnejte je s hodnotami získanými výpočtem.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická


Seznam odborné literatury:

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


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jan Šobra**
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2015**

Termín odevzdání bakalářské práce: **2. června 2016**


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




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na elektromagnetický návrh asynchronního stroje s klecí nakrátko, stanovení jeho parametrů a momentové charakteristiky stroje z náhradního schématu a ověření parametrů pomocí metody konečných prvků.

Klíčová slova

Asynchronní stroj, elektromagnetický návrh, momentová charakteristika, náhradní schéma, metoda konečných prvků.

Abstract

The work deals with electromagnetic design of the induction machine with squirrel-cage identification of its parameter and torque characteristic of the machine from equivalent circuit and validation of parameters by the finite element method.

Keywords

Induction machine, electromagnetic design torque characteristic, equivalent circuit, finite element method.

Prohlášení

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

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 31.5.2016

Michal Černoch

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat všem, kteří mi pomáhali při zpracování bakalářské práce, především vedoucímu bakalářské práce Ing. Janu Šobrovi za odborný dohled, pomoc a vřelou komunikaci při zpracovávání.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD	13
1 PRINCIP ČINNOSTI ASYNCHRONNÍHO STROJE	14
1.1 VZNIK TOČIVÉHO POLE	14
1.2 NÁHRADNÍ SCHÉMA	15
1.3 MOMENTOVÁ CHARAKTERISTIKA	17
2 NÁVRH KONSTRUKČNÍCH ROZMĚRŮ ASYNCHRONNÍHO STROJE	19
2.1 URČENÍ HLAVNÍCH ROZMĚRŮ	19
2.2 NÁVRH STATORU	20
2.3 VÝPOČET STATOROVÉHO VINUTÍ	22
2.4 NÁVRH ROTORU	23
2.5 DIMENZOVÁNÍ MAGNETICKÉHO OBVODU	25
2.6 STANOVENÍ PARAMETRŮ NÁHRADNÍHO SCHÉMATU	26
2.7 STANOVENÍ ÚČINNOSTI STROJE	28
2.8 PRACOVNÍ CHARAKTERISTIKY STROJE	29
2.9 OTEPLENÍ STROJE	30
3 SIMULACE ASYNCHRONNÍHO STROJE POMOCÍ MKP	33
3.1 ÚVOD DO METODY KONEČNÝCH PRVKŮ	33
3.2 POSTUP MODELOVÁNÍ ASYNCHRONNÍHO MOTORU POMOCÍ FEMM	33
3.3 STANOVENÍ PARAMETRŮ NUMERICKÝM MODELEM	36
4 VÝSLEDKY A ZÁVĚR	38
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	40
PŘÍLOHY	1-5

Seznam symbolů a zkratk

Symbol	Název veličiny	Jednotka
(AJ)	Kritérium pro asynchronní stroje	-
A	Obvodová proudová hustota	A/m ²
a	Počet paralelních větví	-
akn	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 ₁	Šířka drážky pod krčkem	m
b ₂	Šířka vrcholu 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
bkn	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	Účinnost	-
D _{se}	Vnější průměr statoru	m
D _{si}	Vnitřní průměr statoru	m
f	Frekvence	Hz
f _f	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 závitu	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}	Skuz 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	Drážková rozteč	-
t_{d2}	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	-
y_k	Krok na komutátoru	-
α_{δ}	Činitel pólového krytí	-
γ_1	Pulzní ztráty	W
δ	Šířka vzduchové mezery	m
ΔP	Celkové ztráty v železe	W
ΔP_{FE}	Celkové ztráty v železe	W
ΔP_{FEh}	Hlavní ztráty v železe statoru	W
Δp_{j1}	Ztráty ve vinutí statoru	W
Δp_{j2}	Ztráty ve vinutí rotoru	W
$\Delta p_{j\delta 1}$	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	$^{\circ}\text{C}$
ΔT_{FE}	Oteplení železa	$^{\circ}\text{C}$
$\Delta t_{\text{izč}}$	Teplotní spád izolace čela vinutí	$^{\circ}\text{C}$
Δt_{izd}	Teplotní závislost v drážkové části	$^{\circ}\text{C}$
$\Delta t_{\text{povč}}$	Oteplení povrchu čel nad teplotu vzduchu	$^{\circ}\text{C}$
ΔT_{vin}	Oteplení vinutí na teplotu vnitřního vzduchu	$^{\circ}\text{C}$
$\Delta T_{\text{vinutí}}$	Oteplení vinutí na teplotu vnitřního vzduchu	$^{\circ}\text{C}$
ΔT_{vz}	Oteplení vnitřního vzduchu	$^{\circ}\text{C}$
η	Účinnost	-
$\lambda_{\text{č}}$	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

Úvod

Tato bakalářská práce je zaměřena na základní principy, činnosti a funkce asynchronního motoru s klecí nakrátko, teorií popisu náhradního schématu a momentové charakteristiky stroje.

Druhá část práce je zaměřena na návrh stroje se stanovením hlavních parametrů a podrobnějších rozměrů statoru a rotoru s návrhem magnetického obvodu, z něhož se poté vychází pro stanovení parametrů pro náhradní schéma a tvorbu momentové charakteristiky.

V závěru práce je proveden model navrženého asynchronního stroje pomocí metody konečných prvků (MKP). Pomocí softwaru Femm4.2 a porovnání výsledků získaných výpočtem a modelem (MKP).

1 Princip činnosti asynchronního stroje

1.1 Vznik točivého pole

Připojíme-li stator asynchronního stroje ke zdroji střídavého napětí a zároveň jsou jeho fáze časově a prostorově posunuté vznikne magnetické napětí F_1 . Toto vzniklé časově proměnné pole protíná stojící rotorové vodiče, které jsou spojeny kruhy nakrátko a podle indukčního zákona se do vodičů rotoru indukují napětí U_{i2} . Vodiči rotoru začne protékat proud I_2 , který vytvoří magnetické pole F_2 . Vzájemným působením polí F_1 a F_2 vzniká jejich vektorovým součinem moment M . [2]

Vzniklé magnetické pole rotoru F_2 se snaží dohnat magnetické pole statoru F_1 a motor se tak začne rozbíhat a stoupá tak jeho rotorová úhlová rychlost až do jmenovitých otáček. Současně s tím, se zmenšuje rozdíl frekvencí, který indukují napětí U_{i2} jehož amplituda tak klesá. [2]

V případě, ve kterém by se rotor točil stejnou úhlovou rychlostí, která by se rovnala úhlové rychlosti statorové, by indukované napětí U_{i2} zaniklo, protože by rozdíl frekvencí statoru a rotoru byl nulový a zároveň s tím by rotorem neprotékal žádný proud I_2 . Ale vzhledem k reálné existenci ztrát vzniklými třením v ložiskách, odporem vzduchu, který klade chladicí ventilátor, případně připojením zatěžovacího momentu opět dojde ke snížení úhlové rychlosti rotoru a moment opět vznikne. Pro takovou situaci si zavádíme pojem skluz, který je daný rozdílem úhlových rychlostí vztažený na stator. [2]

1.2 Náhradní schéma

Náhradní schéma představuje obvodové znázornění pomocí pasivních prvků. Jejich parametry odpovídají vlastnostem jednotlivých součástí asynchronního motoru. Náhradní schéma a rovnice platí jen pro harmonické veličiny. Výsledek odvození náhradního schématu je totožný s náhradním schématem transformátoru, ale jeho parametry se liší několika vlastnostmi. [1]

- Rotorový a statorový proud má odlišné kmitočty
- Počet fází rotoru je jiný, než počet fází statoru
- V asynchronním motoru je nezanedbatelná vzduchová mezera mezi vinutími, která ovlivňuje velikosti reaktancí
- Mechanický výkon na hřídeli se nahrazuje výkonem elektrickým

Pomocí rovnic, ve kterých uplatníme navržené rozměry stroje a materiálové konstanty, lze stanovit přesné hodnoty parametrů náhradního schématu. Hodnoty jednotlivých prvků poté lze použít pro stanovení momentové charakteristiky a charakteristik naprázdno a nakrátko. [1]

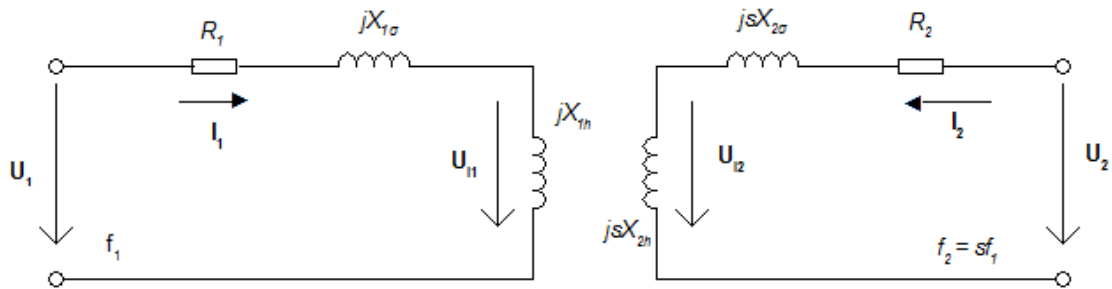
Náhradní schéma lze interpretovat jako:

Základní obvodové schéma, které respektuje odlišné frekvence proudů statoru a rotoru. Tato vlastnost ale není vhodná pro další zpracování [2]

$$\mathbf{U}_1 = (R_1 + jX_{1\sigma})\mathbf{I}_1 + \mathbf{U}_{i1} \quad (1.2-1)$$

$$\mathbf{U}_2 = (R_2 + jsX_{2\sigma})\mathbf{I}_2 + \mathbf{U}_{i2} \quad (1.2-2)$$

$$\mathbf{U}_{i2} = s\mathbf{U}_{i20} \quad (1.2-3)$$



Obr. 1.1: Základní obvodové schéma asynchronního stroje

Vhodnější je použití náhradního schématu typu - T, které řeší problémy rozdílných kmitočtů a to, vydělením rovnice (1.2-2) skluzem.

$$\mathbf{U}_1 = (R_1 + jX_{1\sigma})\mathbf{I}_1 + \mathbf{U}_{i1} \quad (1.2-3)$$

$$\frac{\mathbf{U}_2}{s} = \left(\frac{R_2}{s} + jsX_{2\sigma} \right) \mathbf{I}_2 + \mathbf{U}_{i2} \quad (1.2-4)$$

Poté provedeme přepočítání rotorových veličin na stator.

$$\mathbf{U}'_2 = k_U \mathbf{U}_2 \quad (1.2-5)$$

$$\mathbf{I}'_2 = k_I \mathbf{I}_2 \quad (1.2-6)$$

$$\mathbf{U}'_{i20} = \mathbf{U}_{i1} \quad (1.2-7)$$

$$\mathbf{Z}'_2 = k_Z \mathbf{Z}_2 \quad (1.2-8)$$

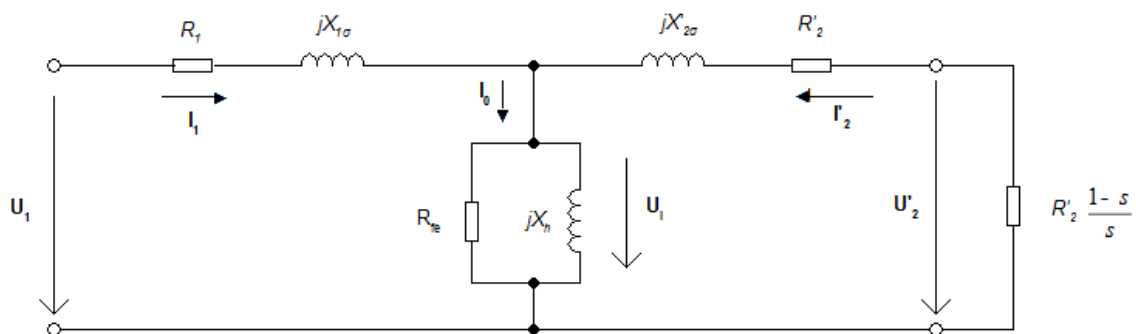
Následně položíme $U_2 = 0$ a zavedeme veličinu Z_{1h} , která se skládá z paralelní kombinace X_{1h} a R_{Fe} . [1]

$$Z_{1h} = \frac{jX_{1h}R_{Fe}}{jX_{1h} + R_{Fe}} \quad (1.2-10)$$

$$U_{i1} = Z_{1h}I_0 = Z_{1h}(I_1 + I'_2) \quad (1.2-11)$$

$$U_1 = (R_1 + jX_{1\sigma})I_1 + U_{i1} \quad (1.2-12)$$

$$0 = \left(\frac{R'_2}{s} + jsX'_{2\sigma} \right) I'_2 + U_{i1} \quad (1.2-13)$$



Obr. 1.2 Náhradní schéma typu T-článek

1.3 Momentová charakteristika

Momentová charakteristika zobrazuje závislost velikosti momentu na skluzu nebo otáčkách $M = f(s)$ a $M = f(n)$.

$$M = \frac{P}{\omega} \quad (1.3-1)$$

Kde je momentu určen podílem mechanického výkonu na hřídeli a úhlové rychlosti statoru. Po dosazení předchozí zmíněné rovnice a několika úpravách se dostaneme ke známému Klosovu vztahu.

$$M = \frac{2 \cdot M_{max}}{\frac{s}{s_{zv}} + \frac{s_{zv}}{s}} \quad (1.3-2)$$

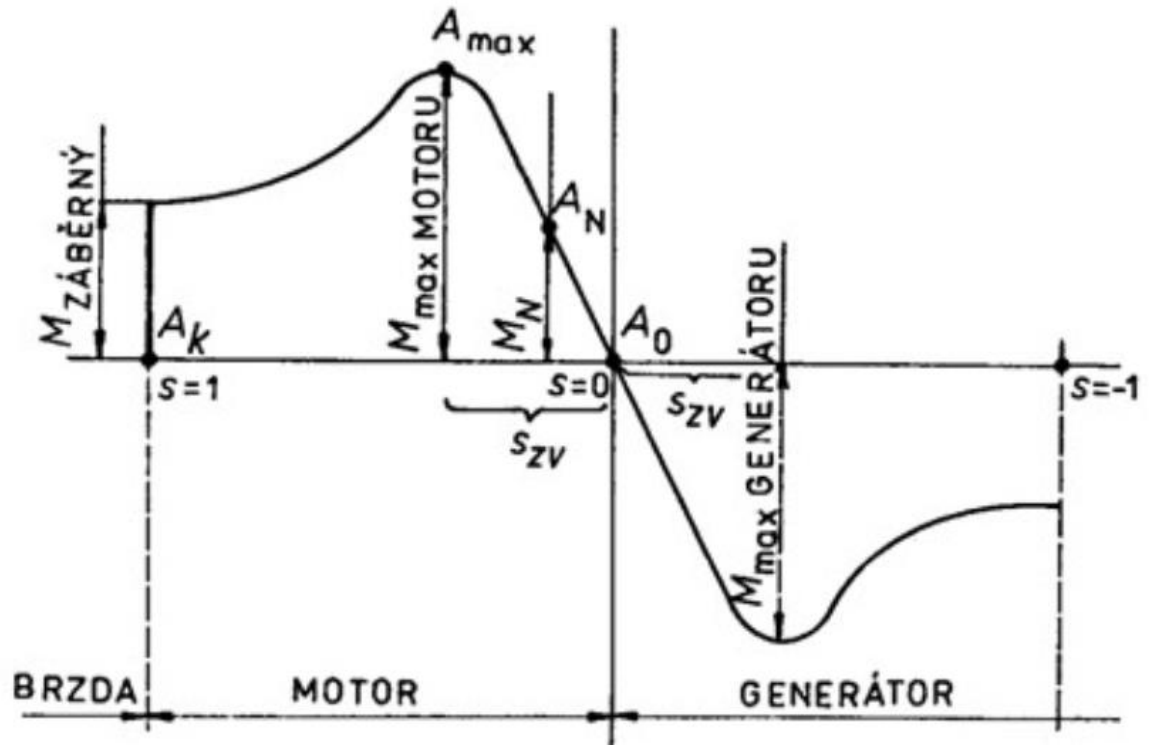
Kde maximální moment je dán vztahem.

$$M_{max} = \frac{3}{\omega_s} \cdot \frac{U_1^2}{2 \cdot X_k} \quad (1.3-3)$$

Odpovídají skluz k maximálnímu momentu je skluz zvratu (s_{zv}), který získáme ze vztahu.

$$s_{zv} = \pm \frac{R'_2}{X_k} \quad (1.3-4)$$

Znaménko + nám udává motorický režim, znaménko – znamená generátorický režim. [1, 2, 3]



Obr. 1.3 Momentová charakteristika [4]

Maximální moment momentové charakteristiky je omezen velikostí rozptylové reaktance, která je dána konstrukcí stroje a také nám udává velikost nárůstu záběrového proudu, proto mnohdy není vhodné ji zmenšovat například k dosažení menších ztrát. Velikost momentu je také s kvadratickou závislostí úměrná napájecímu napětí, na to je důležité myslet hlavně při řízení motoru. Vliv odporu statoru R_1 nám u charakteristiky udává její nesymetrii, protože se zvyšujícím se výkonem se jeho podíl na tvaru charakteristiky zmenšuje. [2]

2 Návrh konstrukčních rozměrů asynchronního stroje

2.1 Určení hlavních rozměrů stroje

Počet pólů stroje: $p = \frac{60 \cdot f}{n_s} = \frac{60 \cdot 50}{1500} = 2 \Rightarrow 2p = p \cdot 2 = 2 \cdot 2 = 4$ póly

Vnitřní a vnější průměr statoru: $D_{si} = K_D \cdot D_{se}$

K určení vnějšího průměru potřebujeme znát hodnotu výšky osy hřídele h [mm], kterou určíme z přílohy 4. Za pomoci této hodnoty vnější průměr D_{se} . Za předpokladu zjištění těchto hodnot můžeme dosadit do vztahu pro vnitřní průměr D_{si} .

K_D – hodnota stanovuje poměr mezi vnitřním a vnějším průměrem statoru. $K_D = 0,66$

$$h = 160 \text{ mm}$$

$$D_{se} = 272 \text{ mm}$$

$$D_{si} = 0,66 \cdot 272 = 180 \text{ mm}$$

Délka stroje:

Pro stanovení délky stroje si vyjádříme délku železa l_{fe} z výkonové rovnice

$$l_{fe} = \frac{2 \cdot P_i}{D_{si}^2 \cdot \omega_s \cdot k_B \cdot k_v \cdot A \cdot B_\delta \cdot \pi \cdot \alpha_\delta}$$

Úhlová rychlost: $\omega_s = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{p} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 50}{2} = 157,08 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$

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

Činitel pólového krytí: $\alpha_\delta = \frac{2}{\pi} = 0,6366$

Činitel vinutí: $k_v = k_{vy} \cdot k_{vr}$

Činitel kroku vynutí: $k_{vy} = \sin\left(\frac{y_{d1}}{Q_p} \cdot \frac{\pi}{2}\right)$

Činitel rozlohy vinutí: $k_{vr} = \frac{\sin\left(\frac{y_{d1}}{Q_p} \cdot \frac{\pi}{2}\right)}{q_s \cdot \sin\left(\frac{1}{Q_p} \cdot \frac{\pi}{2}\right)}$

Činitel vinutí pro dvouvrstvé vinutí volíme: 0,92

Indukce ve vzduchové mezeře volím: $B_\delta = 1 \text{ T}$

Obvodová proudová hustota: $A = 33000 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$

Velikost obvodové proudové hustoty stanovíme z přílohy 8.

Příkon motoru: $P_i = P_2 \cdot \frac{k_E}{\eta \cdot \cos \varphi} = 18 \cdot \frac{0,965}{0,9 \cdot 0,9} = 21,44 \text{ kVA}$

η zvolená účinnost pro nastartování výpočtu 0,9

$k_E = 0,965$

$\cos \varphi = 0,9$

$$l_{fe} = \frac{2 \cdot P_i}{D_{si}^2 \cdot \omega_s \cdot k_B \cdot k_v \cdot A \cdot B_\delta \cdot \pi \cdot \alpha_\delta}$$

$$l_{fe} = \frac{2 \cdot 21440}{0,180^2 \cdot 157,08 \cdot \frac{\pi}{2 \cdot \sqrt{2}} \cdot 0,92 \cdot 33000 \cdot 1 \cdot \pi \cdot \frac{2}{\pi}} = 137 \text{ mm}$$

2.2 Návrh statoru

Pólová rozteč: $tp = \frac{\pi \cdot D_{si}}{2 \cdot p} = \frac{\pi \cdot 0,180}{4} = 0,1414 \text{ m}$

Drážková rozteč: $td_{min} = 0,0115 \text{ m}$

$td_{max} = 0,013 \text{ m}$

Drážkovou rozteč volíme podle typu vinutí, pro vsypávaná vinutí volíme hodnoty z přílohy 9 podle vypočítané pólové rozteče.

$$Q1_{min} = \frac{\pi \cdot D_{si}}{td_{max}} = 44$$

$$Q1_{max} = \frac{\pi \cdot D_{si}}{td_{min}} = 49$$

Výsledný počet drážek stanovíme v rozmezí hodnot s přihlédnutím na vhodnou symetrii stroje $Q_1 = 48$

Počet drážek na pól a fázi: $q = \frac{Q_1}{2 \cdot p \cdot m} = \frac{48}{2 \cdot 2 \cdot 3} = 4$

Drážková rozteč: $td = \frac{\pi \cdot D_{si}}{2 \cdot p \cdot m \cdot q} = \frac{\pi \cdot 0,180}{4 \cdot 3 \cdot 4} = 0,0118 \text{ m}$

Jmenovitý proud statoru: $I_{1N} = \frac{P}{m \cdot U_N \cdot \eta \cdot \cos \varphi} = \frac{18000}{3 \cdot 230 \cdot 0,9 \cdot 0,9} = 32,2 \text{ A}$

Počet vodičů v drážce: $V_d' = \frac{\pi \cdot D_{si} \cdot A}{I_{1N} \cdot Q_1} = \frac{\pi \cdot 0,180 \cdot 33000}{32,2 \cdot 48} = 12$

Při výpočtu je nutné zaokrouhlit výsledek na celé číslo. Pokud je vinutí dvouvrstvé musí být počet vodičů dělitelný dvěma.

Počet paralelních větví: $V_d = a \cdot V_d' = 2 \cdot 12 = 24$

Počet závitů: $N_1 = \frac{V_d \cdot Q_1}{2 \cdot a \cdot m} = \frac{24 \cdot 48}{2 \cdot 2 \cdot 3} = 96$

Výsledná proudová hustota: $A = \frac{2 \cdot m \cdot N_1 \cdot I_{1N}}{\pi \cdot D_{Si}} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 96 \cdot 32,2}{\pi \cdot 0,180} = 32798 \text{ A/m}$

Výsledná proudová hustota by se neměla příliš lišit od dříve zvolené

Počet drážek statoru: $Q_1 = 2 \cdot p \cdot q \cdot m = 2 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 3 = 48$

Počet cívek: $K = \frac{Q}{1} = \frac{48}{1} = 48$

Krok na komutátoru: $y_k = \frac{a}{p} = \frac{48-2}{2} = 23$

Asynchronní stroj samozřejmě žádný komutátor nemá, ale výpočet rozložení vinutí je víceméně stejný se strojem stejnosměrným.

Přední cívkový krok v počtu drážek na pól: $y_{1d} = \frac{Q}{2p} = \frac{48}{4} = 12$

Přední cívkový krok: $y_1 = 2u \cdot y_{1d} + 1 = 2 \cdot 12 + 1 = 25$

Pro dvouvrstvé vinutí $2u=2$

Spojkový krok: $y_2 = 2 \cdot y_k - y_1 = 2 \cdot 23 - 25 = 21$

Počet fázových svazků: $S_c = m' \cdot a = 6 \cdot 2 = 12$

Počet fázových svazků na fázi: $f_f = \frac{S_c}{m} = \frac{m' \cdot a}{m} = \frac{6 \cdot 2}{3} = 4$

Počet cívek ve svazku: $K_1 = \frac{K}{m' \cdot a} = \frac{48}{6 \cdot 2} = 4$

Magnetický indukční tok pro pól pár: $\Phi = \frac{K_E \cdot U_{1N}}{4 \cdot k_B \cdot N_1 \cdot f_1 \cdot k_v} = \frac{0,965 \cdot 230}{4 \cdot 1,11 \cdot 96 \cdot 50 \cdot 0,92} = 11,3 \cdot 10^{-3} \text{ Wb}$

Indukce ve vzduchové mezeře: $B_\delta = \frac{\Phi}{\alpha_\delta \cdot t_p \cdot l_{Fe}} = \frac{p \cdot \Phi}{D_{Si} \cdot l_{Fe}} = \frac{2 \cdot 0,0113}{0,180 \cdot 0,1263} = 0,99 \text{ T}$

Proudová hustota: $J = \frac{(AJ)}{A} = \frac{280 \cdot 10^9}{33000} = 8484000 \text{ A/m}^2$

(AJ) vybereme z přílohy 7 pro $2p=4$ a $D_e = 272 \text{ mm}$

Průřez vodiče: $S_{ef1} = \frac{I_{1N}}{a \cdot J} = \frac{32,2}{1 \cdot 8484000} = 5 \text{ mm}^2$

Průřez vodiče zaokrouhlíme na nejbližší vyšší hodnotu z řady vyráběných průměrů vodičů

2.3 Výpočet statorového vinutí

$$\text{Výška jha statoru: } h_{j1} = \frac{\phi}{2 \cdot B_{j1} \cdot l_{Fe} \cdot k_{Fe}} = \frac{11,3 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 1,5 \cdot 0,137 \cdot 0,97} = 28,34 \text{ mm}$$

Z přílohy 11 stanovíme magnetickou indukci ve jhu $B_{j1} = 1,5$ a $k_{Fe} = 0,97$

$$\text{Předběžná šířka zubu: } b_{z1} = \frac{B_{\delta} \cdot t_d \cdot l_{Fe}}{B_z \cdot l_{Fe} \cdot k_{Fe}} = \frac{1 \cdot 0,0118 \cdot 0,137}{1,8 \cdot 0,137 \cdot 0,97} = 6,76 \text{ mm}$$

$$\text{Předběžná hloubka drážky: } h_d = \frac{D_{se} - D_{si}}{2} - h_{j1} = \frac{0,272 - 0,180}{2} - 0,02834 = 17,66 \text{ mm}$$

$$\text{Šířka dna drážky: } b_1 = \frac{\pi \cdot (D_{si} + 2 \cdot h_{d1})}{Q_1} - b_{z1} = \frac{\pi \cdot (0,180 + 2 \cdot 0,01766)}{96} - 0,00676 = 7,33 \text{ mm}$$

Předběžná šířka vrcholu drážky:

h_0 je normalizované 0,5-1 mm

Šířka vrcholu drážky:

$$b_2 = \frac{\pi \cdot (D_{si} + 2 \cdot h_0 - b_0) - Q_1 \cdot b_{z1}}{Q_1 - \pi} = \frac{\pi \cdot (0,180 + 2 \cdot 0,0006 - 0,0025) - 48 \cdot 0,00676}{48 - \pi} = 5,28 \text{ mm}$$

Stanovení b_0 :

$$\text{Výpočet průměru vodiče: } S_{ef} = \pi \cdot r^2 \Rightarrow r = \sqrt{\frac{S_{ef}}{\pi}} = \sqrt{\frac{5 \cdot 10^{-6}}{\pi}} = 1,25 \text{ mm}$$

Doporučené velikosti izolace plechů pro asynchronní stroje volíme přílohy 12.

$$D_v = D_v + \text{izolace} = 0,8 + 0,2 = 1 \text{ mm}$$

$$D_v + (1,5 \div 2) \text{ mm} < b_0 \Rightarrow b_0 = 2,5 \text{ mm}$$

Aktivní hloubka drážky:

$$h_1 = h_{d1} - \left(h_0 + \frac{(b_2 - b_0)}{2} \right) = 17,66 - \left(0,6 + \frac{5,28 - 2,5}{2} \right) = 15,67 \text{ mm}$$

$$\text{Celková hloubka drážky: } h_d = h_1 + \frac{b_2 - b_0}{2} + h_0 = 15,67 + \frac{5,28 - 2,5}{2} + 0,6 = 17,645 \text{ mm}$$

$$\text{Plocha drážky pro vinutí: } S_d = \frac{b_1 + b_2}{2} \cdot h_1 = \frac{7,33 + 5,28}{2} \cdot 15,67 = 98,8 \text{ mm}^2$$

$$\text{Činitel plnění drážky: } K_T = \frac{\pi \cdot D_v^2 \cdot V_d' \cdot a}{4 \cdot S_d} = \frac{\pi \cdot 1^2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 24}{4 \cdot 98,8} = 0,76$$

Šířka vzduchové mezery:

$$\delta = (0,25 + D_{si}) \cdot 10^{-3} = (0,25 + 0,180) \cdot 10^{-3} = 0,43 \text{ mm} \Rightarrow \text{normujeme na } 0,45 \text{ mm}$$

2.4 Návrh rotoru

Délka rotoru: $l_2 = l_1 = 137 \text{ mm}$

Vnější průměr rotoru: $D_{re} = D_{si} - 2\delta = 180 - 2 \cdot 0,45 = 179,1 \text{ mm}$

Vnitřní průměr rotoru: $D_{ri} = D_{re} - 2(h_{d2} + h_{j2}) = 179,1 - 2 \cdot (15,91 + 57) = 33 \text{ mm}$

Počet drážek Q_2 stanovíme přílohy 13.

Drážková rozteč: $t_{d2} = \frac{\pi \cdot D_{re}}{Q_2} = \frac{\pi \cdot 179,1}{38} = 14,81 \text{ mm}$

Činitel převodu proudů: $p_i = \frac{2 \cdot m_1 \cdot N_1 \cdot k_v}{Q_2} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 96 \cdot 0,92}{38} = 13,95$

Proud v tyčích J klece: $I_{N2} = k_i \cdot I_{N1} \cdot p_i = 0,92 \cdot 32,2 \cdot 13,95 = 413,11 \text{ A}$

Předběžný průřez hliníkové tyče: $S_t = \frac{I_{N2}}{J_2} = \frac{413,11}{5 \cdot 10^6} = 82,6 \text{ mm}^2$

Proudová hustota pro hliník $J_2 = 4 \div 6 \cdot 10^6 \text{ (A} \cdot \text{m}^{-2}\text{)}$

Výška jha rotoru: $h_{j2} = \frac{\phi}{2 \cdot B_{j2} \cdot l_{Fe} \cdot k_{Fe}} = \frac{11,3 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 0,75 \cdot 0,137 \cdot 0,97} = 57 \text{ mm}$

Šířka zubu: $b_{z2} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{d2}}{B_{z2} \cdot k_{Fe}} = \frac{1 \cdot 14,81}{1,8 \cdot 0,97} = 8,48 \text{ mm}$

Šířka drážky pod krčkem: $b_1 = \frac{\pi \cdot (D_{re} - 2h_0) - Q_2 \cdot b_{z2}}{\pi + Q_2} = \frac{\pi \cdot (179,1 - 2 \cdot 0,7) - 38 \cdot 8,48}{\pi + 38} = 5,74 \text{ mm}$

Šířka drážky u dna: $b_2 = \sqrt{\frac{b_1^2 \cdot \left(\frac{Q_2 + \pi}{\pi} - 4S_t\right)}{\frac{Q_2 \cdot \pi}{\pi} - 2}} = \sqrt{\frac{5,74^2 \cdot \left(\frac{38 + \pi}{\pi} - 4 \cdot 82,6\right)}{\frac{38 \cdot \pi}{\pi} - 2}} = 3,38 \text{ mm}$

Výška drážky: $h_1 = (b_1 - b_2) \cdot \frac{Q_2}{2\pi} = (5,74 - 3,38) \cdot \frac{38}{2\pi} = 14,27 \text{ mm}$

$$h_{d2} = h_1 + \frac{b_2 - b_0}{2} + h_0 = 14,27 + \frac{3,38 - 1,5}{2} + 0,7 = 15,91 \text{ mm}$$

Plocha rotorové tyče: $S_t = \frac{\pi}{8} (b_1^2 + b_2^2) + \frac{1}{2} (b_1 + b_2) h_1 =$
 $= \frac{\pi}{8} \cdot (5,74^2 + 3,38^2) + 0,5 \cdot (5,74 + 3,38) \cdot 14,27 = 82,5 \text{ mm}^2$

Proudová hustota tyče: $J_t = \frac{I_{N2}}{S_t} = \frac{413,11}{82,5 \cdot 10^{-4}} = 5,01 \text{ Am}^{-2}$

Plocha kruhu nakrátko: $\Delta = 2 \sin \frac{\pi p}{Q_2} = 2 \sin \frac{\pi \cdot 4}{38} = 0,65$

$$I_{kn} = \frac{I_{N2}}{\Delta} = \frac{413,11}{0,65} = 635,6 \text{ A} \quad J_{kn} = k_i \cdot J_t = 0,85 \cdot 5,01 = 4,26 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$$

$$S'_{kn} = \frac{I_{kn}}{J_{kn}} = \frac{635,6}{4,26} = 149 \text{ mm}^2$$

Rozměry kruhu: $b_{kn} = 1,25 \cdot h_d = 1,25 \cdot 15,91 = 19,89 \text{ mm}$

$$a_{kn} = \frac{S'_{kn}}{b_{kn}} = \frac{149}{19,89} = 7,49 \text{ mm} \quad S_{kn} = a_{kn} \cdot b_{kn} = 7,49 \cdot 19,89 = 149 \text{ mm}^2$$

$$D_{kn} = D_{re} - b_{kn} = 179,1 - 19,89 = 159,21 \text{ mm}$$

2.5 Dimenzování magnetického obvodu

Skutečná indukce v zubu statoru: $B_{z1} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{d1} \cdot l_{Fe}}{b_{z1} \cdot l_{Fe} \cdot k_{Fe}} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{d1}}{b_{z1} \cdot k_{Fe}} = \frac{1 \cdot 0,0118}{0,00676 \cdot 0,97} = 1,8 \text{ T}$

Skutečná indukce ve jhu statoru: $B_{j1} = \frac{\phi}{2 \cdot h_{j1} \cdot l_{Fe} \cdot k_{Fe}} = \frac{0,0113}{2 \cdot 0,02834 \cdot 0,137 \cdot 0,97} = 1,5 \text{ T}$

Skutečná indukce v zubu rotoru: $B_{z2} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{d2} \cdot l_{Fe}}{b_{z2} \cdot l_{Fe} \cdot k_{Fe}} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{d2}}{b_{z2} \cdot k_{Fe}} = \frac{1 \cdot 0,01481}{0,00848 \cdot 0,97} = 1,8 \text{ T}$

Skutečná indukce ve jhu rotoru: $B_{j2} = \frac{\phi}{2 \cdot h_{j2} \cdot l_{Fe} \cdot k_{Fe}} = \frac{0,0113}{2 \cdot 0,057 \cdot 0,137 \cdot 0,97} = 0,746 \text{ T}$

Magnetické napětí ve vzduch. Mezeře:

$$k_c = \frac{t_{d1}}{t_d - \frac{\left(\frac{b_0}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{b_0}{\delta}} \cdot \delta} = \frac{0,0118}{0,0118 - \frac{\left(\frac{2,5}{0,45}\right)^2}{5 + \frac{2,5}{0,45}} \cdot 0,45 \cdot 10^{-3}} = 1,125$$

$$U_{\delta} = \frac{2}{\mu_0} \cdot B_{\delta} \cdot \delta \cdot k_c = \frac{2}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot 1 \cdot 0,45 \cdot 10^{-3} \cdot 1,125 = 805,72 \text{ A}$$

Magnetické napětí v zubu statoru: $U_{z1} = 2 \cdot h_d \cdot H_{z1} = 2 \cdot 17,645 \cdot 10^{-3} \cdot 1550 = 54,7 \text{ A}$

Magnetické napětí Jha statoru: $l_{j1} = \frac{\pi \cdot (D_{se} - h_{j1})}{2p} + h_{j1} = \frac{\pi \cdot (272 - 28,34)}{4} + 28,34 = 219,7 \text{ mm}$

$$U_{j1} = l_{j1} \cdot H_{j1} = 219,7 \cdot 10^{-3} \cdot 425 = 93,4 \text{ A}$$

Magnetické napětí v zubu rotoru: $h_{z2} = h_d - 0,1b_2 = 15,91 - 0,1 \cdot 3,38 = 15,57 \text{ mm}$

$$U_{z2} = 2 \cdot h_{z2} \cdot H_{z2} = 2 \cdot 15,57 \cdot 10^{-3} \cdot 425 = 13,23 \text{ A}$$

Magnetické napětí ve jhu rotoru:

$$l_{j2} = \frac{\pi \cdot (D_{ri} + h_{j2})}{2p} + h_{j2} = \frac{\pi \cdot (33 + 57)}{4} + 57 = 127,7 \text{ mm}$$

$$U_{j2} = l_{j2} \cdot H_{j2} = 127,7 \cdot 10^{-3} \cdot 118 = 15,07 \text{ A}$$

Magnetické napětí na pólpár:

$$F_m = U_{\delta} + U_{z1} + U_{j1} + U_{z2} + U_{j2} = 805,72 + 54,7 + 93,4 + 13,23 + 15,07 = 981 \text{ A}$$

Magnetizační proud:

$$I_{\mu} = \frac{p \cdot F_m}{0,9 \cdot m_1 \cdot N_1 \cdot k_{v1}} = \frac{2 \cdot 981}{0,9 \cdot 3 \cdot 96 \cdot 0,92} = 8,23 \text{ A}$$

$$i_{\mu} = \frac{I_{\mu}}{I_N} = \frac{8,23}{32,2} = 0,256$$

2.6 Stanovení parametrů náhradního schématu

Odpor vinutí statoru

$$\text{Střední šířka cívky: } b_c = \frac{\pi \cdot (D_{i1} + h_{d1})}{2p} = \frac{\pi \cdot (180 + 17,645)}{4} = 155 \text{ mm}$$

$$\text{Délka čela: } l_{\xi} = k_{\xi} \cdot b_c + 2 \cdot B = 1,55 \cdot 0,155 + 2 \cdot 0,025 = 290,25 \text{ mm}$$

k_{ξ} – koeficient prodloužení čela pro $2p = 4$ $k_{\xi} = 1,55$

$$\text{Střední délka závitů: } l_{av} = 2 \cdot (l_{fe} + l_{\xi}) = 2 \cdot (137 + 190,25) = 654,5 \text{ mm}$$

$$\text{Délka vinutí: } L = l_{av} \cdot N = 0,6545 \cdot 96 = 62,83 \text{ m}$$

$$R_1 = k \cdot \rho \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta t) \frac{L}{S_{ef} \cdot a} = 1 \cdot 0,0178 \cdot (1 + 0,004 \cdot 60) \cdot \frac{81,98}{0,5 \cdot 2} = 1,118 \Omega$$

Odpor rotoru

$$\text{Odpor tyče rotoru: } R_t = \rho \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta t) \frac{l_t}{S_t} \cdot k = 0,0287 \cdot (1 + 0,004 \cdot 60) \frac{0,137}{82,6} \cdot 1 = 59 \mu\Omega$$

Odpor kruhu rotoru:

$$R_k = \rho \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta t) \frac{\pi \cdot D_k}{Q_k \cdot S_k} = 0,0287 \cdot (1 + 0,004 \cdot 60) \frac{\pi \cdot 0,15921}{38 \cdot 149} = 2,53 \mu\Omega$$

$$R_2 = R_t + 2 \cdot R_k = +2 \cdot 2,53 = 64 \mu\Omega$$

Rozptylová reaktance vinutí statoru

Činitel magnetické vodivosti statorové drážky:

$$\begin{aligned} \lambda_d &= \frac{h_3}{3 \cdot b} \cdot k_{\beta} + \left(\frac{h_2}{b} + \frac{3 \cdot h_1}{b + 2 \cdot b_0} + \frac{h_0}{b_0} \right) \cdot k'_{\beta} = \\ &= \frac{0,017645}{3 \cdot 0,00528} + \left(\frac{0,0006}{0,00528} + \frac{3 \cdot 0,001567}{0,00528 + 2 \cdot 0,0025} + \frac{0,0006}{0,0025} \right) = 1,7 \end{aligned}$$

Činitel magnetické vodivosti čel vinutí statoru:

$$\beta = \frac{2}{3} \cdot \frac{q + 1}{q} = \frac{2}{3} \cdot \frac{4 + 1}{4} = 0,83$$

$$\lambda_{\xi} = 0,34 \cdot \frac{q}{p} \cdot (l_{\xi} - 0,64 \cdot \beta \cdot t_p) = 0,34 \cdot \frac{4}{2} \cdot (0,19025 - 0,64 \cdot 0,83 \cdot 0,1414) = 1,14$$

Činitel magnetické vodivosti diferenčního rozptylu statorového vinutí

$$\xi = \left(2 \cdot \frac{t_{d2}}{t_{d1}} - \frac{t_{d1}}{t_{d2}} \cdot \Delta_z \right) k_{\beta} - k_{v1} \cdot \left(\frac{t_{d2}}{t_{d1}} \right)^2 = \left(2 \cdot \frac{13}{11,5} - \frac{11,5}{13} \cdot 0,15 \right) - 0,92 \left(\frac{13}{11,5} \right)^2 = 0,9$$

$$\lambda_{dif} = \frac{t_{d1}}{12 \cdot \delta \cdot k_c} \cdot \xi = \frac{0,0115}{12 \cdot 0,00045 \cdot 1,55} \cdot 0,95 = 1,305$$

$$\begin{aligned}
 X_{1\sigma} &= 15,8 \cdot \frac{f}{100} \cdot \left(\frac{N_1}{100}\right)^2 \cdot \left(\frac{l_1}{p \cdot q}\right) \cdot (\lambda_d + \lambda_{\xi} + \lambda_{dif}) = \\
 &= 15,8 \cdot \frac{50}{100} \cdot \left(\frac{96}{100}\right)^2 \cdot \left(\frac{0,137}{2 \cdot 4}\right) \cdot (1,55 + 1,14 + 1,305) = 0,498 \Omega
 \end{aligned}$$

Rozptylová reaktance vinutí rotoru

Činitel magnetické vodivosti rotorové drážky:

$$\begin{aligned}
 \lambda_d &= \left[\frac{h_1}{3 \cdot b} \left(1 - \frac{\pi \cdot b^2}{8 \cdot S_t}\right)^2 + 0,06 - \frac{b_0}{2 \cdot b} \right] k_d + \frac{h_0}{b_0} = \\
 &= \left[\frac{0,01427}{3 \cdot 0,00574} \left(1 - \frac{\pi \cdot 0,00574^2}{8 \cdot 82,5 \cdot 10^{-6}}\right)^2 + 0,06 - \frac{0,0015}{2 \cdot 0,00574} \right] \cdot 1 + \frac{0,0007}{0,0015} = 0,985
 \end{aligned}$$

Činitel magnetické vodivosti čel vinutí rotoru

$$\begin{aligned}
 \Delta_2 &= 2 \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot p}{Q_2}\right) = 2 \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot 2}{38}\right) = 0,00577 \\
 \lambda_{\xi} &= \frac{2,3 \cdot D_{kr}}{Q_2 \cdot l_i \cdot \Delta_2} \cdot \log\left(\frac{4,7 \cdot D_{kr}}{2 \cdot a_{kr} + b_{kr}}\right) = \\
 &= \frac{2,3 \cdot 0,15921}{38 \cdot 0,137 \cdot 0,00577} \cdot \log\left(\frac{4,7 \cdot 0,15921}{2 \cdot 0,00749 + 0,01989}\right) = 8,1
 \end{aligned}$$

Činitel magnetické vodivosti diferenčního rozptylu rotorového vinutí

$$\begin{aligned}
 \xi &= 1 + \frac{1}{5} \cdot \left(\frac{\pi \cdot p}{Q_2}\right) - \frac{\Delta_z}{1 - \left(\frac{p}{Q_2}\right)^2} = 1 + \frac{1}{5} \cdot \left(\frac{\pi \cdot 2}{38}\right) - \frac{0,65}{1 + \left(\frac{2}{38}\right)^2} = 0,38 \\
 \lambda_{dif} &= \frac{t_{dz}}{12 \cdot \delta \cdot k_c} \cdot \xi = \frac{0,01481}{12 \cdot 0,00045 \cdot 1,125} \cdot 0,38 = 0,926 \\
 X_{2\sigma} &= 7,9 \cdot f_1 \cdot l_2 \cdot (\lambda_d + \lambda_{\xi} + \lambda_{dif}) \cdot 10^{-3} = \\
 &= 7,9 \cdot 50 \cdot 0,137 \cdot (0,985 + 8,1 + 0,926) \cdot 10^{-3} = 0,2 \text{ m}\Omega
 \end{aligned}$$

Převod statorových veličin na rotor

Odpor fáze rotorového vinutí přepočítané na stator

$$R'_2 = R_2 \cdot p = R_2 \cdot 4 \cdot m \cdot \frac{(N_1 \cdot k_{v1})^2}{Q_2} = 64 \cdot 10^{-6} \cdot 4 \cdot 3 \cdot \frac{(96 \cdot 0,92)^2}{38} = 0,16 \Omega$$

Rozptylová reaktance fáze rotoru přepočítaná na stator

$$X'_{2\sigma} = X_{2\sigma} \cdot p = X_{2\sigma} \cdot 4 \cdot m \cdot \frac{(N_1 \cdot k_{v1})^2}{Q_2} = 0,2 \cdot 10^{-3} \cdot 4 \cdot 3 \cdot \frac{(96 \cdot 0,92)^2}{38} = 0,55 \Omega$$

Odpor příčné větve

$$R_{Fe} = \frac{\Delta P_{Fe}}{m \cdot I_{\mu}^2} = \frac{149,5}{3 \cdot 16,46^2} = 0,18 \Omega$$

Vzájemná indukčnost statoru a rotoru

$$X_{\mu} = \frac{U_n}{I_{\mu}} - X_{1\sigma} = \frac{230}{16,46} - 0,181 = 13,8 \Omega$$

2.7 Stanovení účinnosti stroje

Hlavní ztráty v železe statoru

$$\begin{aligned} \Delta P_{FEh} &= \Delta p_{1,0} \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{\beta} \cdot (k_{dj} \cdot B_{j1}^2 \cdot m_{j1} + k_{dz} \cdot B_{z1}^2 \cdot m_{z1}) = \\ &= 1,75 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1,4} \cdot (1,6 \cdot 1,5^2 \cdot 23,18 + 1,8 \cdot 1,8^2 \cdot 6,11) = 109 \text{ W} \end{aligned}$$

Hmotnost jha statoru

$$\begin{aligned} m_{j1} &= \frac{\pi}{4} \cdot (D_e^2 - (D_e - 2 \cdot h_{j1})^2) \cdot l_{FE} \cdot \rho_{FE} \\ m_{j1} &= \frac{\pi}{4} \cdot (0,272^2 - (0,272 - 2 \cdot 0,02834)^2) \cdot 0,137 \cdot 7800 = 23,18 \text{ kg} \end{aligned}$$

Hmotnost zubů statoru

$$\begin{aligned} m_{z1} &= h_{z1} \cdot b_{z1} \cdot Q_1 \cdot l_{FE} \cdot \rho_{FE} \\ m_{z1} &= 0,017645 \cdot 0,00676 \cdot 48 \cdot 0,137 \cdot 7800 = 6,11 \text{ kg} \end{aligned}$$

Hmotnost jha rotoru

$$m_{j2} = \frac{\pi}{4} \cdot (0,1791^2 - (0,1791 - 2 \cdot 0,057)^2) \cdot 0,137 \cdot 7800 = 23,36 \text{ kg}$$

Hmotnost zubů rotoru

$$m_{z2} = 0,057 \cdot 0,00338 \cdot 38 \cdot 0,137 \cdot 7800 = 7,82 \text{ kg}$$

Povrchové ztráty ve statoru a rotoru:

$$\begin{aligned} p_{\delta pi} &= 0,5 \cdot k_{oi} \cdot \left(\frac{Q_x \cdot n}{10000}\right)^{1,5} \cdot (B_{oi} \cdot t_{ax} \cdot 10^3)^2 \\ p_{\delta p1} &= 0,5 \cdot 1,6 \cdot \left(\frac{48 \cdot 1500}{10000}\right)^{1,5} \cdot (0,315 \cdot 0,0118 \cdot 10^3)^2 = 213,5 \\ p_{\delta p2} &= 0,5 \cdot 1,6 \cdot \left(\frac{38 \cdot 1500}{10000}\right)^{1,5} \cdot (0,203 \cdot 0,01481 \cdot 10^3)^2 = 98,4 \end{aligned}$$

$$B_{oi} = \beta_0 \cdot k_c \cdot B_{\delta}$$

$$B_{o1} = 0,28 \cdot 1,125 \cdot 1 = 0,315$$

$$B_{02} = 0,18 \cdot 1,125 \cdot 1 = 0,203$$

$$\Delta P_{\delta pi} = p_{\delta pi} \cdot (t_{di} - b_{oi}) \cdot Q_i \cdot l_{FEi}$$

$$\Delta P_{\delta p1} = 213,5 \cdot (0,0118 - 0,0025) \cdot 48 \cdot 0,137 = 13,06 \text{ W}$$

$$\Delta P_{\delta p2} = 98,4 \cdot (0,01481 - 0,0015) \cdot 38 \cdot 0,137 = 6,81 \text{ W}$$

Pulzní ztráty:

$$\gamma_1 = \frac{\left(\frac{b_{oi}}{\delta}\right)^2}{\left(5 + \frac{b_{oi}}{\delta}\right)} = \frac{\left(\frac{2,5}{0,45}\right)^2}{\left(5 + \frac{2,5}{0,45}\right)} = 2,92 \quad \gamma_2 = \frac{\left(\frac{1,5}{0,45}\right)^2}{\left(5 + \frac{1,5}{0,45}\right)} = 1,33$$

$$B_{p1} = \frac{\gamma_X \cdot \delta}{2 \cdot t_{di}} \cdot B_{zi} = \frac{2,92 \cdot 0,00045}{2 \cdot 0,0118} \cdot 1,8 = 0,055 \quad B_{p2} = \frac{1,33 \cdot 0,00045}{2 \cdot 0,01481} \cdot 1,5 = 0,02$$

$$\Delta P_{pi} = 0,11 \cdot \left(\frac{Q_x \cdot n}{10000} \cdot B_{pi}\right)^2 \cdot m_{zi} \quad \Delta P_{p1} = 0,11 \cdot$$

$$\left(\frac{48 \cdot 1500}{10000} \cdot 0,055\right)^2 \cdot 6,11 = 10,5 \text{ W}$$

$$\Delta P_{p2} = 0,11 \cdot \left(\frac{36 \cdot 1500}{10000} \cdot 0,02\right)^2 \cdot 7,82 = 10,03 \text{ W}$$

Celkové ztráty v železe:

$$\Delta P_{FE} = \Delta P_{FEh} + \Delta P_{\delta p1} + \Delta P_{\delta p2} + \Delta P_{p1} + \Delta P_{p2}$$

$$\Delta P_{FE} = 109 + 13,06 + 6,81 + 10,5 + 10,03 = 149,5 \text{ W}$$

Jouleovy ztráty ve vinutí statoru:

$$\Delta P_{j1} = m_1 \cdot R_1 \cdot I_1^2 = 3 \cdot 1,18 \cdot 32,2^2 = 1223 \text{ W}$$

Jouleovy ztráty ve vinutí rotoru:

$$\Delta P_{j2} = m_2 \cdot R_2 \cdot I_2^2 = 38 \cdot 0,16 \cdot 413^2 = 718 \text{ W}$$

Mechanické a ventilační ztráty:

$$\Delta P_{mech} = K_T \cdot \left(\frac{n}{1000}\right)^2 \cdot (10 \cdot D_e)^3 = 7 \cdot \left(\frac{1500}{1000}\right)^2 \cdot (10 \cdot 0,272)^3 = 316 \text{ W}$$

$$\Delta P_N = \Delta P_{FE} + \Delta P_j + \Delta P_{mech} = 150 + 1223 + 718 + 316 = 2407 \text{ W}$$

Přídavné ztráty:

$$\Delta P_{přid} = 0,5\% \cdot \Delta P_N = 0,005 \cdot 2407 = 12 \text{ W}$$

Celkové ztráty:

$$\begin{aligned} \Delta P &= \Delta P_{FE} + \Delta P_j + \Delta P_{mech} + \Delta P_{přid} = \\ &= 150 + 1223 + 718 + 316 + 12 = 2419 \text{ W} \end{aligned}$$

Účinnost vypočítaná ze ztrát

$$\eta = 1 - \frac{\Delta P}{P_1} = 1 - \frac{2419}{21440} = 0,887$$

Účinnost vypočítaná z výkonu:

$$\eta = \frac{P_2}{\Delta P + P_2} = \frac{18000}{2419 + 18000} = 0,881$$

2.8 Pracovní charakteristiky stroje**Jmenovitý skluz**

$$s_n = R'_2 \cdot \frac{I_1}{U_{f1}} = 0,16 \cdot \frac{32,2}{230} = 0,0224$$

Jmenovité otáčky hřídele

$$n_2 = n_1 \cdot (1 - s_n) = 1500 \cdot (1 - 0,0224) = 1466,4 \text{ ot./min}$$

Jmenovitý moment

$$M_n = \frac{P_2}{\omega_2} = \frac{18000}{153,56} = 117,2 \text{ Nm}$$

Hopkinsonův činitel rozptylu

$$c_1 = 1 + \frac{X_{1\sigma}}{X_\mu} = 1 + \frac{0,181}{13,8} = 1,013$$

Průběh momentu

$$M_{(s)} = \frac{p \cdot m_1}{2 \cdot \pi \cdot f_1} \cdot \frac{U_f^2 \cdot \frac{R'_2}{s}}{\left(R_1 + c_1 \cdot \frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_{1\sigma} + c_1 \cdot X'_{2\sigma})^2}$$

Skluz v bode zvratu

$$s_z = \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_{1\sigma} + X'_{2\sigma})^2}} = \frac{0,16}{\sqrt{1,118^2 + (0,181 + 0,55)^2}} = 0,12$$

Moment v bode zvratu

$$M_{max} = \frac{p \cdot m_1}{2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_1} \cdot \frac{U_f^2}{R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_{1\sigma} + c_1 \cdot X'_{2\sigma})^2}} =$$

$$= \frac{2 \cdot 3}{2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50} \cdot \frac{230^2}{1,118 + \sqrt{1,118^2 + (0,181 + 1,013 \cdot 0,55)^2}} = 205 \text{ Nm}$$

2.9 Oteplení stroje

Oteplení drážkové části:

Jouleovy ztráty v drážkové části

$$\Delta P_{jd1} = k_{\rho} \cdot \Delta P_{j1} \cdot \frac{2 \cdot l_{Fe}}{l_{av}} = 1,07 \cdot 1223 \cdot \frac{2 \cdot 0,137}{0,8545} = 420 \text{ W}$$

Teplotní závislost v drážkové části

$$\begin{aligned} \Delta T_{izd} &= \frac{\Delta P_{jd1}}{Q_1 \cdot Q_d \cdot l_{Fe}} \cdot \left(\frac{b_i}{\lambda_i} + \frac{b_1 + b_2}{16 \cdot \lambda_{ekv}} \right) \\ &= \frac{988,5}{48 \cdot 0,048 \cdot 0,137} \cdot \left(\frac{0,002}{0,3} + \frac{(7,33 + 5,28) \cdot 10^{-3}}{16 \cdot 0,45} \right) = 25,8^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

Odvod drážky

$$Q_d = 2 \cdot h_d + b_1 + b_2 = 2 \cdot 17,645 + 7,33 + 5,28 = 47,9 \text{ mm}$$

Oteplení železa

$$\Delta T_{Fe} = K \cdot \frac{\Delta P_{jd1} + \Delta P_{Fe}}{\pi \cdot D_1 \cdot \alpha_1 \cdot l_{Fe}} = 0,18 \cdot \frac{988,5 + 150}{\pi \cdot 180 \cdot 10^{-3} \cdot 105 \cdot 0,137} = 32,8^{\circ}\text{C}$$

Oteplení čel vinutí

Jouleovy ztráty ve vinutí

$$\Delta P_{j\check{c}1} = k_{\rho} \cdot \Delta P_{j1} \cdot \frac{2 \cdot l_{\check{c}1}}{l_{av}} = 1,07 \cdot 1223 \cdot \frac{2 \cdot 0,19025}{0,8545} = 580 \text{ W}$$

Teplotní spád izolace čela vinutí

$$\begin{aligned} \Delta T_{iz\check{c}} &= \frac{\Delta P_{j\check{c}1}}{2 \cdot Q_1 \cdot Q_d \cdot l_{\check{c}1}} \cdot \left(\frac{b_{i\check{c}}}{\lambda_i} + \frac{h_d}{12 \cdot \lambda_{ekv}} \right) \\ &= \frac{580}{2 \cdot 48 \cdot 0,048 \cdot 0,190} \cdot \left(\frac{0,002}{0,3} + \frac{17,645 \cdot 10^{-3}}{12 \cdot 0,45} \right) = 6,6^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

Oteplení vnějšího povrchu čel nad teplotu vzduchu

$$\Delta T_{pov\check{c}} = K \cdot \frac{\Delta P_{j\check{c}1}}{2 \cdot \pi \cdot D \cdot \alpha_1 \cdot l_{v1}} = 0,18 \cdot \frac{580}{2 \cdot \pi \cdot 0,225 \cdot 105 \cdot 0,190} = 3,7^{\circ}\text{C}$$

Oteplení vinutí na teplotu vnitřního vzduchu

$$\begin{aligned} \Delta T_{vinuti} &= \frac{(\Delta T_{Fe} + \Delta T_{izd}) \cdot 2 \cdot l_{Fe}}{l_{av1}} + \frac{(\Delta T_{iz\check{c}} + \Delta T_{pov\check{c}}) \cdot l_{\check{c}1}}{l_{av1}} = \\ &= \frac{(32,8 + 25,8) \cdot 2 \cdot 0,137}{0,8545} + \frac{(15,5 + 8,8) \cdot 0,225}{0,8545} = 25,1^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

Oteplení vnitřního vzduchu

$$\Delta T_{vz} = \frac{\sum P_{out}}{S_{out} \cdot \alpha_v} = \frac{\sum \Delta P - (1 - K) \cdot (\Delta P_{jd1} + \Delta P_{Fe}) - 0,9 \cdot \Delta P_{mech}}{(\pi \cdot D_e + 8 \cdot O_z) \cdot (l_{Fe} + 2 \cdot l_{v1})} =$$

$$= \frac{2407 - (1 - 0,18) \cdot (988,5 + 150) - 0,9 \cdot 316}{(\pi \cdot 0,272 + 8 \cdot 0,34) \cdot (0,137 + 2 \cdot 0,190)} = 35^{\circ}\text{C}$$

Oteplení vinutí

$$\Delta T_{vin} = \Delta T_{vinuti} + \Delta T_{vz} = 25 + 35 = 60^{\circ}\text{C}$$

Potřebný průchod vzduchu pro ventilaci

$$Q = \frac{\sum P}{1100 \cdot 2 \cdot \Delta T_{vz}} = \frac{2407}{1100 \cdot 2 \cdot 35} = 0,03 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Průtok vzduchu dodávaného vnitřním ventilátorem

$$Q = 0,6 \cdot D_e^3 \cdot \frac{n}{100} = 0,6 \cdot 0,272^3 \cdot \frac{1500}{100} = 0,18 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

3 Simulace asynchronního stroje pomocí MKP

3.1 Úvod do metody konečných prvků

Metoda konečných prvků je numerická metoda pro řešení a popisu chování různých technických disciplín a umožňuje tak řešit elektromagnetismus, proudění různých médií, akustické problémy, vedení tepla nebo mechaniku.

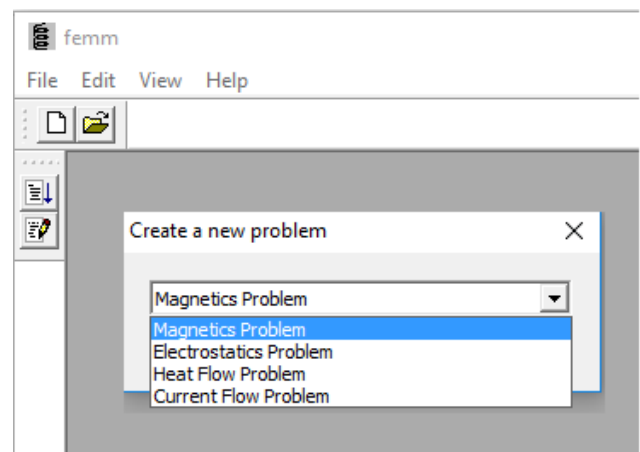
Způsob jakým je daná problematika řešena je obsažen v názvu a to je rozdělení dané oblasti na konečný počet elementů a vytvořit tak síť tělesa. Hustota volby sítě obvykle závisí na řešení dané problematiky a výrazně ovlivňuje přesnost získaných výsledků. [7]

Největší předností metody konečných prvků je, že umožňuje řešení i složitějších těles, který bychom pomocí analytických metod řešili jen obtížně. Naopak výhodou analytických metod je, že výsledek dostáváme v nekonečném spektru bodů, ovšem při změně vstupních parametrů je nutno celý výpočet absolvovat znovu. [7]

3.2 Postup modelování asynchronního stroje v softwaru Femm

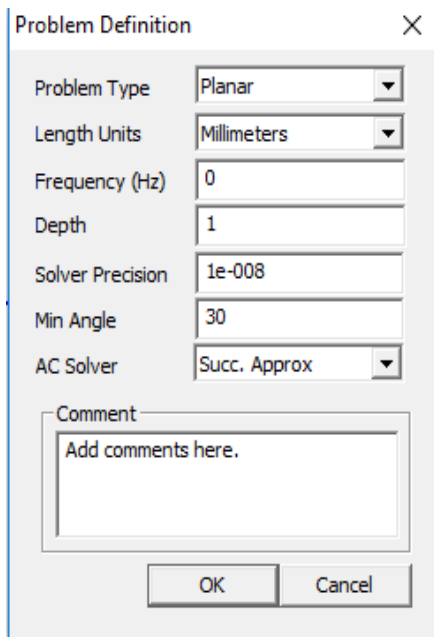
Pro modelování navrženého stroje, je vhodné si danou součást stroje nakreslit v nějakém sofistikovanějším programu jakou jsou například softwary od společnosti Autodesk, protože program má velice omezené kreslicí funkce a ušetříme tak spoustu času při vykreslování složitějších tvarů. Je však nutné použít takový software, který nám umožňuje vytvořit soubor ve formátu .dxf, protože simulační program jiné formáty nezpracuje.

Po spuštění programu Femm nutné na začátek zvolit jaký typ problému budeme řešit, v mém případě se jedná o magnetické pole, pomocí kterého získám výslednou momentovou charakteristiku.

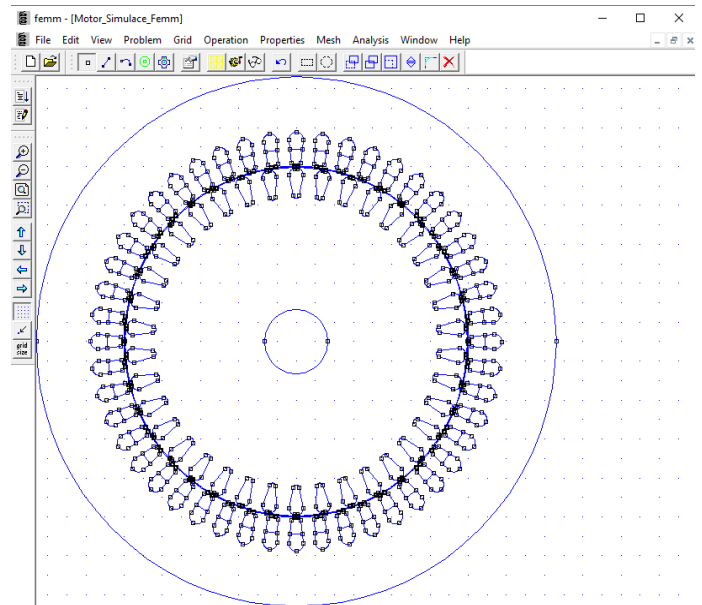


Obr. 3.1 Volba problému

Následně je nutné definovat řešení daného problému, zvolením správné soustavy, jednotek a nastavit jemnost sítě. Poté importujeme námi nakreslený objekt.

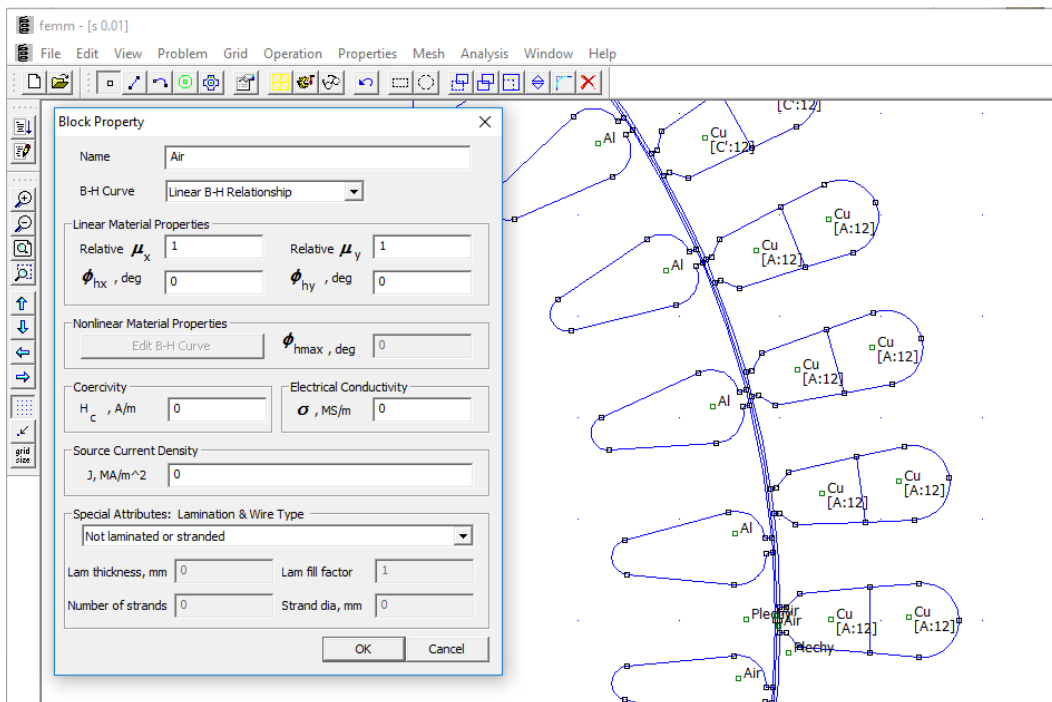


Obr. 3.2 Definování problém



Obr. 3.3 Import průřezu

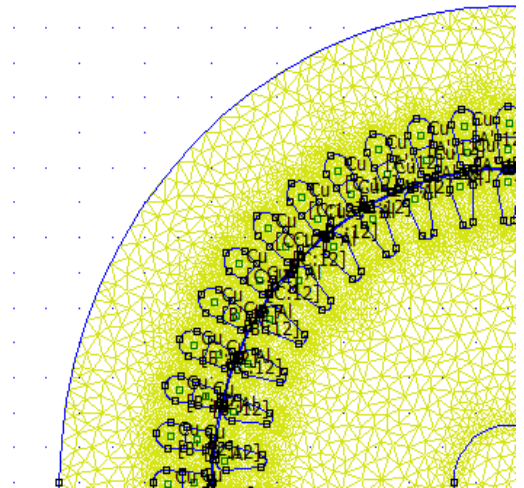
Po úspěšném importu je nutné nastavit použité materiálové vlastnosti a přiřadit je jednotlivým tvarovým částem, s tím souvisí i nastavení počtů závitů a velikostí proudů v jednotlivých cívkových svazcích.



Obr. 3.4 Nastavení materiálových vlastností

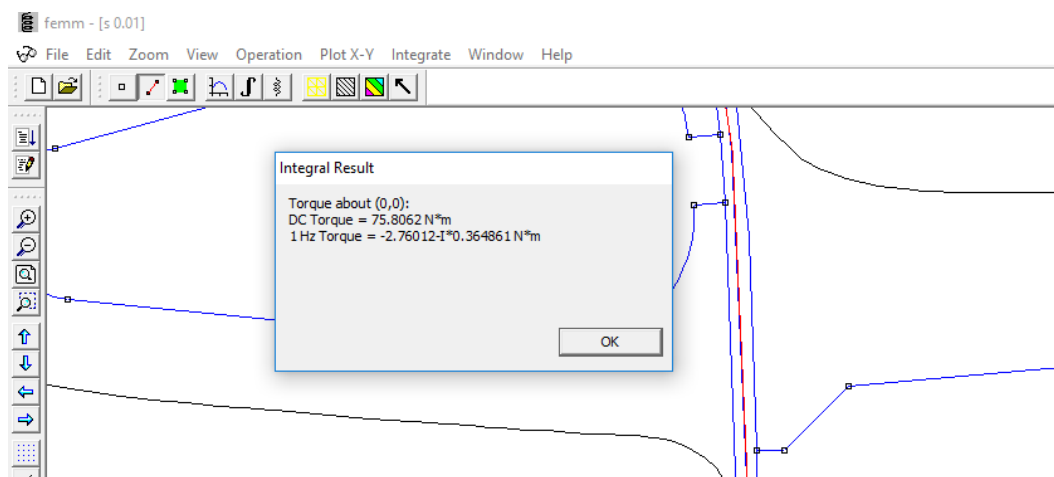
Pro získání přesných výsledků je nutno zvolit síť dostatečně jemnou, ale při volbě hustoty sítě musíme myslet na to, že čím více konečných prvků zvolíme, tím prodloužíme dobu výpočtu.

Tento krok je velice důležitý, obzvláště pokud potřebujeme tuto simulaci provádět opakovaně jako v mém případě, kdy je potřeba simulaci řešit pro jednotlivé skluzu a jim odpovídající proudy. Při zadávání hodnot skluzů a jim odpovídajícím proudů je nutné tak činit s co největší přesností, protože i malé odchylky způsobují velké rozdíly ve výsledcích výsledného momentu.



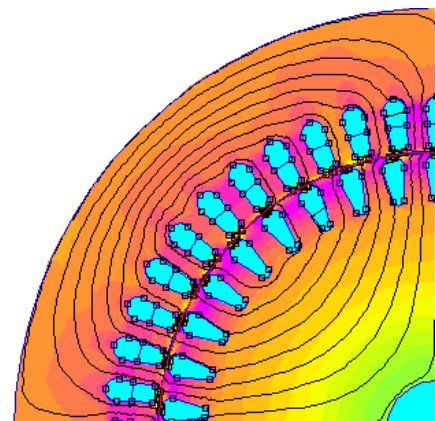
Obr. 3.5 Hustota prvků

Výslednou velikost momentu pro jednotlivé skluzu pak získáme změřením na integrační cestě uprostřed vzduchové mezery.



Obr. 3.6 Výsledný moment

Program umožňuje i celou řadu jiných měření jako je například rozložení magnetické indukce, rozložení proudové hustoty nebo zobrazení výsledných siločar magnetického pole.



Obr. 3.7. Sycení magnetického obvodu

3.3 Stanovení náhradních parametrů numerickým modelem

Stanovení magnetizační reaktance X_μ

Numerickým modelem ze softwaru Femm si ze stavu naprázdno, tudíž pro skluz = 0 nasimulujeme průřez rotoru, kde si pomocí integrálu přes plochu vyjádříme energii magnetického pole W_m . Dle vztahu (3.3-1) si vyjádříme energii vztaženou na jednu fázi.

$$W_{mf} = \frac{W_m}{m} \quad (3.3-1)$$

Ze vztahu pro energii magnetického pole si vyjádříme magnetickou indukčnost

$$L = \frac{2W_{mf}}{I_\mu^2} \quad (3.3-2)$$

Výslednou reaktanci X_μ získáme ze vztahu (3.3-3)

$$X_\mu = \omega_1 L_p \quad (3.3-3)$$

Stanovení ztrát v železe R_{Fe}

Numerickým softwarem Femm si pomocí integrálu přes plochu železa zjistíme ztráty v železe ΔP_{Fe} . Pro výpočet R_{Fe} si z komplexního tvaru proudu I_0 vyjádříme efektivní hodnotu činné složky a vypočteme dle vztahu (3.3-4)

$$R_{Fe} = \frac{\Delta P_{Fe}}{m I_{ef}^2} \quad (3.3-4)$$

Stanovení odporu statoru R_1

Pomocí ztrát v drážce (resistive losses) ze stavu nakrátko, pro skluz = 1, si vyjádříme ztrátovou energii ΔP_j . Dle vztahu (3.3-5) si vyjádříme odpor jedné drážky.

$$R_d = \frac{\Delta P_j}{I_{ef}^2} \quad (3.3-5)$$

Výsledný odpor fáze statoru stanovíme ze vztahu

$$R_1 = R_d \frac{Q_1}{m} \quad (3.3-6)$$

Stanovení magnetizační reaktance $X_{1\sigma}$

Pro stroj ze stavu nakrátko si zjistíme magnetickou energii drážky W_m . Dle vztahu (3.3-7) si vyjádříme indučnost jedné drážky.

$$L_d = \frac{2W_{mf}}{I_{ef}^2} \quad (3.3-7)$$

Magnetickou indukčnost jedné fáze vypočítáme dle vztahu

$$L = L_d \frac{Q_1}{m} \quad (3.3-8)$$

Výslednou rozptylovou reaktanci statoru vypočítáme ze vztahu

$$X_{1\sigma} = L\omega_s = L2\pi f \quad (3.3-9)$$

Stanovení magnetizační reaktance $X'_{2\sigma}$

Pro stanovení magnetizační reaktance si v softwaru Femm zjistíme magnetickou energii jedné rotorové tyče W_m , dle vztahu (3.3-10) vypočítáme magnetickou indukčnost rotorové tyče.

$$L_t = \frac{2W_m}{I_t^2} \quad (3.3-10)$$

Reaktanci rotorové tyče vyjádříme dle vztahu (3.3-11).

$$X_t = \omega L_t \quad (3.3-11)$$

Výslednou rozptylovou reaktanci získáme ze vztahu (3.3-12) kde p_z je impedanční převod a κ je největší společný dělitel počtu pólpárů a počtu drážek.

$$X_2' = p_z \frac{X_u}{\kappa} \quad (3.3-12)$$

Stanovení rotorového odporu R'_2

Opět použijeme model pro stav nakrátko, tudíž skluz = 1. Přes integrační plochu jedné rotorové tyče si stanovíme její ztráty (resistive losses). Pro výpočet odporu jedné tyče potřebujeme znát efektivní hodnotu proudu jedné tyče, Odpor jedné tyče získáme ze vztahu (3.3-13).

$$R_t = \frac{\Delta P_t}{I_{ef}^2} \quad (3.3-13)$$

Rotorový odpor R_{2t} získáme ze vztahu (3.3-14) kde κ je největší společný dělitel počtu pólpárů a počtu drážek.

$$R_{2t} = \frac{R_t}{\kappa} \quad (3.3-14)$$

Výsledný rotorový odpor R'_2 získáme dle vztahu X, kde p_u a p_i jsou převody napětí a proudu

$$R_2' = \frac{p_u}{p_i} \cdot R_{2t} \quad (3.3-15)$$

4 Závěr

Na závěr můžete vidět rozdíly mezi analytickým a numerickým řešením výsledné momentové charakteristiky. Chyba mezi těmito dvěma metodami je z velké části způsobena přesností vypočítaných proudů, které se pak pro jednotlivé skluzu definují v drážkách modelovaného asynchronního stroje v numerickém softwaru. Odchytky v řádech několika desetin ampér nebo deseti tisícín skluzu se pak projevují jako desítky v rozdílu velikosti momentu.

Způsob jak tuto chybu eliminovat je softwarový výpočet fázových proudů a skluzu s absolutní přesností. Tudíž přesnost analytického a numerického řešení považuji za velice dobrou.

Rozdíl mezi náhradními parametry získanými analytickou a numerickou metodou, můžete vidět v Tab. 4.2. Rozdíl mezi nimi je způsoben tím, že použitá numerická metoda modelování pomocí řezu motoru vůbec nezahrnuje parametry motoru v jeho čelech a nerespektuje tedy reálné konstrukční uspořádání stroje.

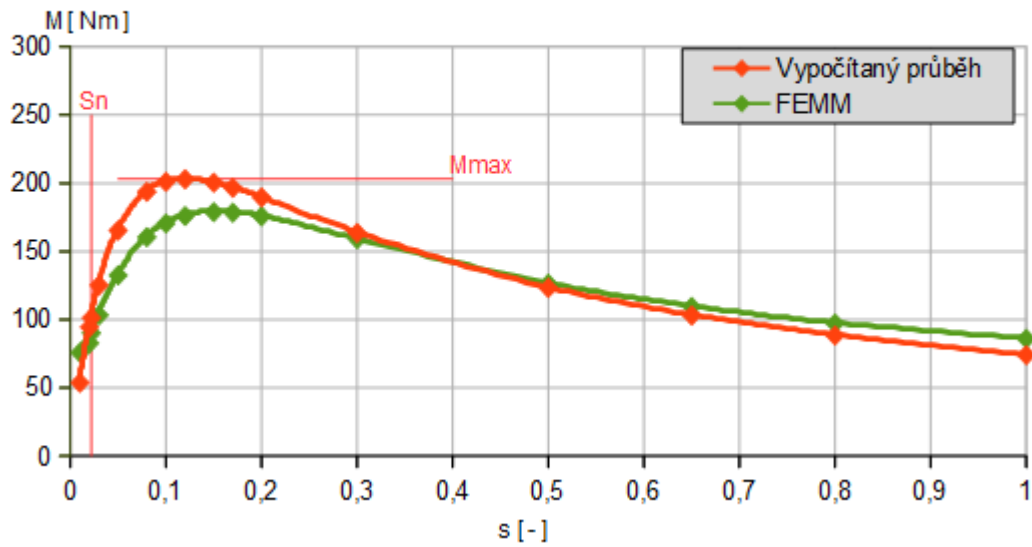
Tab.4.1: Tabulka výsledných momentů pro jednotlivé skluzu

s [-]	0,01	0,02	0,022	0,03	0,05	0,08	0,10	0,12	0,15	0,17	0,20	0,30	0,50	0,65	0,80	1,00
M [Nm] – analytické	54	94	101	125	165	194	201	203	200	197	190	164	123	103	88	74
M [Nm] – FEMM	76	83	90	103	132	160	171	176	179	178	176	159	126	109	97	86
Rozdíl mezi metodami [%]	-29	12	11	18	20	17	15	13	11	9	7	3	-3	-6	-10	-16

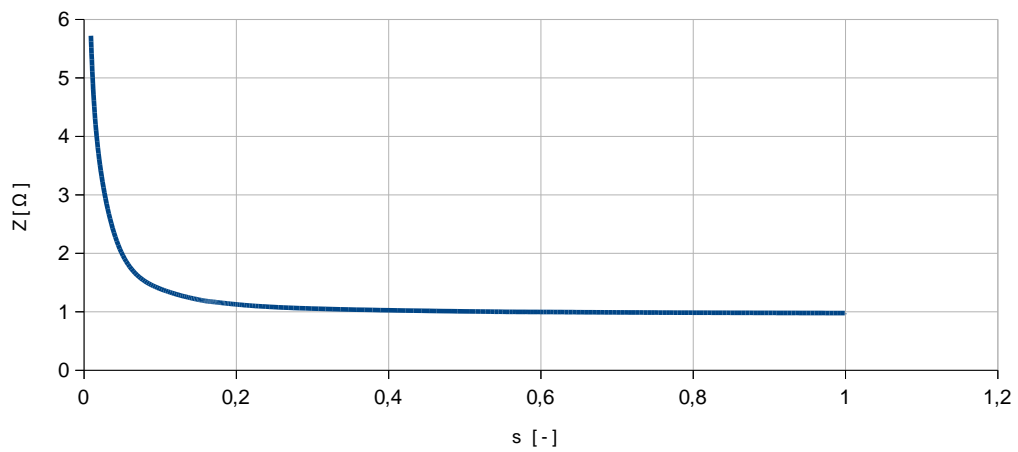
Tab. 4.2 Tabulka vypočítaných hodnot náhradních parametrů

Náhradní parametry	Analytická metoda	Numerická metoda
R_1 [Ω]	1,11	0,82
R'_2 [Ω]	0,16	0,23
$X_{1\sigma}$ [Ω]	0,49	0,66
$X'_{2\sigma}$ [Ω]	0,55	0,58
X_μ [Ω]	13,8	9,8
R_{Fe} [Ω]	0,74	0,56

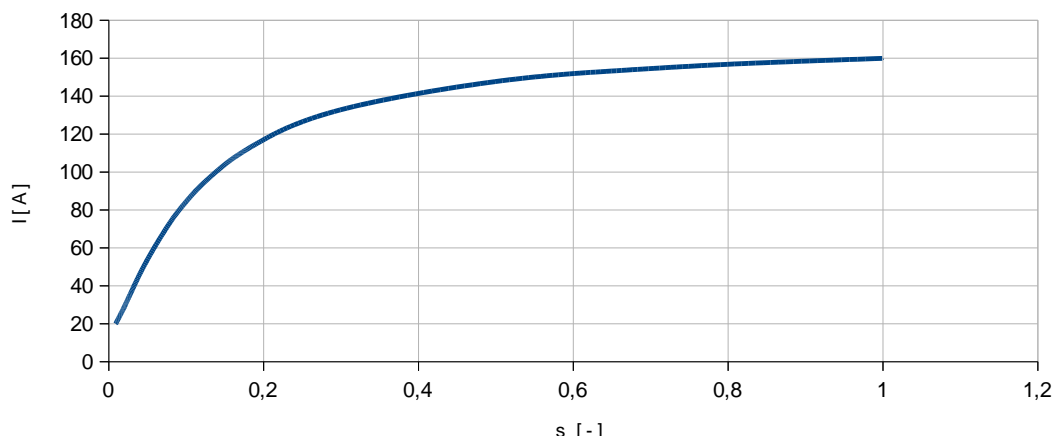
Průběh momentu asynchronního stroje



Obr. 4.1 Momentová charakteristika



Obr. 4.2 Závislost impedance na skluzu

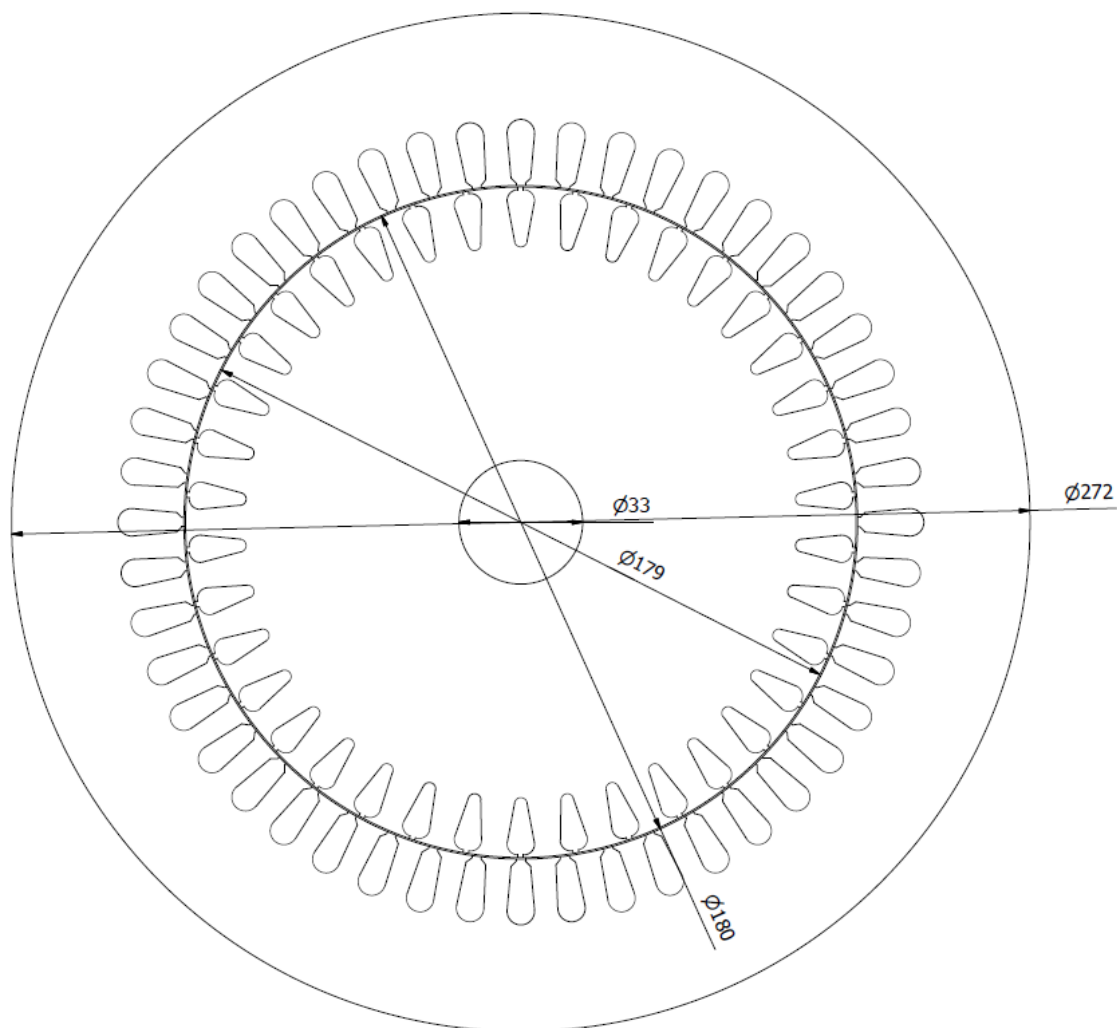


Obr. 4.3 Závislost proudu na skluzu

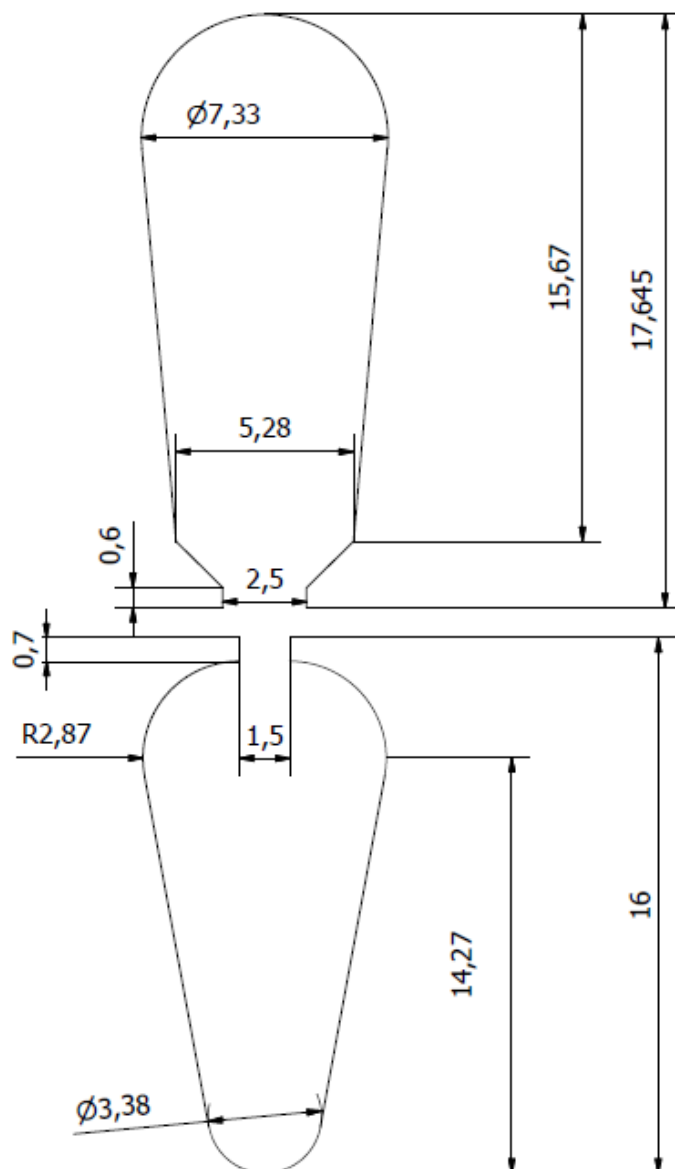
Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] Bartoš, Václav. *Teorie elektrických strojů*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2006. 230 s. ISBN 80-7043-509-7.
- [2] Bartoš, Václav. Červený, Josef. Hruška Josef. Kotlanová, Anna. Skala, Bohumil. *Elektrické stroje*. 1.vyd Západočeská univerzita v Plzni 2006 ISBN 80-7043-444-9
- [3] spse.dobruska.cz. *Asynchronní stroje*. [online]. [Cit. 20.5.2016] Dostupné z: <http://www.spse.dobruska.cz/download/sokol/AM.pdf>
- [4] Slíde player. *Asynchronní a synchronní stroje*. [online]. [Cit. 20.5.2016]. Dostupné z: <http://slideplayer.cz/slide/2283941/>
- [5] Cigánek, Ladislav. *Stavba elektrických strojů*. 1.vyd SNTL Praha v r. 1958 L25b-C3-4-II/5198
- [6] I. P. Kopylov a kol. *Stavba elektrických strojů*. 1.vyd SNTL Praha v r. 1988 L25C3-IV-41f/58667
- [7] Old.uk.fme.vutbr.cz. *Metoda konečných prvků*. [online]. [Cit. 20.5.2016]. Dostupné z: http://old.uk.fme.vutbr.cz/kestazeni/MKP/prednaska1_mkp.pdf
- [8] Hruška, Karel. *Speciální klece asynchronních strojů*. Dizertační práce. ZČU v Plzni, 2011

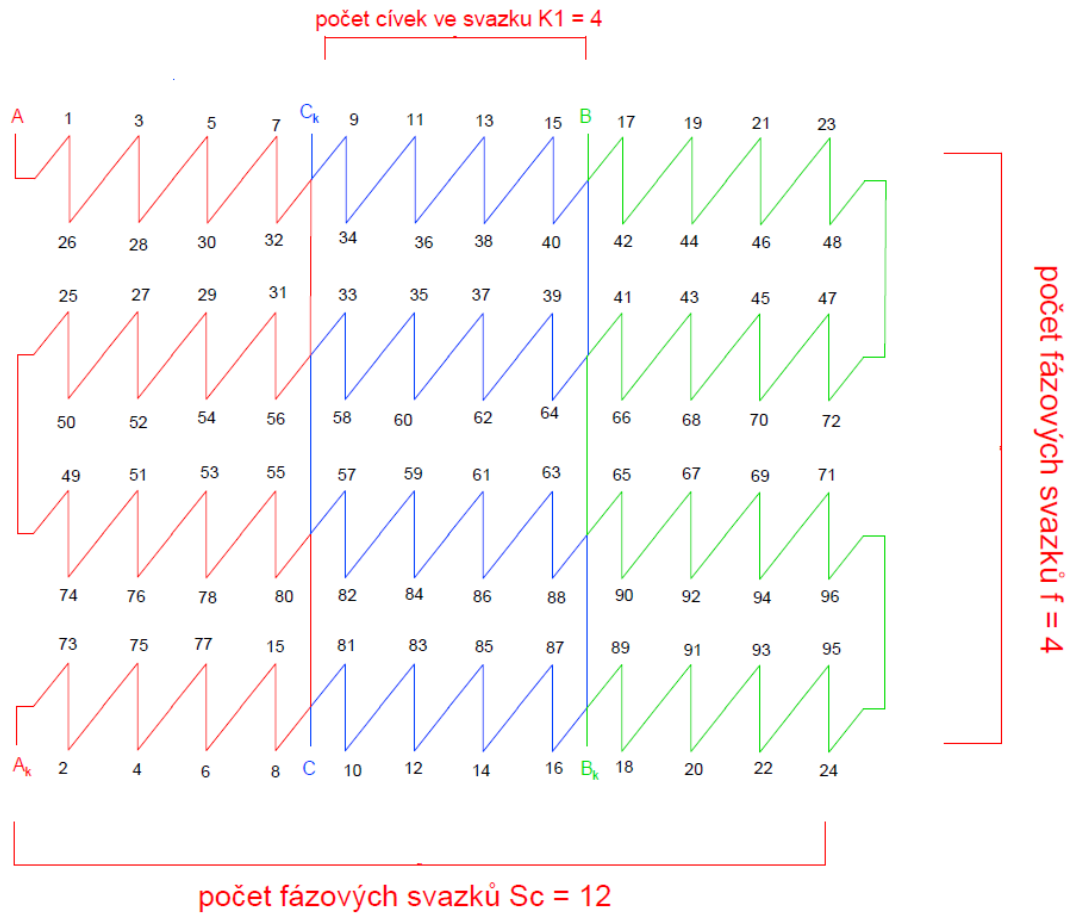
Přílohy



Příloha 1: Řez statoru a rotoru



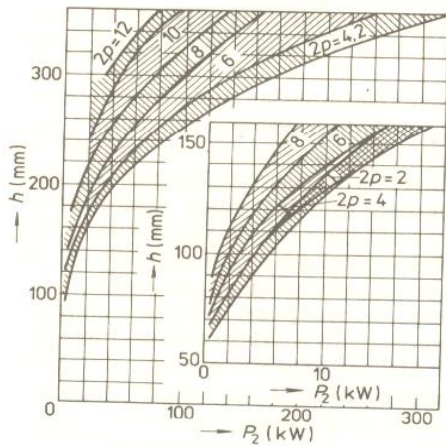
Příloha 2: Detail drážek motoru



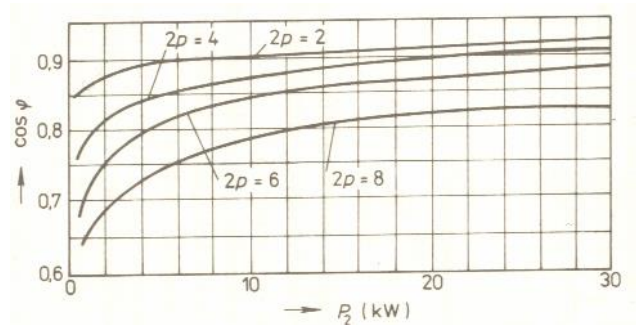
Příloha 3: Pilové schéma zapojení pro jednu paralelní větev v počtu cívkových stran

$2p$	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

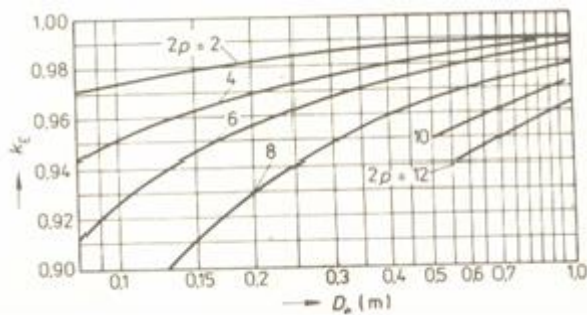
Příloha 4: Tabulka činitele poměru průměru statoru [6]



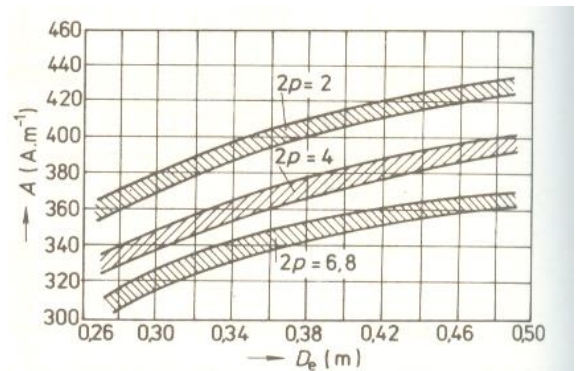
Příloha 5: Osová výška stroje v závislosti na výkonu na hřídeli [6]



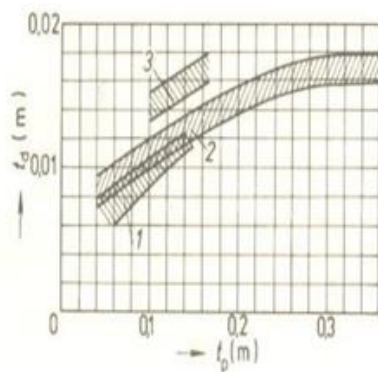
Příloha 6: Závislost účinníku na výkonu na hřídeli [6]



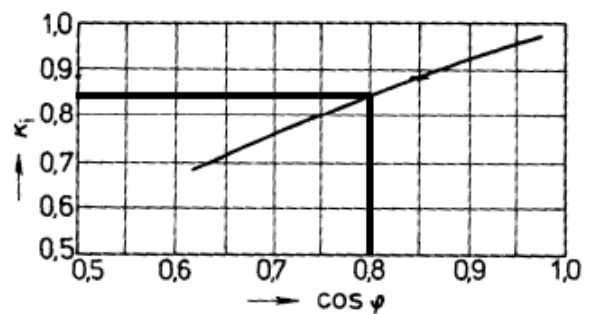
Příloha 7: Poměr indukovaného napětí v závislosti na průměru stroje [6]



Příloha 8: Obvodová hustota v závislosti na průměru stroje [6]



Příloha 9: Drážková rozteč statoru pro vsypávaná vinutí [6]



Příloha 10: Proudová hustota rotoru [6]

Část magnetického obvodu	Označení	IP 44					IP 23					
		2p	2	4	6	8	10 a 12	2	4	6	8	10
Jho statoru	B_{s1}	1,4 až 1,6			1,15 až 1,35	1,1 až 1,2	1,45 až 1,6			1,2 až 1,4	1,1, až 1,3	
Zuby statoru s rovnoběžnými stěnami (vsypávané vinutí, drážky S, L)	B_{z1}	1,7 až 1,9				1,6 až 1,8	1,9 až 2,1	1,8 až 2,0			1,7 až 1,9	
Zuby statoru v nejužším průřezu drážky polozavřené F	B_{z1max}	1,75 až 1,95					1,9 až 2,1	1,8 až 2,0				
drážky otevřené N, M		1,6 až 1,8					1,7 až 1,9					
Jho rotoru nakrátko kroužkového motorů na 6 000 V	B_{r2}	$\leq 1,45$ — —	$\leq 1,25$ $\leq 1,25$ $\leq 1,55$	$\leq 1,15$ $\leq 1,05$ $\leq 1,30$	$\leq 0,85$ $\leq 0,75$ $\leq 1,0$	$\leq 1,55$ — —	$\leq 1,35$ $\leq 1,35$ $\leq 1,45$	$\leq 1,25$ $\leq 1,15$ $\leq 1,20$	$\leq 0,95$ $\leq 0,85$ $\leq 1,0$			
Zuby rotoru s rovnoběžnými stěnami (drážky V, W)	B_{r2}	1,75 až 1,85					1,8 až 1,95					
Zuby v nejužším průřezu rotoru nakrátko kroužkového	B_{z2max}	— —	1,5 až 1,7 1,85 až 2,05	1,45 až 1,60 1,75 až 1,9		— —	1,6 až 1,8 2,0 až 2,2	1,55 až 1,70 1,9 až 2,05				

Príloha 11: Tabulka dovolených hodnot magnetické indukce [6]

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	6 000	lakování	0,95	lakování	0,95	lakování	0,95

Príloha 12: Doporučené způsoby izolace a činitele plnění železa pro asynchronní motory [6]

2p	Q_1	Q_2		2p	Q_1	Q_2	
		drážky nenatočené	drážky natočené			drážky nenatočené	drážky natočené
2	12	9*, 15*	—	8	48	(34), 36, 44, 62, 64	35, 44, 61, 63, 65
	18	11*, 12*, 15*, 21*, 22*	14*, (18), 19*, 22*, 26, 28*, (30), 31, 33, 34, 35		72	56, 58, 86, 88, 90	56, 57, 59, 85, 87, 89
	24	15*, (16*), 17*, 19, 32	18, 20, 26, 31, 33, 34, 35		84	66, (68), 70, 98, 100, 102, 104	(68), (69), (71), (97), (99), (101)
	30	22, 38	(18), 20, 21, 23, 24, 37, 39, 40	96	78, 82, 110, 112, 114	79, 80, 81, 83, 109, 111, 113	
	36	26, 28, 44, 46	25, 27, 29, 43, 45, 47	10	60	44, 46, 74, 76	57, 69, 77, 78, 79
42	32, 33, 34, 50, 52	—	90		68, 72, 74, 76, 104, 106, 108, 110, 112, 114	70, 71, 73, 87, 93, 107, 109	
4	48	38, 40, 56, 58	37, 39, 41, 55, 57, 59	120	86, 88, 92, 94, 96, 98, 102, 104, 106, 134, 136, 138, 140, 142, 144, 146	90, 101, 103, 117, 123, 137, 139	
	12	9*	15*	12	72	56, 64, 80, 88	69, 75, 80, 89, 91, 92
	18	10*, 14*	18*, 22*		90	68, 70, 74, 88, 98, 106, 108, 110	(71), (73), 86, 87, 93, 94, (107), (109),
	24	15*, 16*, 17, (32)	16, 18, (20), 30, 33, 34, 35, 36		108	86, 88, 92, 100, 116, 124, 128, 130, 132	84, 89, 91, 104, 105, 111, 112, 125, 127
	36	26, 44, 46	(24), 27, 28, 30, (32), 34, 45, 48		144	124, 128, 136, 152, 160, 164, 166, 168, 170, 172	125, 127, 141, 147, 161, 163
42	(34), (50), 52, 54	(33), 34, (38), (51), 53	84		74, 94, 102, 104, 106	75, 77, 79, 89, 91, 93, 103	
48	34, 38, 56, 58, 62, 64	(36), (38), (39), 40, (44), 57, 59					

Príloha 13: Tabulka pro volbu počtu drážek [6]