

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ  
ELEKTRONIKY**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Analýza návrhu asynchronního stroje metodou  
konečných prvků**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2016/2017

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Markéta KYDLÍČKOVÁ**  
Osobní číslo: **E15N0127P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Průmyslová elektronika a elektromechanika**  
Název tématu: **Analýza návrhu asynchronního stroje metodou konečných prvků**  
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. Podle zadání vedoucího práce proveďte návrh asynchronního stroje s klecí nakrátko.
2. Na základě elektromagnetického návrhu nakreslete rozměrový výkres stroje.
3. Konečně prvkovou analýzou určete parametry náhradního schématu stroje a momentovou charakteristiku stroje.
4. Porovnejte výsledky konečně prvkové analýzy s hodnotami vypočtenými 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: **14. října 2016**

Termín odevzdání diplomové práce: **19. května 2017**

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



Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2016

## **Abstrakt**

Předkládaná diplomová práce byla zaměřena na výpočtový návrh asynchronního motoru s klecí nakrátko, určení parametrů náhradního schéma a momentové charakteristiky s následným ověřením hodnot, získaných analytickým výpočtem metodou konečných prvků a jejich vzájemným porovnáním.

## **Klíčová slova**

3-f asynchronní motor, návrh asynchronního motoru, klec nakrátko, momentová charakteristika, náhradní schéma, FEMM, metoda konečných prvků

## **Abstract**

This diploma thesis focused on the design of asynchronous motor with squirrel cage, determination of equivalent circuit parameters and torque characteristics with subsequent verification of values obtained by analytical calculation by finite element method and their mutual comparison.

## **Key words**

Three-phase induction motor, design of asynchronous motor, squirrel cage, torque characteristic, equivalent circuit, Finite element method

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala 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 19.5.2017

Markéta Kydlíčková

## **Poděkování**

Především bych ráda poděkovala vedoucímu diplomové práce Ing. Janu Šobrovi, za jeho čas a cenné rady při konzultacích práce, za jeho připomínky a metodické vedení práce. Také bych ráda poděkovala své rodině, především za psychickou podporu během zpracování práce.

## Obsah

<b>1</b>	<b>ASYNCHRONNÍ STROJ</b> .....	<b>19</b>
1.1	ASYNCHRONNÍ MOTORY S KLEČÍ NAKRÁTKO .....	19
1.2	ASYNCHRONNÍ MOTORY S KROUŽKOVOU KOTVOU .....	19
1.3	KLECE ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ .....	20
1.3.1	Vírová klec .....	21
	<b>PRINCIP VÍROVÉ KLECE</b> .....	21
1.3.2	Boucherotova klec (dvojitá klec) .....	22
	TVARY DRÁŽEK BOUCHEROTOVY KLECE .....	22
	<b>PRINCIP DVOJITÉ KLECE</b> .....	22
<b>2</b>	<b>NÁVRH ASYNCHRONNÍHO STROJE</b> .....	<b>23</b>
	MINIMÁLNÍ A MAXIMÁLNÍ DRÁŽKOVÁ ROZTEČ .....	29
	DRÁŽKOVÁ ROZTEČ STATORU .....	30
	JMENOVIÝ PROUD VINUTÍ STATORU .....	30
	POČET ZÁVITŮ STATOROVÉHO VINUTÍ .....	30
	POČET DRÁŽEK .....	30
	POČET CÍVEK .....	31
	PŘEDNÍ CÍVKOVÝ KROK V POČTU DRÁŽEK NA PÓL .....	31
	POČET FÁZOVÝCH SVAZKŮ .....	31
	POČET FÁZOVÝCH SVAZKŮ NA FÁZI .....	31
	POČET CÍVEK VE SVAZKU .....	31
	SKUTEČNÁ LINEÁRNÍ PROUDOVÁ HUSTOTA .....	31
	POMĚRNÉ ZKRÁCENÍ KROKU .....	31
	PŘEDBĚŽNÁ PROUDOVÁ HUSTOTA .....	32
	PŘEDBĚŽNÝ PRŮŘEZ EFEKTIVNÍHO VODIČE .....	32
	PRŮŘEZ JEDNOTLIVÉHO VODIČE .....	33
<b>2.1</b>	<b>VÝPOČET ROZMĚRŮ DRÁŽEK A ZUBŮ STATORU</b> .....	<b>33</b>
	ČINITEL PLNĚNÍ ŽELEZA .....	33
	ŠÍŘKA ZUBU STATORU .....	33
	VÝŠKA ZUBU STATORU .....	33
	VÝŠKA STATOROVÉHO JHA .....	33
	HLOUBKA DRÁŽKY .....	33
	ŠÍŘKA DNA DRÁŽKY .....	34
	ŠÍŘKA VRCHOLU DRÁŽKY .....	34
	AKTIVNÍ HLOUBKA DRÁŽKY .....	34
	ČINITEL PLNĚNÍ DRÁŽKY .....	34
	VELIKOST VZDUCHOVÉ MEZERY .....	34
<b>2.2</b>	<b>VÝPOČET ROTORU</b> .....	<b>35</b>
	VNĚJŠÍ PRŮMĚR ROTORU .....	35
	VNITŘNÍ PRŮMĚR ROTORU .....	35
	DĚLKA ROTORU .....	35
	POČET ROTOROVÝCH DRÁŽEK .....	35
	DRÁŽKOVÁ ROZTEČ ROTORU .....	35
	ČINITEL PŘEPOČTU PROUDŮ .....	35
	PROUD V TYČI .....	35
	PROUDOVÁ HUSTOTA V TYČI ROTORU .....	36
	PRŮŘEZ TYČE .....	36
	PROUD V KRUHU NAKRÁTKO .....	36
	PROUDOVÁ HUSTOTA V KRUHU .....	36
	PRŮŘEZ KRUHU .....	36
	ROZMĚRY KRUHU NAKRÁTKO .....	36
	VÝŠKA ROTOROVÉHO JHA .....	36
	ŠÍŘKA ZUBU ROTORU .....	37



ŠÍŘKA DRÁŽKY POD KRČKEM .....	37
ŠÍŘKA DRÁŽKY U DNA.....	37
HLOUBKA ROTOROVÉ DRÁŽKY .....	37
<b>2.3 MAGNETICKÝ OBVOD.....</b>	<b>37</b>
MAGNETICKÁ INDUKCE V ZUBECH STATORU .....	37
MAGNETICKÁ INDUKCE V ZUBECH ROTORU .....	37
MAGNETICKÁ INDUKCE VE JHU STATORU .....	38
MAGNETICKÁ INDUKCE VE JHU ROTORU.....	38
CARTERŮV ČINITEL .....	38
MAGNETICKÉ NAPĚTÍ VZDUCHOVÉ MEZERY .....	38
MAGNETICKÉ NAPĚTÍ ZUBU STATORU.....	38
MAGNETICKÉ NAPĚTÍ ZUBU ROTORU .....	38
ČINITEL NASYCENÍ ZUBŮ .....	38
STŘEDNÍ DÉLKA INDUKČNÍ ČÁRY VE JHU STATORU.....	39
MAGNETICKÉ NAPĚTÍ JHA STATORU .....	39
STŘEDNÍ DÉLKA INDUKČNÍ ČÁRY VE JHU ROTORU .....	39
VÝŠKA JHA ROTORU .....	39
MAGNETICKÉ NAPĚTÍ JHA ROTORU.....	39
MAGNETICKÉ NAPĚTÍ NA JEDNU PÓLOVOU DVOJICI.....	39
ČINITEL NASYCENÍ MAGNETICKÉHO OBVODU .....	39
MAGNETIZAČNÍ PROUD.....	39
POMĚRNÁ HODNOTA MAGNETIZAČNÍHO PROUDU .....	40
<b>2.4 VÝPOČET PRVKŮ NÁHRADNÍHO SCHÉMA.....</b>	<b>40</b>
STŘEDNÍ ŠÍŘKA CÍVKY .....	40
DÉLKA DRÁŽKOVÉ ČÁSTI.....	40
DÉLKA ČELA CÍVKY .....	40
VYLOŽENÍ ČEL STATOROVÉHO VINUTÍ.....	40
STŘEDNÍ DÉLKA ZÁVITU .....	41
DÉLKA VODIČŮ JEDNÉ FÁZE STATOROVÉHO VINUTÍ.....	41
ODPOR JEDNÉ FÁZE STATOROVÉHO VINUTÍ .....	41
POMĚRNÁ HODNOTA STATOROVÉHO ODPORU .....	41
ODPOR TYČE ROTOROVÉHO VINUTÍ .....	41
ODPOR KRUHU NAKRÁTKO .....	41
ODPOR FÁZE ROTOROVÉHO VINUTÍ.....	41
ODPOR FÁZE ROTORU PŘEPOČTENÝ NA POČET ZÁVITŮ STATORU.....	41
POMĚRNÁ HODNOTA PŘEPOČTENÉHO ODPORU .....	42
ČINITEL $K_B$ .....	42
ČINITEL $K'_B$ .....	42
ČINITEL MAGNETICKÉ VODIVOSTI V DRÁŽCE .....	42
ČINITEL MAGNETICKÉ VODIVOSTI DIFERENČNÍHO ROZPTYLU.....	42
ROZPTYLOVÁ REAKTANCE FÁZE STATOROVÉHO VINUTÍ .....	43
POMĚRNÁ HODNOTA ROZPTYLOVÉ REAKTANCE.....	43
ČINITEL MAGNETICKÉ VODIVOSTI DRÁŽKY ROTOROVÉHO VINUTÍ .....	43
ČINITEL MAGNETICKÉ VODIVOSTI ČEL ROTOROVÉHO VINUTÍ .....	43
ČINITEL MAGNETICKÉ VODIVOSTI DIFERENČNÍHO ROZPTYLU ROTORU .....	44
CELKOVÝ ČINITEL MAGNETICKÉ VODIVOSTI ROTOROVÉHO VINUTÍ .....	44
ROZPTYLOVÁ REAKTANCE FÁZE ROTOROVÉHO VINUTÍ.....	44
PŘEPOČÍTANÁ ROZPTYLOVÁ REAKTANCE ROTOROVÉHO VINUTÍ .....	44
POMĚRNÁ HODNOTA ROZPTYLOVÉ REAKTANCE ROTOROVÉHO VINUTÍ.....	45
<b>2.5 VÝPOČET ZTRÁT .....</b>	<b>45</b>
HĚMOTNOST JHA STATORU .....	45
HĚMOTNOST ZUBŮ STATORU .....	45
HĚMOTNOST ZUBŮ ROTORU .....	45
HĚMOTNOST V ŽELEZE.....	45
PULSUJÍCÍ INDUKCE VE VZDUCHOVÉ MEZEŘE NAD HLAVAMI ZUBŮ STATORU.....	46
HUSTOTA POVRCHOVÝCH ZTRÁT STATORU .....	46
POVRCHOVÉ ZTRÁT V STATORU .....	46

PULSUJÍCÍ INDUKCE VE VZDUCHOVÉ MEZEŘE NAD HLAVAMI ZUBŮ ROTORU .....	46
HUSTOTA POVRCHOVÝCH ZTRÁT ROTORU .....	47
POVRCHOVÉ ZTRÁTY V ROTORU.....	47
HMOTNOST ZUBŮ ROTORU.....	47
INDUKCE PULZACÍ VE STŘEDNÍM PRŮŘEZU ZUBU STATORU.....	47
PULZNÍ ZTRÁTY V ZUBECH STATORU .....	47
INDUKCE PULZACÍ VE STŘEDNÍM PRŮŘEZU ZUBU ROTORU .....	48
PULZNÍ ZTRÁTY V ZUBECH ROTORU .....	48
DODATEČNÉ ZTRÁTY V ŽELEZE .....	48
CELKOVÉ ZTRÁTY V ŽELEZE .....	48
MECHANICKÉ ZTRÁTY A VENTILAČNÍ ZTRÁTY .....	48
PŘÍDAVNÉ ZTRÁTY .....	49
DODATEČNÉ ZTRÁTY.....	49
ELEKTRICKÉ ZTRÁTY VE VŠECH FÁZÍCH VINUTÍ STATORU.....	49
ELEKTRICKÉ ZTRÁTY V KLECOVÉM VINUTÍ ROTORU NAKRÁTKO.....	49
ELEKTRICKÉ ZTRÁTY STATORU PŘI CHODU NAPRÁZDNO.....	49
CELKOVÉ ZTRÁTY .....	49
ÚČINNOST VYPOČITANÁ ZE ZTRÁT .....	49
ČINNÝ PROUD NAPRÁZDNO MOTORU .....	49
ÚČINÍK NAPRÁZDNO .....	50
<b>2.6 ZATĚŽOVACÍ CHARAKTERISTIKY.....</b>	<b>50</b>
ODPOR PŘÍČNÉ VĚTVE DLE NÁHRADNÍHO SCHÉMATU .....	50
REAKTANCE PŘÍČNÉ VĚTVE DLE NÁHRADNÍHO SCHÉMATU .....	50
ČINITEL $\Gamma$ .....	50
ČINITEL ROZPTYLU.....	50
JMENOVITÝ SKLUZ .....	50
<b>2.7 TEPELNÝ VÝPOČET .....</b>	<b>51</b>
ELEKTRICKÉ ZTRÁTY V DRÁŽKÁCH .....	51
ČINITEL ZVÝŠENÍ ZTRÁT PRO IZOLACI TŘÍDY F.....	51
ELEKTRICKÉ ZTRÁTY V ČELECH CÍVEK.....	51
OTEPLENÍ VNITŘNÍHO POVRCHU STATOROVÉHO SVAZKU NAD TEPLOTU VZDUCHU UVNITŘ STROJE.....	51
TEPLOTNÍ SPÁD V IZOLACI DRÁŽKOVÉ ČÁSTI.....	52
VÝPOČTOVÝ OBVOD STATOROVÉ DRÁŽKY.....	52
TEPLOTNÍ SPÁD NA TLOUŠŤCE IZOLACE ČEL.....	52
OTEPLENÍ VNĚJŠÍHO POVRCHU ČEL NAD TEPLOTU VZDUCHU UVNITŘ STROJE.....	53
STŘEDNÍ OTEPLENÍ STATOROVÉHO VINUTÍ NAD TEPLOTU VZDUCHU UVNITŘ STROJE.....	53
SOUČET ZTRÁT.....	53
SOUČET VŠECH ZTRÁT ODVÁDĚNÝCH DO VZDUCHU UVNITŘ STROJE.....	53
EKVIVALENTNÍ OCHLAZOVACÍ POVRCH TĚLESA STROJE .....	53
OTEPLENÍ VZDUCHU VE STROJI NAD TEPLOTU OKOLÍ.....	54
STŘEDNÍ OTEPLENÍ STATOROVÉHO VINUTÍ NAD TEPLOTU OKOLÍ.....	54
<b>2.8 VÝPOČET VENTILACE.....</b>	<b>55</b>
POTŘEBNÝ PRŮTOK VZDUCHU PRO VENTILACI .....	55
PRŮTOK VZDUCHU, KTERÝ DODÁVÁ VNĚJŠÍ VENTILÁTOR .....	55
<b>3 OVĚŘENÍ NÁVRHU POMOCÍ METODY KONEČNÝCH PRVKŮ .....</b>	<b>56</b>
ZÍSKÁNÍ JEDNOTLIVÝCH HODNOT PRO VÝPOČET .....	59
<b>STANOVENÍ PARAMETRŮ NÁHRADNÍHO SCHÉMA .....</b>	<b>60</b>
<b>3.1 STANOVENÍ MAGNETIZAČNÍ REAKTANCE <math>X_M</math>.....</b>	<b>60</b>
ENERGIE MAGNETICKÉHO POLE PŘEPOČTENÁ NA JEDNU FÁZI .....	60
VZTAH PRO MAGNETICKOU INDUKČNOST .....	60
VÝSLEDNÁ MAGNETIZAČNÍ REAKTANCE.....	60
<b>3.2 STANOVENÍ ODPORU RESPEKTUJÍCÍHO ZTRÁTY V ŽELEZE <math>R_{FE}</math>.....</b>	<b>60</b>
<b>3.3 STANOVENÍ STATOROVÉHO ODPORU <math>R_1</math>.....</b>	<b>61</b>

ODPOR STATOROVÉ DRÁŽKY.....	61
VÝSLEDNÝ STATOROVÝ ODPOR.....	61
<b>3.4 STANOVENÍ ROZPTYLOVÉ REAKTANCE <math>X_{1f}</math></b> .....	61
ENERGIE MAGNETICKÉHO POLE V DRÁŽCE PŘEPOČTENÁ NA JEDNU FÁZI.....	61
VZTAH PRO MAGNETICKOU INDUKČNOST .....	61
VÝSLEDNÁ MAGNETIZAČNÍ REAKTANCE.....	61
<b>3.5 STANOVENÍ ROZPTYLOVÉ REAKTANCE <math>X'_{2\sigma}</math></b> .....	61
REAKTANCE ROTOROVÉ TYČE.....	62
VÝSLEDNÁ ROZPTYLOVÁ REAKTANCE.....	62
<b>3.6 STANOVENÍ ROTOROVÉHO ODPORU <math>R'_2</math></b> .....	62
ODPOR TYČE PŘEPOČÍTANÝ NA JEDNU FÁZI .....	62
ROTOROVÝ ODPOR .....	62
VÝSLEDNÝ ODPOR.....	62

## **Úvod**

Tato diplomová práce byla zaměřena na návrh asynchronního stroje. Na základě elektromagnetického výpočtu byly zhotoveny parametry stroje a rozměrový výkres. Metodou konečných prvků poté byly stanoveny parametry náhradního schéma a momentová charakteristika stroje. V závěru této práce bylo provedeno porovnání hodnot získaných analytickým výpočtem v bodu zadání 1 s výsledky, které byly získány metodou konečných prvků nasimulovaných v programu FEMM 4.2.

Text je rozdělen do čtyřech částí, v první jsem se zabývala konstrukcí asynchronních strojů s klecí nakrátko, v druhé části jsem provedla návrh asynchronního stroje. V třetí části popisoval prostředí v programu FEMM a následné získání hodnot pro ověření výpočtu. V závěru jsem pak uvedla porovnání analytického výpočtu se získanými hodnotami z programu FEMM.

## Seznam symbolů a zkratek

$P_2$ .....	Výstupní výkon [W]
$n$ .....	Otáčky [ot/min]
$U_N$ .....	Jmenovité napětí [V]
$f$ .....	Frekvence [Hz]
$m$ .....	Počet fází [-]
$p$ .....	Počet pólových dvojic [-]
$h$ .....	Výška osy stroje [m]
$D_e$ .....	Vnější průměr statoru [m]
$D$ .....	Vnitřní průměr statoru [m]
$t_p$ .....	Pólová rozteč [m]
$K_e$ .....	Poměr indukovaného napětí vinutí k jmenovitému napětí [-]
$\eta$ .....	Účinnost stroje [-]
$\cos \varphi$ .....	Účinník [-]
$P_i$ .....	Vnitřní výkon stroje [W]
$k_{v1}$ .....	Předběžný činitel vinutí
$k_B$ .....	Činitel tvaru pole [-]
$\alpha_\delta$ .....	Činitel pólového krytí [-]
$\omega_s$ .....	synchronní rychlost [rad/s]
$l_i$ .....	ideální délka stroje [m]
$\lambda$ .....	Štíhlostní poměr stroje [-]
$l_{FE}$ .....	Délka železa stroje [m]
$Q_1$ .....	Počet drážek na statoru [-]
$q$ .....	Počet drážek na pól a fázi [-]
$t_{d1}$ .....	Drážková rozteč statoru [-]
$I_{1N}$ .....	Jmenovitý proud vinutí statoru [A]
$V_d$ .....	Počet vodičů v drážce [-]
$N$ .....	Počet závitů [-]
$A$ .....	Lineární proudová hustota [A/m]
$\beta$ .....	Poměrné zkrácení kroku [-]
$k_y$ .....	Činitel kroku [-]
$k_r$ .....	Činitel rozlohy [-]

$k_v$ .....	Činitel vinutí [-]
$\Phi$ .....	Magnetický tok [Wb]
$B_\delta$ .....	Indukce ve vzduchové mezeře [T]
$AJ$ .....	A-J kritérium, hustota proudu ve vinutí [ $A^2/m^3$ ]
$S_{ef}$ .....	Efektivní průřez vodiče [ $m^2$ ]
$np$ .....	počet dílčích vodičů [-]
$S_v$ .....	Průřez vodiče [ $m^2$ ]
$J_1$ .....	Proudová hustota ve statorovém vinutí [ $A/m^2$ ]
$B_{j1}$ .....	Indukce ve jhu statoru [T]
$B_{z1}$ .....	Indukce v zubu statoru [T]
$B_{z1max}$ .....	Indukce v zubech statoru v nejužším průřezu [T]
$k_{fe}$ .....	Činitel plnění železa [-]
$b_{z1}$ .....	Šířka zubu statoru [m]
$h_{z1}$ .....	Výška zubu statoru [m]
$h_{j1}$ .....	Výška statorového jha [m]
$h_d$ .....	Hloubka drážky [m]
$b_1$ .....	Šířka dna drážky [m]
$b_0$ .....	Šířka drážky v horní části [m]
$b_2$ .....	Šířka vrcholu drážky [m]
$h_1$ .....	Aktivní hloubka drážky [m]
$S_d$ .....	Plocha drážky [ $m^2$ ]
$K_T$ .....	Činitel plnění drážky [-]
$\delta$ .....	Vzduchová mezera [m]
$B_{j2}$ .....	Indukce jha rotoru [T]
$B_{z2}$ .....	Indukce v zubu rotoru [T]
$B_{z2max}$ .....	Indukce v nejužším průřezu rotoru [T]
$h_{j2}$ .....	Výška jha rotoru [m]
$D_{e2}$ .....	Vnější průměr rotoru [m]
$D_{i2}$ .....	Vnitřní průměr rotoru [m]
$k_h$ .....	Činitel pro výpočet průměru hřídele [-]
$Q_2$ .....	Počet drážek rotoru [-]
$k_i$ .....	Činitel respektující vliv magnetizačního proudu [-]

$P_i$ .....	Převod stroje [-]
$I_2$ .....	Proud v tyčích rotoru [A]
$J_2$ .....	Proudová hustota v tyči rotoru [A/m <sup>2</sup> ]
$S_t$ .....	Průřez tyče rotoru [m <sup>2</sup> ]
$\alpha$ .....	Pootočení proudu v tyčích [rad]
$I_{kr}$ .....	Proud v kruhu nakrátko [A]
$J_{kr}$ .....	Proudová hustota v kruhu [A/m <sup>2</sup> ]
$S_{kr}$ .....	Průřez kruhu [m <sup>2</sup> ]
$a_{kr}$ .....	rozměr kruhu a [m]
$b_{kr}$ .....	rozměr kruhu b [m]
$b_{z2}$ .....	Šířka zubu [m]
$h_{z2}$ .....	Výška zubu [m]
$t_{d2}$ .....	Drážková rozteč na rotoru [m]
$h_0$ .....	výška otevření drážky [m]
$b_0$ .....	Šířka drážky na rotoru [m]
$h_{d2}$ .....	Hloubka rotorové drážky [m]
$k_c$ .....	Carterův činitel [-]
$U_\delta$ .....	Magnetické napětí ve vzduchové mezeře [A]
$H_{z1}$ .....	Intenzita magnetického pole v zubu statoru [A/m]
$H_{j1}$ .....	Intenzita magnetického pole ve jhu statoru [A/m]
$H_{z2}$ .....	Intenzita magnetického pole v zubu rotoru [A/m]
$H_{j2}$ .....	Intenzita magnetického pole ve jhu rotoru [A/m]
$U_{z1}$ .....	Magnetické napětí na zubu statoru [A]
$U_{z2}$ .....	Magnetické napětí na zubu rotoru [A]
$l_{j1}$ .....	Délka střední magnetické indukční čáry jha statoru [m]
$U_{j1}$ .....	Magnetické napětí ve jhu statoru [A]
$l_{j2}$ .....	Délka střední magnetické indukční čáry jha rotoru [m]
$U_{j2}$ .....	Magnetické napětí ve jhu rotoru [A]
$F_m$ .....	Výsledné magnetické napětí na jednu pólovou dvojici [A]
$I_\mu$ .....	Magnetizační proud [A]
$i_\mu$ .....	Poměrná hodnota magnetizačního proudu [-]
$R_1$ .....	Odpor vinutí statoru [ $\Omega$ ]

$k$ .....	Činitel zvětšení odporu vlivem skinefektu [-]
$\rho_{Cu}$ .....	Měrný odpor mědi [ $\Omega\text{m}$ ]
$L$ .....	Celková délka vodiče [m]
$l_{av}$ .....	Střední délka závitů [m]
$l_{\xi}$ .....	Délka čela [m]
$k_{\xi}$ .....	Koeficient prodloužení čel [-]
$b_c$ .....	Střední šířka cívký [m]
$B$ .....	Rovný úsek cívký [m]
$R_2$ .....	Odpor rotoru [ $\Omega$ ]
$\rho_{Al}$ .....	Měrný odpor hliníku [ $\Omega\text{m}$ ]
$R_t$ .....	Odpor tyče rotoru [ $\Omega$ ]
$R_{kr}$ .....	Odpor kruhu rotoru [ $\Omega$ ]
$R_2'$ .....	Přepočítaný odpor na počet závitů [ $\Omega$ ]
$X_{1\sigma}$ .....	Rozptylová reaktance statoru [ $\Omega$ ]
$\lambda_d$ .....	Činitel rozptylu drážky [-]
$\lambda_{\xi}$ .....	Činitel rozptylu čela [-]
$\lambda_{dif}$ .....	Diferenční činitel rozptylu [-]
$k_c$ .....	Diferenční činitel [-]
$k_{\beta}$ .....	Činitel tvaru pole [-]
$X_{2\sigma}$ .....	Rozptylová reaktance rotoru [ $\Omega$ ]
$\Delta_2$ .....	Činitel přepočtu proudu v kruhu na proud v tyči [-]
$X_{2\sigma}'$ .....	Rozptylová reaktance přepočtená na fázi statoru [ $\Omega$ ]
$R_{Fe}$ .....	Odpor příčné větve náhradního schéma [ $\Omega$ ]
$X_{\mu}$ .....	Magnetizační reaktance [ $\Omega$ ]
$\Delta P_{Feh}$ .....	Hlavní ztráty v železe statoru [W]
$\Delta p_{1,0}$ .....	Měrné ztráty v železe [W/kg]
$k_{dj}$ .....	Činitel uvažující vliv nerovnoměrnosti rozložení toku v magnetických částech obvodu [-]
$k_{dz}$ .....	Činitel uvažující vliv technologie výroby statorového svazku [-]
$m_{j1}$ .....	Hmotnost statorového jha [kg]
$m_{z1}$ .....	Hmotnost zubů statoru [kg]
$\rho_{Fe}$ .....	Hustota železa [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]



$k_{oi}$ .....	Vliv opracování plechů [-]
$B_{01}$ .....	Amplituda pulzací indukce ve vzduchové mezeře [T]
$B_{02}$ .....	Amplituda pulzací [T]
$\beta_{01}$ .....	Poměr otevření drážky rotoru ke vzduchové mezeře [-]
$\beta_{02}$ .....	Poměr otevření drážek statoru ke vzduchové mezeře [-]
$\Delta P_{\delta}$ .....	Povrchové ztráty [W]
$\Delta P_{\delta 1}$ .....	Povrchové ztráty ve statoru [W]
$\Delta P_{\delta 2}$ .....	Povrchové ztráty v rotoru [W]
$\Delta p_{\delta p 1}$ .....	Hustota povrchových ztrát ve statoru [W/m <sup>2</sup> ]
$\Delta p_{\delta p 2}$ .....	Hustota povrchových ztrát v rotoru [W/m <sup>2</sup> ]
$\Delta P_p$ .....	Pulzní ztráty [W]
$\Delta P_{p 1}$ .....	Pulzace indukce v zubech statoru [W]
$B_{p 1}$ .....	Amplituda pulzací v zubech statoru [T]
$B_{p 2}$ .....	Amplituda pulzací v zubech rotoru [T]
$\Delta P_{p 2}$ .....	Pulzace indukce v zubech rotoru [W]
$\Delta P_{Fe}$ .....	Celkové ztráty v železe [W]
$\Delta P_j$ .....	Joulové ztráty ve vinutí [W]
$\Delta P_{j 1}$ .....	Joulové ztráty ve vinutí statoru [W]
$\Delta P_{j 2}$ .....	Joulové ztráty ve vinutí rotoru [W]
$\Delta P_{mech}$ .....	Mechanické ztráty způsobené třením v ložiskách a ventilační ztráty [W]
$K_t$ .....	Činitel plnění drážky [-]
$P_d$ .....	Přídavné ztráty [W]
$\Delta P$ .....	Součet všech ztrát [W]
$K$ .....	Činitel respektující změnu odporu s teplotou [-]
$\Delta T_{Fe}$ .....	Oteplení vnitřního povrchu statoru nad teplotu vzduchu okolí [°C]
$\alpha_v$ .....	Součinitel přestupu tepla [W/m <sup>2</sup> K <sup>1</sup> ]
$k_{\rho}$ .....	Činitel respektující změnu odporu s teplotou [-]
$\Delta P_{jd 1}$ .....	Jouleovy ztráty v drážkové části rotoru [-]
$\Delta T_{izd}$ .....	Teplotní spád v izolaci drážkové části [°C]
$b_i$ .....	Tloušťka izolace [m]
$\lambda_i$ .....	Tepelná vodivost izolace [W/mK]
$\lambda_{ekv}$ .....	Ekvivalentní tepelná vodivost [-]

---

$O_d$ .....	Obvod drážky [m]
$\Delta T_{izč}$ .....	Teplotní spád v izolaci čela [°C]
$\Delta P_{jč1}$ .....	Jouleovy ztráty v čelech vinutí [W]
$\Delta T_{povč}$ .....	Oteplení vnějšího povrchu čel nad teplotu vzduchu uvnitř stroje [°C]
$\Delta T_{vinutí}$ .....	Střední oteplení statorového vinutí nad teplotu vzduchu uvnitř stroje [°C]
$\Delta T_{vz}$ .....	Oteplení vzduchu ve stroji nad teplotu okolí [°C]
$O_z$ .....	Obvod příčného řezu žeber [m]
$\Delta T_{vin}$ .....	Střední oteplení statorového vinutí nad teplotu okolí [°C]
$Q$ .....	Průtok vzduchu pro ventilaci [m <sup>3</sup> /s]
$Q'$ .....	Průtok vzduchu, který dodává vnější radiátor [m <sup>3</sup> /s]

# 1 Asynchronní stroj

Asynchronní stroje se provádějí ve dvou variantách. První variantou je asynchronní motor s kroužkovou kotvou. Druhou, asynchronní motor s klecí nakrátko. V této práci jsem se zaměřila především na asynchronní motory s klecí nakrátko.

## Konstrukční uspořádání asynchronních strojů

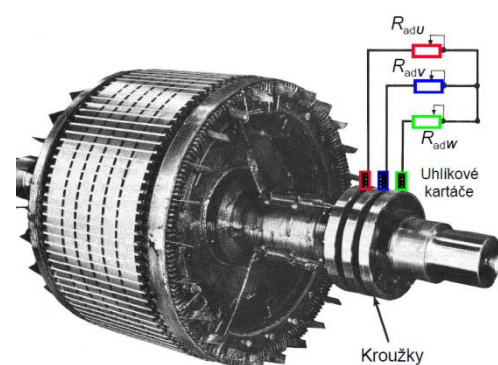
Asynchronní stroj je nejčastěji používán jako motor, tyto motory mají široké použití v mnoha odvětvích, zejména v průmyslu. V této kapitole jsem popisovala základní rozdělení asynchronních motorů a jednotlivé konstrukční části, ze kterých se daný motor skládá.

### 1.1 Asynchronní motory s klecí nakrátko

Stator asynchronního motoru s klecí nakrátko je tvořen elektrotechnickými izolovanými plechy s drážkami, ve kterých je uloženo vinutí. Na hřídeli je nalisován rotorový paket, který je také tvořen z elektrotechnických plechů. Klecový rotor je tvořen tyčemi, které jsou na koncích spojeny kruhy nakrátko.

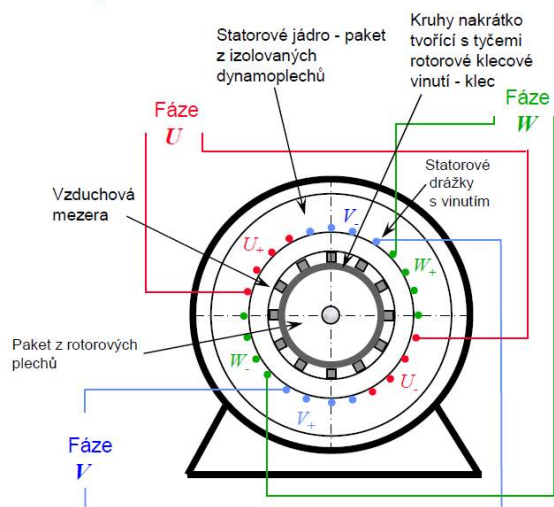
### 1.2 Asynchronní motory s kroužkovou kotvou

Konstrukce statoru AM s kroužkovou kotvou je stejný jako u asynchronních strojů s klecí nakrátko. Rozdílnost konstrukce motoru s vinutým rotorem a klecí nakrátko je znázorněna na obrázku Obr. 1.2 *Porovnání konstrukce AM s klecovým a vinutým rotorem.* Hlavní rozdíl je v tom, že u motorů s vinutou kotvou je vinutí uloženo i v rotorových drážkách, kde konce jednotlivých fází jsou vyvedeny na kroužky, na které dosedají uhlíkové sběrací kartáče. Rotorové vinutí pak může být spojeno s externími rezistory či tlumivkami.[6]

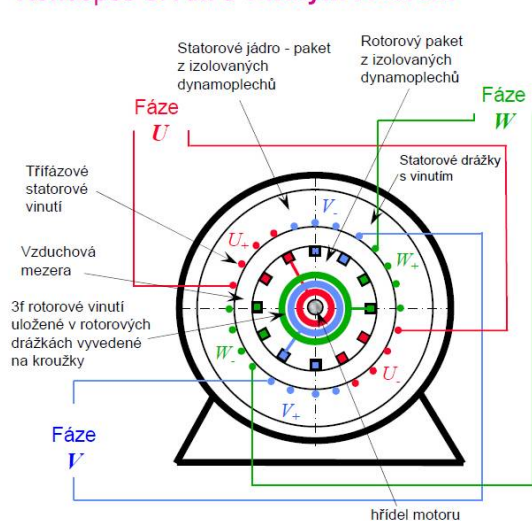


Obr. 1.1 Rotor s kroužkovou kotvou

### Koncepce 3f klecového AM



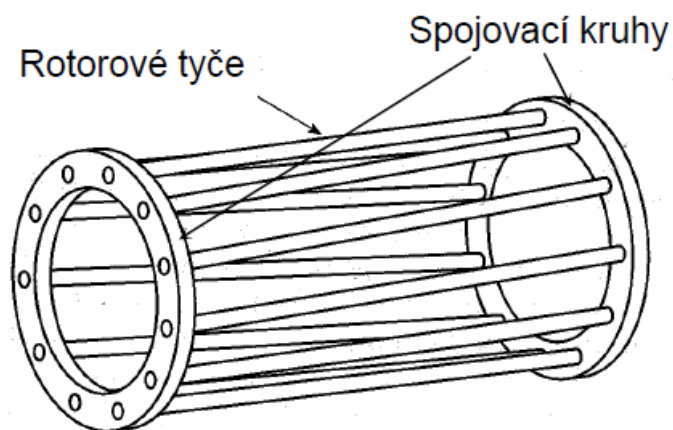
### Koncepce 3f AM s vinutým rotorem



Obr. 1.2. Porovnání konstrukce AM s klecovým a vinutým rotorem

## 1.3 Klece asynchronních motorů

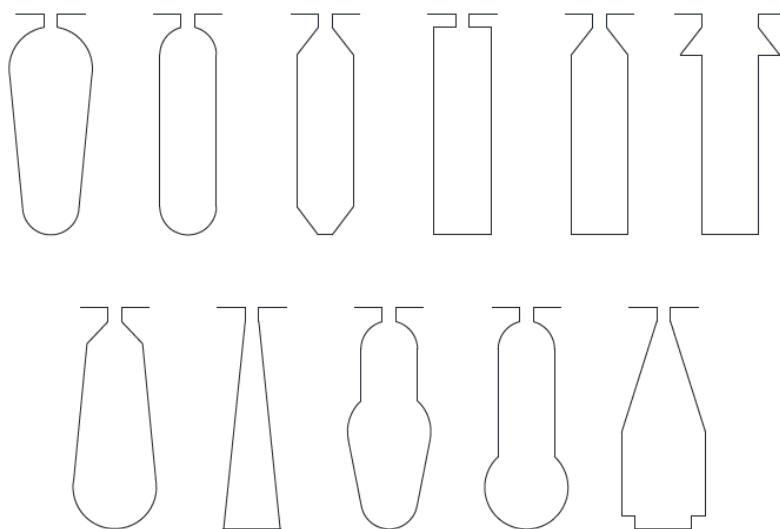
Asynchronní motory mohou mít různé provedení rotorových klecí, které zajišťují zlepšení vlastností zejména při rozběhu motoru. Při rozběhu je problémem malý odpor rotorové klece s vysokým záběrným proudem a zároveň nízkým záběrným momentem. Použitím speciální rotorové klece, se uměle zvýší odpor, sníží se záběrný proud a tím se zvětší záběrný moment. [7]



Obr. 1.3. Klec nakrátko a její části[]

### 1.3.1 Vírová klec

Vírová klec je konstrukce s úzkými a hlubokými drážkami, především obdélníkového či lichoběžníkového průřezu. Tvary drážek jsou uvedeny na následujícím obrázku Obr. 1.4. *Tvary drážek vírové klece, překresleno z [1]*



Obr. 1.4. *Tvary drážek vírové klece, překresleno z [1]*

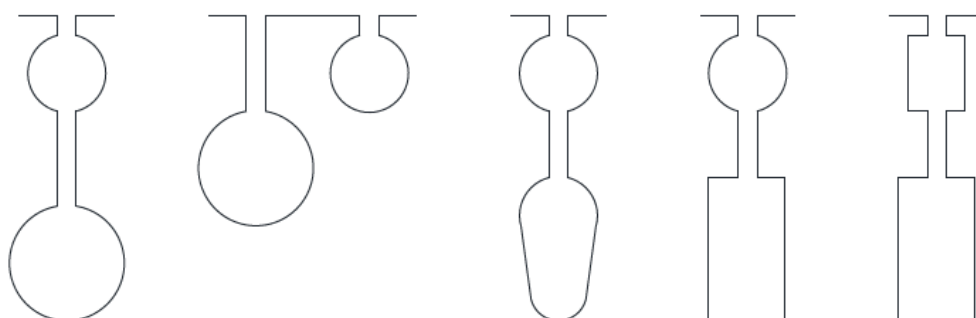
### Princip vírové klece

Při rozběhu motoru, kdy rotorová frekvence  $f_2$  přibližně odpovídá statorové frekvenci  $f_1$ , vznikají značné vířivé proudy v rotorových tyčích. Tyto proudy vyvolává rozptylové pole, které prochází drážkami rotoru. Vířivé proudy se sčítají s rotorovým proudem a to má za důsledek rozložení proudové hustoty v rotorové tyči. V části tyče, nacházející se blíže ke vzduchové mezeře, se soustředí proud a tím vzrostou i elektrické ztráty. Tomu odpovídá zařazení dodatečných odporů do obvodu rotoru. Frekvence v rotoru se při rozběhu postupně snižuje a dochází i ke zmenšení vířivých proudů a nerovnoměrného rozložení proudu v tyči. Frekvence je malá a proudová hustota se rozloží rovnoměrně při jmenovitém zatížení motoru.[8]

### 1.3.2 Boucherotova klec (dvojitá klec)

Boucherotovu klec tvoří vnější a vnitřní klec, proto se jí říká též dvojitá klec. Tyto klece mohou mít kruh nakrátko, který spojuje všechny tyče obou klecí dohromady, nebo dva kruhy, kdy každý kruh je pro jednu klec, tato varianta je používanější zejména proto, že klece mívají odlišný materiál. Na Obr. 1.5. *Tvary drážek Boucherotovy klece, překresleno z [1]*

#### Tvary drážek Boucherotovy klece



Obr. 1.5. *Tvary drážek Boucherotovy klece, překresleno z [1]*

Vnější klec je rozběhová klec, která většinou mívá menší průřez tyčí než klec vnitřní, se vyrábí z materiálů, které mají větší měrný odpor (bronz, mosaz,...). Vnitřní klec je klec běhová, ta slouží pro snížení odporu a dělá se tedy většího průřezu. Pro výrobu této klece se používají materiály s dobrou měrnou vodivostí (měď, hliník,...) [1]

#### Princip dvojité klece

Při rozbíhání motoru, kdy rotorová frekvence se statorovou frekvencí jsou přibližně shodné, je reaktance vnitřní klece mnohem větší než reaktance vnější klece, proto proud protéká klecí s velkým odporem, což způsobuje snížení záběrného proudu a zvýšení záběrného momentu. Při snižování rotorové frekvence při rozběhu, začne proud rotoru přebírat klec vnitřní. Proud v klecích se tedy rozdělují nepřímo úměrně jejich odporům. Vnitřní klecí bude protékat převážná část proudu, protože její tyče mají větší průměr a jejich materiál menší měrný odpor. [8]

## 2 Návrh asynchronního stroje

Při návrhu asynchronního motoru jsem jako první musela zvolit hlavní rozměry stroje. Pro určení těchto rozměrů jsem vycházela z výkonové rovnice asynchronního stroje.

Výkonová rovnice asynchronního stroje:

$$S = C \cdot D_1^2 \cdot l_e \cdot n \quad (1)$$

kde C je Essonův činitel:

$$C = \frac{\pi^2}{60 \cdot \sqrt{2}} \cdot A \cdot B_\delta \cdot k_v \quad (2)$$

### Zadané hodnoty pro výpočet

Druh stroje: motor

Výstupní výkon stroje  $P_2 = 10 \text{ kW}$

Napájecí napětí  $U_N = 230/400 \text{ V}$

Počet fází  $m = 3$

Frekvence  $f = 50 \text{ Hz}$

Synchronní otáčky  $n_s = 1420 \text{ ot/min}$

Krytí stroje proti vniknutí cizích těles a vody IP 44

Chlazení stroje IC 01-41

Konstrukční provedení IM 1001

## Volba hlavních rozměrů stroje

Hlavní rozměry asynchronních strojů se určují stejným způsobem jako u strojů synchronních. Nejdříve jsem tedy určila předběžné hodnoty obvodové proudové hustoty  $A$  [A/m], dále pak velikost magnetické indukce ve vzduchové mezeře  $B_\delta$  [T], předpokládanou účinnost stroje  $\eta$  [-], účiník  $\cos \varphi$  [-] a následně i velikost vrtání statoru  $D_1$  [m]. Při výpočtu jsem vycházela ze zadaných parametrů a odečítáním potřebných hodnot z daných tabulek a grafů. Při výpočtu jsem postupovala dle literatury [1], [2], [3]

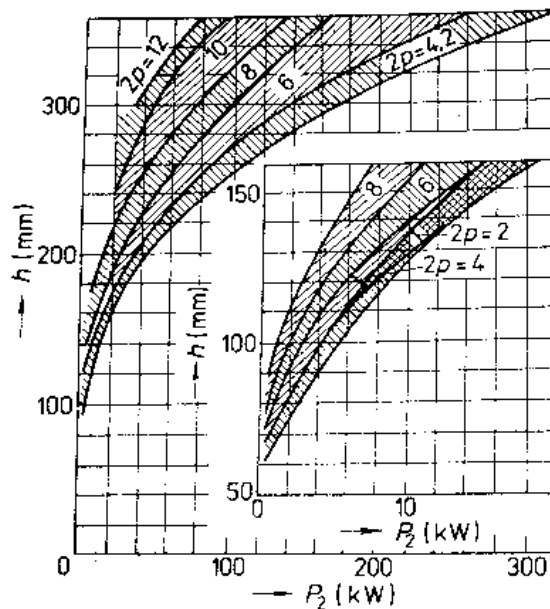
Počet pólových dvojic stroje

$$p = \frac{f \cdot 60}{n_s} = \frac{50 \cdot 60}{1420} = 2 \quad (3)$$

Stanovení předběžné výšky osy stroje

Předběžná výška stroje byla zvolena odečtením z grafu, na základě požadovaného výkonu  $P_2$

$$h = 130 \text{ mm}$$



Obr. 2.1 Výška osy asynchronních motorů v závislosti na výkonu [1]



## Vnější průměr statoru

$$D_{1e} = 0,225 \text{ m}$$

Vnější průměr statoru se určil s předdefinovaných hodnot uvedených v následující tabulce

Tab. 2.II

Tab. 2.II Tabulka hodnot výšky os elektrických strojů a jim odpovídající vnější průměry statorových plechů asynchronních motorů

h [mm]	56	63	71	80	90	100	112	132
$D_e$ [m]	0,089	0,1	0,116	0,131	0,149	0,168	0,191	0,225
h [mm]	160	180	200	225	250	280	315	355
$D_e$ [m]	0,272	0,313	0,349	0,392	0,437	0,530	0,590	0,660

## Vnitřní průměr statoru

Vnitřní průměr statoru  $D_{1i}$  [m] se obvykle určuje z vnějšího průměru statoru  $D_{1e}$  [m], výšky  $j_{h1}$  a výšky zubů statoru

$$D_{1i} = D_{1e} - 2(h_{j1} + h_{d1}) \quad (4)$$

V nynějším stádiu výpočtu prozatím neznám rozměry  $h_{j1}$  a  $h_{d1}$ , z tohoto důvodu jsem pro určení vnějšího průměru statoru použila empirického vztahu:

$$D_{1i} = K_D \cdot D_{1e} = 0,66 \cdot 0,225 = 0,1485 \text{ m} \quad (5)$$

Koeficient  $K_D$ , který charakterizuje poměr mezi vnitřním a vnějším průměrem, byl určen z následující tabulky Tab. 2.IV. Pro čtyřpólový stroj jsem stanovila koeficient  $K_D = 0,66$

Tab. 2.III Tabulka doporučených hodnot koeficientu  $K_D$  v závislosti na počtu pólů stroje

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

## Pólová rozteč stroje

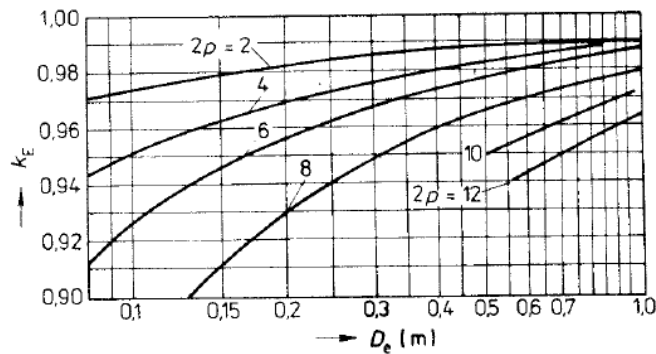
$$t_{p1} = \frac{\pi \cdot D_{1i}}{2p} = \frac{\pi \cdot 0,1485}{2} = 0,1166 \text{ m} \quad (6)$$

Vnitřní výkon stroje

$$P_i = P_2 \cdot \frac{k_E}{\eta \cdot \cos(\phi)} = 10000 \cdot \frac{0,97}{0,88 \cdot 0,8} = 13778,409 \text{ W} \quad (7)$$

Činitel  $k_E$ , který určuje poměr mezi indukovaným napětím vinutí statoru k jmenovitému napětí, byl určen z následujícího grafu Obr. 2.2

$$k_E = 0,97$$

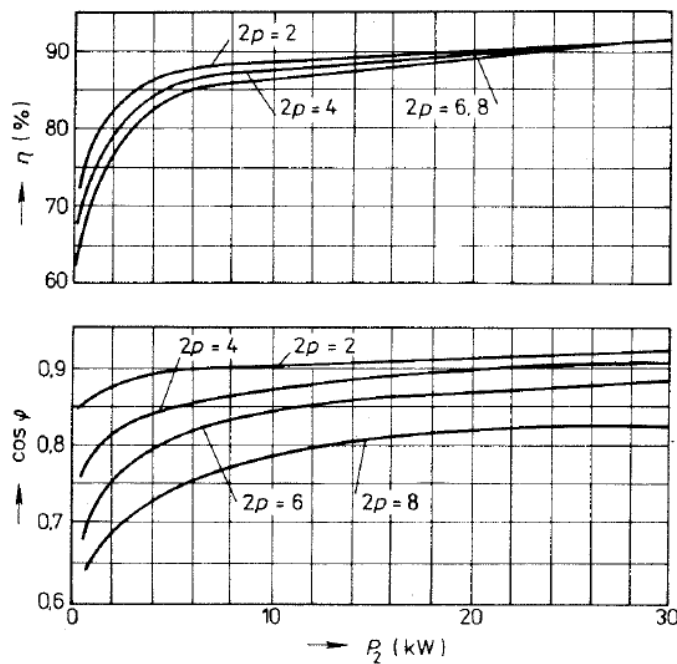


Obr. 2.2 Hodnoty činitele  $k_E$  [1]

Následně byla zvolena hodnota účinnosti  $\eta$  a účiníku  $\cos \phi$ , podle Obr. 2.3

$$\cos \phi = 0,8$$

$$\eta = 0,88$$



Obr. 2.3 Hodnoty  $\cos \phi$  a účinnosti [1]

## Volba hodnot elektromagnetických zatížení

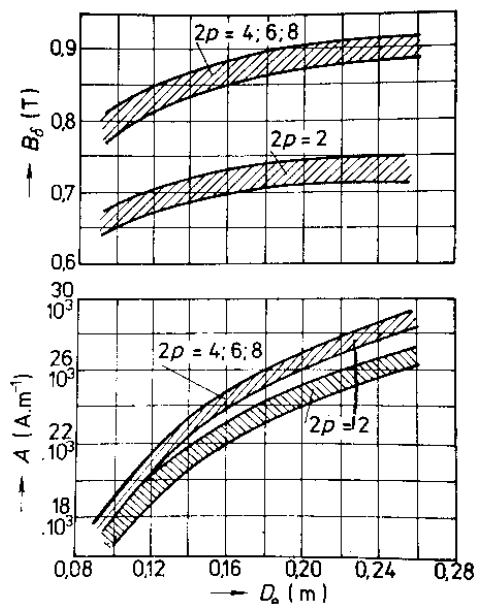
Při volbě lineární proudové hustoty  $A$  [A/m] a magnetické indukce ve vzduchové mezeře  $B_\delta$  [T] bylo třeba hodnoty určit pečlivě, neboť určují délku stroje a ovlivňují i jeho vlastnosti. Hodnoty lineární proudové hustoty a magnetické indukce ve vzduchové mezeře byly odečteny z následujícího grafu *Obr. 2.4*, ve kterém jsou uvedeny doporučené hodnoty.

### Lineární proudová hustota

$$A = 26\,000 \text{ A/m}$$

### Magnetická indukce ve vzduchové mezeře

$$B_\delta = 0,88 \text{ T}$$



Obr. 2.4 Doporučené hodnoty lineární proudové hustoty a magnetické indukce ve vzduchové mezeře[1]

V tomto kroku bylo také důležité stanovit předběžné hodnoty činitele pólového krytí  $\alpha_\delta$ , činitele tvaru pole  $k_B$  a činitele statorového vinutí  $k_{v1}$ , potřebné pro další výpočty.

### Činitel pólového krytí (předběžná hodnota)

$$\alpha_\delta = \frac{2}{\pi} = 0,637 \quad (8)$$

### Činitel tvaru pole (předběžná hodnota)

$$k_B = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1,11 \quad (9)$$

**Činitel statorového vinutí**

Pro  $2p = 4$  a jednovrstvé vinutí se činitel  $k_{v1}$  volí v rozmezí hodnot 0,95 – 0,96. Zvolila jsem hodnotu  $k_{v1} = 0,95$

**Synchronní úhlová rychlost**

$$\omega_s = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{p} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 50}{2} = 148,70 \text{ rad/s} \quad (10)$$

**Ideální délka vzduchové mezery**

$$l_{Fe} = \frac{2 \cdot P_i}{D_{1i} \cdot \omega_s \cdot k_B \cdot k_v \cdot A \cdot B_\delta \cdot \pi \cdot \alpha_\delta} = \quad (11)$$

$$l_{Fe} = \frac{2 \cdot 13778,41}{0,1485 \cdot 148,7 \cdot 1,11 \cdot 0,91 \cdot 26000 \cdot 0,88 \cdot \pi \cdot 0,637} =$$

$$l_{Fe} = 0,127 \text{ m}$$

**Štíhlostní poměr**

$$\lambda = \frac{l_{Fe}}{t_p} = \frac{0,127}{0,116} = 1,088 \quad (12)$$

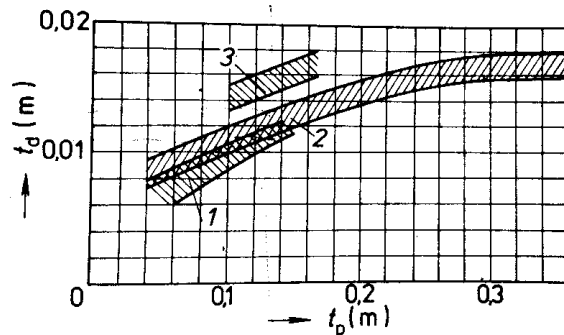
## Výpočet statoru

### Určení počtu drážek statoru

Pro správné určení počtu statorových drážek, bylo potřeba určit minimální a maximální počet statorových drážek. Výpočtem bylo třeba nejdříve určit minimální a maximální hodnotu drážkové rozteče. Tujsem následně použila v rovnicích pro stanovení počtu drážek. Výsledný počet drážek jsem určila z rozpětí těchto dvou hodnot takovým způsobem, aby výsledný počet drážek i počet drážek na pól a fázi bylo číslo celé.

### Minimální a maximální drážková rozteč

Maximální a minimální hodnota drážkové rozteče se určila z obrázku Obr. 2.5, ve kterém pro zadaný stroj odpovídá oblast 2



Obr. 2.5 Drážkové rozteče statoru asynchronních motorů [1]

Minimální drážková rozteč  $t_{d1min} = 0,011 \text{ m}$

Maximální drážková rozteč  $t_{d1max} = 0,013 \text{ m}$

### Minimální počet statorových drážek

$$Q_{1min} = \frac{\pi \cdot D_{1i}}{t_{d1max}} = \frac{\pi \cdot 0,1485}{0,013} = 35,88 \quad (13)$$

### Maximální počet statorových drážek

$$Q_{1max} = \frac{\pi \cdot D_{1i}}{t_{d1min}} = \frac{\pi \cdot 0,1485}{0,0113} = 41,29 \quad (14)$$

**Počet drážek na pól a fázi**

$$q = \frac{Q_1}{m \cdot 2p} = \frac{36}{3 \cdot 4} = 3 \quad (15)$$

Po dosažení počtu drážek do vzorce pro počet drážek na pól a fázi (15), vyšlo celé číslo. Z toho tedy vyplývá, že zvolený počet drážek byl vyhovující oběma stanoveným podmínkám.

**Výsledný počet statorových drážek  $Q_1 = 36$** **Drážková rozteč statoru**

$$t_{d1} = \frac{\pi \cdot D_{1i}}{2 \cdot p \cdot m} = \frac{\pi \cdot 0,1485}{2 \cdot 2 \cdot 3} = 0,01295m \quad (16)$$

**Jmenovitý proud vinutí statoru**

$$I_{1N} = \frac{P_2}{m \cdot U_N \cdot \eta \cdot \cos(\phi)} = \frac{10000}{3 \cdot 230 \cdot 0,88 \cdot 0,8} = 20,59 \text{ A} \quad (17)$$

**Počet vodičů v drážce****Předběžný počet efektivních vodičů v drážce**

$$V_D' = \frac{\pi \cdot D_{1i} \cdot A}{I_{1N} \cdot Q_1} = \frac{\pi \cdot 0,1485 \cdot 26000}{20,586 \cdot 36} = 16,366 \quad (18)$$

**Výsledný počet efektivních vodičů jsem určila ze vzorce**

$$V_D = a \cdot V_D' = 1 \cdot 16,366 = 16,366 \rightarrow 16 \text{ vodičů} \quad (19)$$

Protože byl počet paralelních větví  $a = 1$ , vyšel i skutečný počet efektivních vodičů v drážce shodný s předběžným počtem efektivních vodičů. Výsledný počet vodičů jsem zaokrouhlila na celé číslo.

**Počet závitů statorového vinutí**

$$N_1 = \frac{V_D \cdot Q_1}{2 \cdot m} = \frac{16 \cdot 36}{2 \cdot 3} = 96 \text{ závitů} \quad (20)$$

**Počet drážek**

$$Q = 2p \cdot q \cdot m = 4 \cdot 3 \cdot 3 = 36 \text{ drážek} \quad (21)$$

Počet cívek

$$K = \frac{Q}{1} = \frac{36}{1} = 36 \text{ cívek} \quad (22)$$

Přední cívkový krok v počtu drážek na pól

$$y_{1d} = \frac{Q_1}{2p} = \frac{36}{4} = 9 \text{ drážek} \quad (23)$$

Počet fázových svazků

$$S_c = m \cdot a = 6 \cdot 1 = 6 \text{ svazků} \quad (24)$$

Počet fázových svazků na fázi

$$f_f = \frac{S_c}{m} = \frac{m' \cdot a}{m} = \frac{6 \cdot 1}{3} = 2 \text{ svazky} \quad (25)$$

Počet cívek ve svazku

$$K_1 = \frac{K}{m' \cdot a} = \frac{36}{6 \cdot 1} = 6 \text{ cívek} \quad (26)$$

Skutečná lineární proudová hustota

$$A = \frac{2 \cdot m \cdot N_1 \cdot I_{1N}}{\pi \cdot D_{1i}} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 96 \cdot 20,586}{\pi \cdot 0,1485} = 25417 \text{ A/m} \quad (27)$$

Poměrné zkrácení kroku

$$\beta = \frac{2}{3} \cdot \frac{q+1}{q} = \frac{2}{3} \cdot \frac{3+1}{3} = 0,888 \quad (28)$$

Činitel kroku

$$k_y = \sin\left(\frac{\beta \cdot \pi}{2}\right) = \sin\left(\frac{0,888 \cdot \pi}{2}\right) = 0,9848 \quad (29)$$

Činitel rozlohy

$$k_r = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2m}\right)}{q \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2mq}\right)} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot 3}\right)}{3 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot 3 \cdot 3}\right)} = 0,9598 \quad (30)$$

Činitel vinutí

$$k_v = k_y \cdot k_r = 0,9848 \cdot 0,9598 = 0,9451 \quad (31)$$

Magnetický tok

$$\Phi = \frac{k_E \cdot U_N}{4,44 \cdot k_B \cdot N_1 \cdot f_1 \cdot k_v} = \quad (32)$$

$$\Phi = \frac{0,97 \cdot 230}{4,44 \cdot 1,11 \cdot 96 \cdot 50 \cdot 0,9452} = 0,00997 \text{ Wb}$$

Skutečná hodnota magnetické indukce ve vzduchové mezeře

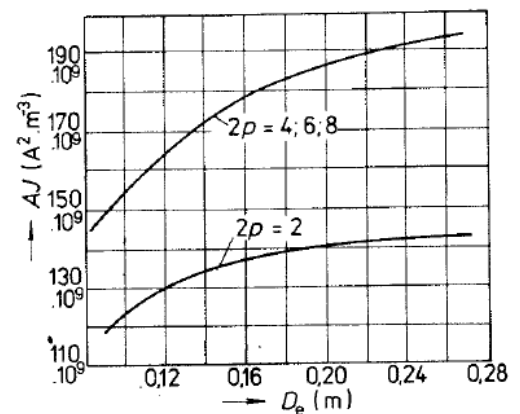
$$B_\delta = \frac{p \cdot \Phi}{D_{1i} \cdot l_{Fe}} = \frac{2 \cdot 0,00997}{0,1485 \cdot 0,127} = 0,866 \text{ T} \quad (33)$$

Proudová hustota ve statorovém vinutí

Předběžná proudová hustota

Oteplení drážkové části vinutí, závisí na součinu lineární hustoty proudu a hustoty proudu ve vinutí, proto se předběžná proudová hustota určila z tzv. A-J kritéria dle Obr. 2.6

$$AJ = 190 \cdot 10^9 \text{ A}^2/\text{m}^3$$



Obr. 2.6 A-J kritérium

Předběžná proudová hustota

$$J'_1 = \frac{AJ}{A} = \frac{190 \cdot 10^9}{25417} = 7,48 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2 \quad (34)$$

Předběžný průřez efektivního vodiče

$$S_{ef} = \frac{I_{1N}}{a \cdot J'_1} = \frac{20,586}{1 \cdot 7,48 \cdot 10^6} = 2,75 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \quad (35)$$

Počet dílčích vodičů  $n_p = 2$  vodiče



Průřez jednotlivého vodiče

$$S_v = \frac{S_{ef}}{n_p} = \frac{2,75 \cdot 10^{-6}}{2} = 1,37 \cdot 10^{-6} m^2 \quad (36)$$

Pro vsypávané vinutí se používají měděné dráty do průměru 1,4 mm, proto jsem z tabulky zvolila nejbližší průřez vodiče:

$S_v = 1,369 mm^2$  odečteno z tab. D3.1 str 651[1]

průměr vodiče  $d_v = 1,32 mm$

$d_{vi} = 1,415 mm$ , pro izolace tereftalátovým lakem

Skutečná proudová hustota

$$J = \frac{I_1}{n_p \cdot S_v \cdot a} = \frac{20,586}{2 \cdot 1,369 \cdot 10^{-6} \cdot 1} = 7,52 \cdot 10^6 A/m^2 \quad (37)$$

## 2.1 Výpočet rozměrů drážek a zubů statoru

Činitel plnění železa

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

Šířka zubu statoru

$$b_{z1} = \frac{B_\delta \cdot t_{d1}}{B_{z1} \cdot k_{Fe}} = \frac{0,866 \cdot 0,0129}{1,8 \cdot 0,97} = 0,00573 m \quad (38)$$

výška zubu statoru

$$h_{z1} = h_1 - (0,1 \cdot b_1) = 0,00998 - (0,1 \cdot 0,01068) = 0,00892 \quad (39)$$

výška statorového jha

$$h_{j1} = \frac{\Phi}{2 \cdot B_{j1} \cdot l_{Fe} \cdot k_{Fe}} = \frac{0,00997}{2 \cdot 1,6 \cdot 0,127 \cdot 0,97} = 0,01846 m \quad (40)$$

hloubka drážky

$$h_{d1} = \frac{D_{1e} - D_{1i}}{2} - h_{j1} = \frac{0,225 - 0,1485}{2} - 0,01846 = 0,01979 m \quad (41)$$

šířka dna drážky

$$b_1 = \frac{\pi \cdot (D_{1i} + 2h_{d1})}{Q_1} - b_{z1} = \frac{\pi \cdot (0,1485 + 2 \cdot 0,01979)}{36} - 0,00572 = \quad (42)$$

$$b_1 = 0,01068 \text{ m}$$

šířka vrcholu drážky

$$b_2 = \frac{\pi \cdot (D_{1i} + 2h_0 - b_0) - Q_1 \cdot b_{z1}}{Q_1 - \pi} = \quad (43)$$

$$b_2 = \frac{\pi \cdot (0,1485 + 2 \cdot 0,0005 + 0,001) - 36 \cdot 0,00573}{36 - \pi}$$

$$b_2 = 0,00792 \text{ m}$$

aktivní hloubka drážky

$$h_1 = h_{d1} - \left[ h_0 + \left( \frac{b_2 - b_0}{2} \right) \right] = \quad (44)$$

$$h_1 = 0,0199 - \left[ 0,5 \cdot 10^{-3} + \left( \frac{0,01068 - 0,0001}{2} \right) \right] = 0,00998 \text{ m}$$

činitel plnění drážky

$$K_t = \frac{d_i^2 \cdot V_d \cdot n_p}{S'_d} = \frac{(1,42 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 16 \cdot 2}{8,797 \cdot 10^{-6}} = 0,728 \quad (45)$$

Velikost vzduchové mezery

$$\delta = (0,3 + 1,5 \cdot D_{1i}) \cdot 10^{-3} = (0,3 + 1,5 \cdot 0,1485) \cdot 10^{-3} = \quad (46)$$

$$\delta = 0,000523 \text{ m} \rightarrow 0,5 \text{ mm}$$

Vzduchová mezera zvolena z doporučeného rozmezí hodnot na  $\delta = 0,5 \text{ mm}$

## 2.2 Výpočet rotoru

Při výpočtu rotorových veličin, bylo třeba nejdříve určit magnetické indukce v rotorovém jhu a v zubech rotoru. Tyto hodnoty se odečetly z tabulky 6.10, strana 213 [1]

Indukce ve jhu rotoru  $B_{j2} = 1 \text{ T}$

Indukce v zubech rotoru  $B_{z2} = 1,7 \text{ T}$

Indukce zubu v nejužším průřezu rotoru  $B_{z2max} = 1,6 \text{ T}$

Vnější průměr rotoru

$$D_{2e} = D_{1i} - 2\delta = 0,1485 - 2 \cdot 5 \cdot 10^{-3} = 0,1475 \text{ m} \quad (47)$$

Vnitřní průměr rotoru

$$D_{2i} = D_{2e} \cdot k_h = 0,1475 \cdot 0,23 = 0,0339 \text{ m} \quad (48)$$

Délka rotoru

$$l_2 = l_1 = 0,127 \text{ m}$$

Počet rotorových drážek

$$Q_2 = 26 \text{ drážek}$$

Počet drážek na rotoru se určí dle doporučených hodnot, tabulka 6.15, strana 227 [1]

Drážková rozteč rotoru

$$t_{d2} = \frac{\pi \cdot D_{2e}}{Q_2} = \frac{\pi \cdot 0,1475}{26} = 0,017822 \text{ m} \quad (49)$$

Činitel přepočtu proudů

$$p_i = \frac{2 \cdot m \cdot N_1 \cdot k_v}{Q_2} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 96 \cdot 0,9452}{26} = 20,94 \quad (50)$$

Proud v tyči

$$I_t = k_i \cdot p_i \cdot I_1 = 0,85 \cdot 20,94 \cdot 20,586 = 366,417 \text{ A} \quad (51)$$

Proudová hustota v tyči rotoru

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

Tato hodnota proudové hustoty v tyči byla zvolena na základě toho, že hustota proudu v tyčích rotoru u strojů zavřených s ofukováním na povrchu a s odlévaným hliníkovým vinutím se volí v rozmezí  $(2,5 - 3,5) \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$  [1]

Průřez tyče

$$S_t = \frac{I_t}{J_2} = \frac{366,417}{3,5 \cdot 10^6} = 1,05 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \quad (52)$$

Proud v kruhu nakrátko

$$I_{kr} = \frac{I_t}{2 \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} = \frac{366,417}{2 \cdot \sin\left(\frac{0,483}{2}\right)} = 765,55 \text{ A} \quad (53)$$

Proudová hustota v kruhu

Proudovou hustotu v kruhu volíme o 15% menší než v tyči, tedy:

$$J_{kr} = 2,98 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$$

Průřez kruhu

$$S_{kr} = \frac{I_{kr}}{J_{kr}} = \frac{765,55}{2,98 \cdot 10^6} = 0,000257 \text{ m}^2 \quad (54)$$

Rozměry kruhu nakrátko

$$a_{kr} = 1,4 \cdot h_{d2} = 1,4 \cdot 0,0272 = 0,0381 \text{ m} \quad (55)$$

$$b_{kr} = \frac{S_{kr}}{a_{kr}} = \frac{0,000257}{0,0381} = 0,00675 \text{ m} \quad (56)$$

Výška rotorového jha

$$h_{j2} = \frac{\Phi}{2 \cdot B_{j2} \cdot l_{Fe} \cdot k_{Fe}} = \frac{0,00997}{2 \cdot 1 \cdot 0,127 \cdot 0,97} = 0,02954 \text{ m} \quad (57)$$

Šířka zubu rotoru

$$b_{z2} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{d2}}{B_{z2} \cdot k_{Fe}} = \frac{0,866 \cdot 0,01782}{1,7 \cdot 0,97} = 0,00834 \text{ m} \quad (58)$$

Šířka drážky pod krčkem

$$b_1 = \frac{\pi \cdot (D_{2e} - 2h_0) - Q_2 \cdot b_{z2}}{\pi + Q_2} = \quad (59)$$

$$b_1 = \frac{\pi \cdot (0,1475 - 2 \cdot 0,005) - 26 \cdot 0,00834}{\pi + 26} = 0,00828 \text{ m}$$

Šířka drážky u dna

$$b_2 = \sqrt{\frac{b_1^2 \cdot \left(\frac{Q_2}{\pi} + \frac{\pi}{2}\right) - 4 \cdot S_t}{\frac{Q_2}{\pi} - \frac{\pi}{2}}} = \quad (60)$$

$$b_2 = \sqrt{\frac{0,00828^2 \cdot \left(\frac{26}{\pi} + \frac{\pi}{2}\right) - 4 \cdot 1,05 \cdot 10^{-4}}{\frac{26}{\pi} - \frac{\pi}{2}}} = 0,00619 \text{ m}$$

Hloubka rotorové drážky

$$h_{d2} = \frac{D_{2e} - D_{2i}}{2} - h_{j2} = \frac{0,1475 - 0,0339}{2} - 0,02954 = 0,0273 \text{ m} \quad (61)$$

## 2.3 Magnetický obvod

Magnetická indukce v zubech statoru

$$B_{z1} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{d1} \cdot l_{Fe}}{b_{z1} \cdot l_{Fe} \cdot k_{Fe}} = \frac{0,866 \cdot 0,01295 \cdot 0,127}{0,00573 \cdot 0,127 \cdot 0,97} = 1,8 \text{ T} \quad (62)$$

Magnetická indukce v zubech rotoru

$$B_{z2} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{d2} \cdot l_{Fe}}{b_{z2} \cdot l_{Fe} \cdot k_{Fe}} = \frac{0,866 \cdot 0,01782 \cdot 0,127}{0,00834 \cdot 0,127 \cdot 0,97} = 1,7 \text{ T} \quad (63)$$

Magnetická indukce ve jhu statoru

$$B_{j1} = \frac{\Phi}{2 \cdot h_{j1} \cdot l_{Fe} \cdot k_{Fe}} = \frac{0,00997}{2 \cdot 0,01846 \cdot 0,127 \cdot 0,97} = 1,6 \text{ T} \quad (64)$$

Magnetická indukce ve jhu rotoru

$$B_{j2} = \frac{\Phi}{2 \cdot h_{j2} \cdot l_{Fe} \cdot k_{Fe}} = \frac{0,00997}{2 \cdot 0,02954 \cdot 0,127 \cdot 0,97} = 1,3 \text{ T} \quad (65)$$

Carterův činitel

$$k_c = \frac{t_{d1}}{t_{d1} - \frac{\left(\frac{b_0}{\delta}\right)^2}{5 + \left(\frac{b_0}{\delta}\right)} \cdot \delta} = \frac{0,01295}{0,01295 - \frac{\left(\frac{0,001}{0,0005}\right)^2}{5 + \left(\frac{0,001}{0,0005}\right)} \cdot 0,0005} = \quad (66)$$

$$k_c = 1,0225$$

Magnetické napětí vzduchové mezery

$$U_\delta = \frac{2}{\mu_0} \cdot B_\delta \cdot \delta \cdot k_c = \frac{2}{4\pi \cdot 10^{-7}} \cdot 0,866 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} \cdot 1,0225 \quad (67)$$

$$U_\delta = 627,87 \text{ A}$$

Magnetické napětí zubu statoru

$$U_{mz1} = 2 \cdot h_{z1} \cdot H_{z1} = 2 \cdot 0,008918 \cdot 4400 = 174,1735 \text{ A} \quad (68)$$

Magnetické napětí zubu rotoru

$$U_{mz2} = 2 \cdot h_{z2} \cdot H_{z2} = 2 \cdot 0,00802 \cdot 4400 = 78,4784 \text{ A} \quad (69)$$

Činitel nasycení zubů

$$k_z = 1 + \frac{U_{mz1} + U_{mz2}}{U_\delta} = 1 + \frac{174,1735 + 78,4784}{627,87} = 1,402 \quad (70)$$

Hodnota činitele nasycení zubů vyhovuje doporučenému rozmezí 1,2 - 1,5

Střední délka indukční čáry ve jhu statoru

$$L_{j1} = \frac{\pi(D_{1e} - h_{j1})}{2p} = \frac{\pi(0,225 - 0,01846)}{4} = 0,1806 \text{ m} \quad (71)$$

Magnetické napětí jha statoru

$$U_{mj1} = L_{j1} \cdot H_{j1} = 0,1806 \cdot 2000 = 361,35 \text{ A} \quad (72)$$

Střední délka indukční čáry ve jhu rotoru

$$L_{j2} = \frac{\pi(D_{2i} + h_{j2})}{2p} = \frac{\pi(0,0339 + 0,02954)}{4} = 0,0793 \text{ m} \quad (73)$$

Výška jha rotoru

$$h_{j2} = \frac{D_{2e} - D_{2i}}{2} - h_{d2} = \frac{0,1475 - 0,0339}{2} - 0,0273 = 0,0295 \quad (74)$$

Magnetické napětí jha rotoru

$$U_{mj2} = L_{j2} \cdot H_{j2} = 0,0793 \cdot 129 = 102,388 \text{ A} \quad (75)$$

Magnetické napětí na jednu pólovou dvojici

$$U_m = U_\delta + U_{mj1} + U_{mz1} + U_{mj2} + U_{mz2} = \quad (76)$$

$$U_m = 627,8728 + 361,35 + 174,1735 + 102,388 + 78,4784 =$$

$$U_m = 1344,26 \text{ A}$$

Činitel nasycení magnetického obvodu

$$k_\mu = \frac{U_m}{U_\delta} = \frac{1344,26}{624,8728} = 2,15 \quad (77)$$

Magnetizační proud

$$I_\mu = \frac{p \cdot U_m}{0,9 \cdot m \cdot N_1 \cdot k_{v1}} = \frac{2 \cdot 1344,26}{0,9 \cdot 3 \cdot 96 \cdot 0,9452} = 10,97 \text{ A} \quad (78)$$

Poměrná hodnota magnetizačního proudu

$$i_{\mu} = \frac{I_{\mu}}{I_{1N}} = \frac{10,97}{20,586} = 0,53 \text{ A} \quad (79)$$

## 2.4 Výpočet prvků náhradního schéma

Střední šířka cívky

$$b_c = \frac{\pi(D_{1i} + h_{d1})}{2p} = \frac{\pi(0,1485 + 0,01979)}{4} = 0,1321 \text{ m} \quad (80)$$

Délka drážkové části

$$l_d = l_{Fe} = 0,127 \text{ m} \quad (81)$$

Délka čela cívky

$$l_{\xi} = K_{\xi} \cdot b_c + 2 \cdot B = 1,30 \cdot 0,1321 + 2 \cdot 0,01 = 0,191 \text{ m} \quad (82)$$

Činitel  $K_{\xi}$  byl odečten z tabulky Tab. 0.II,  $K_{\xi} = 1,30$

Délka přímé části cívky, při výstupu z drážky od čela statorového svazku do začátku ohybu čela, se u vsypávaných vinutí bere  $B = 0,01$

Tab. 0.II Tabulka hodnot k výpočtu čel vsypávaného vinutí

cívky statoru		
počet pólů	čela neizolovaná	
	$K_{\xi}$	$K_v$
2	1,20	0,26
4	1,30	0,40
6	1,40	0,50
$\geq 8$	1,50	0,50

Vyložení čel statorového vinutí

$$l_v = K_v \cdot b_c + B = 0,40 \cdot 0,1321 + 0,01 = 0,06 \text{ m} \quad (83)$$

Činitel  $K_v$  byl odečten z tabulky Tab. 0.II,  $K_v = 0,40$



Střední délka závitů

$$l_{av} = 2 \cdot (l_d + l_{\xi}) = 2 \cdot (0,127 + 0,191) = 0,636 \text{ m} \quad (84)$$

Délka vodičů jedné fáze statorového vinutí

$$L_1 = N_1 \cdot l_{av} = 96 \cdot 0,636 = 61,056 \text{ m} \quad (85)$$

Odpor jedné fáze statorového vinutí

$$R_1 = \rho_{Cu} \cdot \frac{L_1}{a \cdot S_v} = \frac{1}{41} \cdot 10^{-6} \cdot \frac{61,056}{1 \cdot 1,369 \cdot 10^{-6}} = 1,087 \Omega \quad (86)$$

Poměrná hodnota statorového odporu

$$r_1 = R_1 \cdot \frac{I_{1N}}{U_{1N}} = 1,087 \cdot \frac{20,586}{230} = 0,097 \quad (87)$$

Odpor tyče rotorového vinutí

$$R_t = \rho_{Al} \cdot \frac{l_t}{S_t} = \frac{1}{20,5} \cdot 10^{-6} \cdot \frac{0,127}{1,05 \cdot 10^{-4}} = 5,9 \cdot 10^{-5} \Omega \quad (88)$$

Odpor kruhu nakrátko

$$R_{kr} = \rho_{Al} \cdot \frac{\pi \cdot D_{kn}}{Q_2 \cdot S_{kr}} = \frac{1}{20,5} \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\pi \cdot 0,1093}{26 \cdot 0,000257} = 2,51 \cdot 10^{-6} \Omega \quad (89)$$

Odpor fáze rotorového vinutí

$$R_2 = R_t + \frac{2 \cdot R_{kr}}{\Delta^2} = 5,9 \cdot 10^{-5} + \frac{2 \cdot 2,51 \cdot 10^{-6}}{0,4786^2} = 8,092 \cdot 10^{-5} \Omega \quad (90)$$

Odpor fáze rotoru přepočtený na počet závitů statoru

$$R'_2 = R_2 \cdot 4 \cdot m \cdot \frac{(N_1 \cdot k_{v1})^2}{Q_2} = \quad (91)$$

$$R'_2 = 8,092 \cdot 10^{-5} \cdot 4 \cdot 3 \cdot \frac{(96 \cdot 0,9452)^2}{26} = 0,310 \Omega$$

Poměrná hodnota přepočteného odporu

$$r'_2 = R'_2 \cdot \frac{I_{1N}}{U_{1N}} = 0,307 \cdot \frac{20,586}{230} = 0,0275 \quad (92)$$

Činitel  $k_\beta$

$$k_\beta = 0,25 \cdot (1 + 3 \cdot k'_\beta) = 0,25 \cdot (1 + 3 \cdot 0,91) = 0,9325 \quad (93)$$

Činitel  $k'_\beta$

$$k'_\beta = 0,25 \cdot (1 + 3 \cdot \beta) = 0,25 \cdot (1 + 3 \cdot 0,88) = 0,91 \quad (94)$$

Činitel magnetické vodivosti v drážce

$$\lambda_{d2} = \frac{h_3}{3b_2} \cdot k_\beta + \left( \frac{h_2}{b_2} + \frac{3h_1}{b_2 + 2b_0} + \frac{h_0}{b_0} \right) \cdot k'_\beta \quad (95)$$

$$\lambda_{d2} = \frac{0,00998}{3 \cdot 0,0079} \cdot 0,9325 + \left( \frac{0,6 \cdot 10^{-3}}{0,0079} + \frac{3 \cdot 2,4 \cdot 10^{-3}}{0,0079 + 2 \cdot 0,001} + \frac{0,0005}{0,001} \right) \cdot 0,91 =$$

$$\lambda_{d2} = 1,578$$

Kde část klínu zasahující do prostoru drážky je  $h_2 = 0,6 \text{ mm}$ ,  $h_1 = 2,4 \text{ mm}$

Činitel magnetické vodivosti čel

$$\lambda_{\zeta 1} = 0,34 \cdot \frac{q}{l_{Fe}} \cdot (l_\zeta - 0,64\beta t_{p1}) = \quad (96)$$

$$\lambda_{\zeta 1} = 0,34 \cdot \frac{3}{0,127} \cdot (0,191 - 0,64 \cdot 0,88 \cdot 0,1166) = 1,01$$

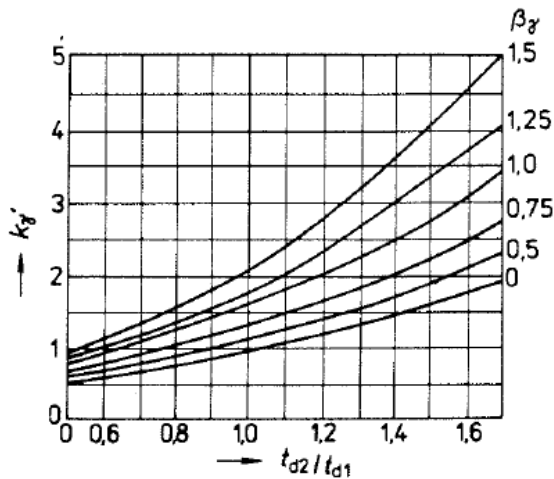
Činitel magnetické vodivosti diferenčního rozptylu

$$\lambda_{dif1} = \frac{t_{d1}}{12\delta \cdot k_c} \cdot \xi = \frac{0,01295}{12 \cdot 0,0005 \cdot 1,0225} \cdot 2,59 = 5,467 \quad (97)$$

$$\xi = 2k'_\gamma \cdot k_\beta - k_{v1}^2 \left( \frac{t_{d2}}{t_{d1}} \right)^2 = \quad (98)$$

$$\xi = 2 \cdot 1,4 \cdot 0,9325 - 0,9452^2 \cdot \left( \frac{0,01782}{0,1295} \right)^2 = 2,59$$

$k'_\gamma = 1,4$ , hodnota stanovena z obr.0,7



Obr. 0.7 činitel  $k'_\gamma [1]$

Rozptylová reaktance fáze statorového vinutí

$$X_{1\sigma} = 15,8 \cdot \frac{f}{100} \cdot \left(\frac{N_1}{100}\right)^2 \cdot \frac{l_{Fe}}{p \cdot q} \cdot (\lambda_d + \lambda_\zeta + \lambda_{dif1}) = \tag{99}$$

$$X_{1\sigma} = 15,8 \cdot \frac{50}{100} \cdot \left(\frac{96}{100}\right)^2 \cdot \frac{0,127}{2 \cdot 3} \cdot (1,578 + 1,01 + 5,467) =$$

$$X_{1\sigma} = 1,087 \Omega$$

Poměrná hodnota rozptylové reaktance

$$x_{1\sigma} = X_{1\sigma} \cdot \frac{I_{1N}}{U_{1N}} = 1,241 \cdot \frac{20,586}{230} = 0,111 \tag{100}$$

Činitel magnetické vodivosti drážky rotorového vinutí

$$\lambda_{d2} = \left[ \frac{h_1}{3b} \left( 1 - \frac{\pi \cdot b^2}{8S_t} \right)^2 + 0,66 - \frac{b_0}{2b} \right] \cdot k_d + \frac{h_0}{b_0} = \tag{101}$$

$$\lambda_{d2} = \left[ \frac{0,00864}{3 \cdot 0,00828} \left( 1 - \frac{\pi \cdot 0,00828^2}{8 \cdot 1,05 \cdot 10^{-4}} \right)^2 + 0,66 - \frac{0,001}{2 \cdot 0,00828} \right] \cdot 1 + \frac{0,0005}{0,001} =$$

$$\lambda_{d2} = 5,40$$

Činitel magnetické vodivosti čel rotorového vinutí

$$\lambda_{\zeta 2} = \frac{2,3 \cdot D_{kn}}{Q_2 \cdot l'_e \cdot \Delta^2} \cdot \log \frac{4,7 \cdot D_{kn}}{a_{kn} + b_{kn}} = \tag{102}$$

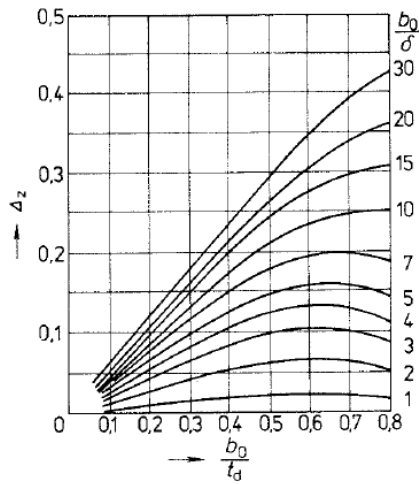
$$\lambda_{\zeta 2} = \frac{2,3 \cdot 0,1093}{26 \cdot 0,127 \cdot 0,4786^2} \cdot \log \frac{4,7 \cdot 0,1093}{0,0382 + 0,00674} = 0,228$$

Činitel magnetické vodivosti diferenčního rozptylu rotoru

$$\lambda_{dif2} = \frac{t_{d2}}{12\delta \cdot k_c} \cdot \xi = \frac{0,01782}{12 \cdot 0,0005 \cdot 1,0225} \cdot (1 - 0,06) = 2,73 \quad (103)$$

Pokud  $\frac{Q_2}{p} \geq 10$  je možné s dostatečnou přesností předpokládat  $\xi = 1 - \Delta_z$

Kde  $\Delta_z=0,06$ , odečteno Obr.0,8



Obr. 0.8 činitel  $\Delta_z [I]$

Celkový činitel magnetické vodivosti rotorového vinutí

$$\sum \lambda_2 = \lambda_{d2} + \lambda_{\check{c}2} + \lambda_{dif2} = 1,578 + 0,228 + 2,73 = 4,536 \quad (104)$$

Rozptylová reaktance fáze rotorového vinutí

$$X_{2\sigma} = 7,9 \cdot f \cdot l_{Fe} \cdot \sum \lambda_2 \cdot 10^{-6} = 7,9 \cdot 50 \cdot 0,127 \cdot 4,536 \cdot 10^{-6} = \quad (105)$$

$$X_{2\sigma} = 2,275 \cdot 10^{-4} \Omega$$

Přepočítaná rozptylová reaktance rotorového vinutí

$$X'_{2\sigma} = X_{2\sigma} \cdot 4 \cdot m \cdot \frac{(N_1 \cdot k_{v1})^2}{Q_2} = \quad (106)$$

$$X'_{2\sigma} = 2,275 \cdot 10^{-4} \cdot 4 \cdot 3 \cdot \frac{(96 \cdot 0,9452)^2}{26} = 0,8647 \Omega$$

Poměrná hodnota rozptylové reaktance rotorového vinutí

$$x'_{2\sigma} = X'_{2\sigma} \cdot \frac{I_{1N}}{U_{1N}} = 0,8647 \cdot \frac{20,586}{230} = 0,0774 \quad (107)$$

## 2.5 Výpočet ztrát

Hmotnost jha statoru

$$m_{1j} = \pi \cdot (D_{1e} - h_{1j}) \cdot h_{1j} \cdot l_{Fe} \cdot k_{Fe} \cdot \rho_{Fe} = \quad (108)$$

$$m_{1j} = \pi \cdot (0,225 - 0,01846) \cdot 0,01846 \cdot 0,127 \cdot 0,97 \cdot 7800 =$$

$$m_{1j} = 11,51 \text{ kg}$$

Hustota oceli  $\rho_{Fe} = 7800 \text{ kg/m}^3$

Hmotnost zubů statoru

$$m_{1z} = h_{1z} \cdot b_{1z} \cdot Q_1 \cdot l_{Fe} \cdot \rho_{Fe} \cdot k_{Fe} \cdot \rho_{Fe} = \quad (109)$$

$$m_{1z} = 0,008918 \cdot 0,00573 \cdot 36 \cdot 0,127 \cdot 0,97 \cdot 7800 = 1,767 \text{ kg}$$

Hlavní ztráty v železe

$$\Delta P_{Feh} = \Delta p_{1,0} \left( \frac{f}{50} \right)^\beta \cdot (k_{dj} \cdot B_{j1}^2 \cdot m_{j1} + k_{dz} \cdot B_{z1}^2 \cdot m_{z1}) = \quad (110)$$

$$\Delta P_{Feh} = 1,6 \cdot \left( \frac{50}{50} \right)^{1,3} \cdot (1,6 \cdot 1,6^2 \cdot 11,51 + 1,8 \cdot 1,767) = 91,92 \text{ W}$$

Kde činitele uvažující vliv nerovnoměrnosti rozložení toku v částech magnetického obvodu a vliv technologie výroby statorového svazku  $k_{dj} = 1,6$  a  $k_{dz} = 1,8$

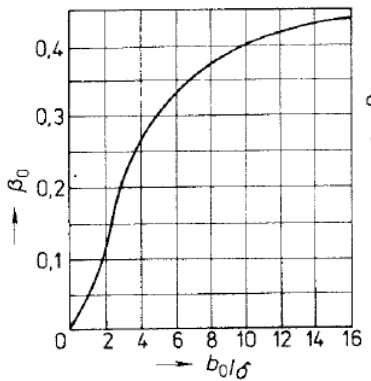
Tab. 0.I Tabulka hodnot  $k$  výpočtu čel vsypávaného vinutí

elektrotechnická ocel třídy		tloušťka plechů (mm)	$\Delta p_{1,0/50}$ (W/kg)	$\beta$
GOST	2013, 2011, 2211	0,5	2,5 – 2,6	1,5
	2312	0,5	1,75	1,4
	2411	0,5	1,6	1,3

Pulzující indukce ve vzduchové mezeře nad hlavami zubů statoru

$$B_{01} = \beta_{01} \cdot k_c \cdot B_\delta = 0,12 \cdot 1,0225 \cdot 0,866 = 0,106 \text{ T} \quad (111)$$

kde  $\beta_{01} = 0,12$ , odečteno z Obr. 0.9



Obr. 0.9 graf hodnot pro  $\beta_{01}$ ,  $\beta_{02}$  [1]

Hustota povrchových ztrát statoru

$$p_{\delta p1} = 0,5 \cdot k_{02} \cdot \left( \frac{Q_2 \cdot n}{10000} \right)^{1,5} \cdot (B_{01} \cdot t_{d2} \cdot 10^3)^2 = \quad (112)$$

$$p_{\delta p1} = 0,5 \cdot 1,85 \cdot \left( \frac{26 \cdot 1420}{10000} \right)^{1,5} \cdot (0,106 \cdot 0,017822 \cdot 10^3)^2 =$$

$$p_{\delta p1} = 23,418 \text{ W/m}^2$$

$$k_{02} = 1,7 - 2,0 \text{ zvoleno } 1,85$$

Povrchové ztráty v statoru

$$\Delta P_{\delta p1} = p_{\delta p1} \cdot (t_{d1} - b_{01}) \cdot Q_1 \cdot l_{Fe} = \quad (113)$$

$$\Delta P_{\delta p1} = 23,418 \cdot (0,01295 - 0,001) \cdot 36 \cdot 0,127 = 1,279 \text{ W}$$

Pulzující indukce ve vzduchové mezeře nad hlavami zubů rotoru

$$B_{02} = \beta_{02} \cdot k_c \cdot B_\delta = 0,12 \cdot 1,0225 \cdot 0,866 = 0,106 \text{ T} \quad (114)$$

Kde  $\beta_{02} = 0,12$ , odečteno z Obr. 0.9

Hustota povrchových ztrát rotoru

$$p_{\delta p2} = 0,5 \cdot k_{02} \cdot \left( \frac{Q_1 \cdot n}{10000} \right)^{1,5} \cdot (B_{02} \cdot t_{d1} \cdot 10^3)^2 = \quad (115)$$

$$p_{\delta p2} = 0,5 \cdot 1,85 \cdot \left( \frac{36 \cdot 1420}{10000} \right)^{1,5} \cdot (0,106 \cdot 0,01295 \cdot 10^3)^2 =$$

$$p_{\delta p2} = 20,145 \text{ W/m}^2$$

$$k_{02} = 1,7 - 2,0 \text{ zvoleno } 1,85$$

Povrchové ztráty v rotoru

$$\Delta P_{\delta p2} = p_{\delta p2} \cdot (t_{d2} - b_{02}) \cdot Q_2 \cdot l_{Fe} = \quad (116)$$

$$\Delta P_{\delta p2} = 20,145 \cdot (0,017822 - 0,001) \cdot 26 \cdot 0,127 = 1,118 \text{ W}$$

Hmotnost zubů rotoru

$$m_{2z} = h_{2z} \cdot b_{2z} \cdot Q_2 \cdot l_{Fe} \cdot \rho_{Fe} \cdot k_{Fe} = \quad (117)$$

$$m_{2z} = 0,00802 \cdot 0,00834 \cdot 26 \cdot 0,127 \cdot 7800 \cdot 0,97 = 1,67 \text{ kg}$$

Indukce pulzací ve středním průřezu zubu statoru

$$B_{p1} = \frac{\gamma_1 \cdot \delta}{2 \cdot t_{d1}} \cdot B_{z1} = \frac{0,571 \cdot 0,0005}{2 \cdot 0,01295} \cdot 1,8 = 0,0198 \text{ T} \quad (118)$$

$$\gamma_1 = \frac{\left( \frac{b_{01}}{\delta} \right)^2}{5 + \left( \frac{b_{01}}{\delta} \right)} = \frac{\left( \frac{0,001}{0,0005} \right)^2}{5 + \left( \frac{0,001}{0,0005} \right)} = 0,571 \quad (119)$$

Pulzní ztráty v zubech statoru

$$\Delta P_{p1} = 0,11 \cdot \left( \frac{Q_2 \cdot n}{1000} \cdot B_{p1} \right)^2 \cdot m_{z1} = \quad (120)$$

$$\Delta P_{p1} = 0,11 \cdot \left( \frac{26 \cdot 1420}{1000} \cdot 0,0198 \right)^2 \cdot 1,767 = 0,104 \text{ W}$$

Indukce pulzací ve středním průřezu zubu rotoru

$$B_{p2} = \frac{\gamma_1 \cdot \delta}{2 \cdot t_{d2}} \cdot B_{z2} = \frac{0,571 \cdot 0,0005}{2 \cdot 0,017822} \cdot 1,7 = 0,0136 \text{ T} \quad (121)$$

$$\gamma_2 = \frac{\left(\frac{b_{02}}{\delta}\right)^2}{5 + \left(\frac{b_{02}}{\delta}\right)} = \frac{\left(\frac{0,001}{0,0005}\right)^2}{5 + \left(\frac{0,001}{0,0005}\right)} = 0,571 \quad (122)$$

Pulzní ztráty v zubech rotoru

$$\Delta P_{p2} = 0,11 \cdot \left(\frac{Q_1 \cdot n}{1000} \cdot B_{p2}\right)^2 \cdot m_{z2} = \quad (123)$$

$$\Delta P_{p2} = 0,11 \cdot \left(\frac{36 \cdot 1420}{1000} \cdot 0,0136\right)^2 \cdot 1,67 = 0,0887 \text{ W}$$

Dodatečné ztráty v železe

$$\Delta P_{Fed} = \Delta P_{\delta p1} + \Delta P_{\delta p2} + \Delta P_{p1} + \Delta P_{p2} = \quad (124)$$

$$\Delta P_{Fed} = 1,279 + 1,118 + 0,104 + 0,0887 = 2,589 \text{ W}$$

Celkové ztráty v železe

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_{Feh} + \Delta P_{Fed} = 91,92 + 2,589 = 94,51 \text{ W} \quad (125)$$

Mechanické ztráty a ventilační ztráty

$$\Delta P_{mech} = K_t \cdot \left(\frac{n}{1000}\right)^2 \cdot (10 D_{1e})^3 = \quad (126)$$

$$\Delta P_{mech} = 6 \cdot \left(\frac{1420}{1000}\right)^2 \cdot (10 \cdot 0,225)^3 = 137,81 \text{ W}$$

Kde  $K_t = 6$  pro  $2p \geq 4$

$$\Delta P_N = \Delta P_{Fe} + \Delta P_{j1} + \Delta P_{mech} = \quad (127)$$

$$\Delta P_N = 94,51 + 1381,96 + 137,81 = 1614,28 \text{ W}$$



## Přídavné ztráty

$$\Delta P_{\text{příd}} = 0,5\% \cdot \Delta P_N = 0,005 \cdot 1614,25 = 8,07 \text{ W} \quad (128)$$

## Dodatečné ztráty

$$\Delta P_d = 0,005 \cdot \frac{P_2}{\eta} = 0,005 \cdot \frac{10000}{0,88} = 56,82 \text{ W} \quad (129)$$

## Elektrické ztráty ve všech fázích vinutí statoru

$$\Delta P_{j1} = m_1 \cdot R_1 \cdot I_1^2 = 3 \cdot 1,087 \cdot 20,586^2 = 1381,96 \text{ W} \quad (130)$$

## Elektrické ztráty v klecovém vinutí rotoru nakrátko

$$\Delta P_{j2} = m_2 \cdot R_2 \cdot I_t^2 = 26 \cdot 8,092 \cdot 10^{-5} \cdot 366,417^2 = 282,48 \text{ W} \quad (131)$$

## Elektrické ztráty statoru při chodu naprázdno

$$\Delta P_{j10} = 3 \cdot R_1 \cdot I_\mu^2 = 3 \cdot 1,087 \cdot 10,97^2 = 392,43 \text{ W} \quad (132)$$

## Celkové ztráty

$$\Delta P = \Delta P_{Fe} + \Delta P_{j2} + \Delta P_{j1} + \Delta P_{\text{příd}} + \Delta P_{mech} = \quad (133)$$

$$\Delta P = 94,51 + 282,48 + 1381,96 + 8,07 + 137,81 = 1904,83 \text{ W}$$

## Účinnost , výpočet z celkových ztrát

$$\eta = 1 - \frac{\Delta P}{P_1} = 1 - \frac{1904,83}{13778} = 0,862 \quad (134)$$

## Činný proud naprázdno

$$I_0 = \sqrt{I_{0\check{c}}^2 + I_\mu^2} = \sqrt{0,91^2 + 10,97^2} = 11,01 \text{ A} \quad (135)$$

$$I_{0\check{c}} = \frac{\Delta P_{Fe} + \Delta P_{mech} + \Delta P_{j0}}{m_1 \cdot U_{1N}} = \frac{94,51 + 137,81 + 392,43}{3 \cdot 230} = 0,91 \text{ A} \quad (136)$$

Účinitel naprázdno

$$\cos \varphi_0 = \frac{I_{0\check{c}}}{I_0} = \frac{0,91}{11,01} = 0,0827 \quad (137)$$

## 2.6 Zatěžovací charakteristiky

Odpor příčné větve dle náhradního schéma

$$R_{12} = \frac{\Delta P_{mech}}{m_1 \cdot I_\mu^2} = \frac{137,81}{3 \cdot 10,97^2} = 0,382 \, \Omega \quad (138)$$

Reaktance příčné větve dle náhradního schéma

$$X_{12} = \frac{U_{1N}}{I_\mu} - X_{1\sigma} = \frac{230}{10,97} - 1,241 = 19,725 \, \Omega \quad (139)$$

Činitel  $\gamma$

$$\gamma = \tan^{-1} \frac{R_1 \cdot X_{12} - R_{12} \cdot X_{1\sigma}}{R_{12} \cdot (R_1 + R_{12}) + X_{12} \cdot (X_{1\sigma} + X_{12})} = \quad (140)$$

$$\gamma = \tan^{-1} \frac{1,087 \cdot 19,725 - 0,382 \cdot 1,241}{0,382 \cdot (1,087 + 0,382) + 19,725 \cdot (1,241 + 19,725)} =$$

$$\gamma = 0,051 = 0^\circ 3' 2,12'' < 1^\circ$$

Činitel rozptylu

$$c_1 = 1 + \frac{X_{1\sigma}}{X_{12}} = 1 + \frac{1,241}{19,725} = 1,06 \quad (141)$$

Jmenovitý skluz

$$s_n = R'_2 + \frac{I_{1n}}{U_{f1}} = 0,310 + \frac{20,59}{230} = 0,02775 \quad (142)$$

Tabulka hodnot pro zatěžovací charakteristiky je uvedena v příloze **D**

## 2.7 Tepelný výpočet

Elektrické ztráty ve vinutí statoru se dělí na ztráty v drážkách  $\Delta P'_{jd1}$  a ztráty v čelech cívek  $\Delta P'_{jč1}$

Elektrické ztráty v drážkách

$$\Delta P'_{jd1} = k_{\rho} \cdot \Delta P_{j1} \cdot \frac{2 l_{Fe}}{l_{av}} = 1,07 \cdot 1381,96 \cdot \frac{2 \cdot 0,127}{0,636} = 590,55 \text{ W} \quad (143)$$

Činitel zvýšení ztrát pro izolaci třídy F

$$k_{\rho} = \frac{\rho_{140}}{\rho_{115}} = 1,07$$

Elektrické ztráty v čelech cívek

$$\Delta P'_{jč1} = k_{\rho} \cdot \Delta P_{j1} \cdot \frac{2 l_{\xi}}{l_{av}} = 1,07 \cdot 1381,96 \cdot \frac{2 \cdot 0,191}{0,636} = 888,148 \text{ W} \quad (144)$$

Oteplení vnitřního povrchu statorového svazku nad teplotu vzduchu uvnitř stroje

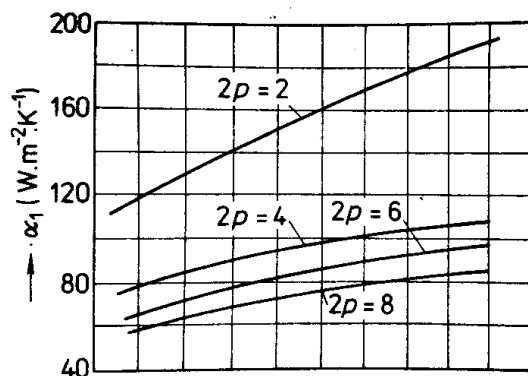
$$\Delta T_{Fe} = K \cdot \frac{\Delta P'_{jd1} + \Delta P_{Feh}}{\pi \cdot D_{e1} \cdot l_{Fe} \cdot \alpha_1} = 0,20 \cdot \frac{590,55 + 94,51}{\pi \cdot 0,225 \cdot 0,127 \cdot 105} = \quad (145)$$

$$\Delta T_{Fe} = 14,54 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$K$  je činitel respektující, že část ztrát v železe statoru a v drážkové části vinutí se předává kostrou přímo do okolního prostředí,  $K = 0,20$ , činitel odečten z tabulky Tab. 0.I

$\alpha_1$  je součinitel přestupu tepla z povrchu

$$\alpha_1 = 105 \text{ W/m}^2\text{K}$$



Obr. 0.10 součinitel přestupu tepla [1]

Tab. 0.IITabulka hodnot  $k$  výpočtu čel vsypávaného vinutí

krytí	počet pólů motoru 2p					
	2	4	6	8	10	12
IP 44	0,22	0,20	0,19	0,18	0,17	0,16

Teplotní spád v izolaci drážkové části

$$\Delta T_{izd} = \frac{\Delta P'_{jd1}}{Q_1 \cdot O_{d1} \cdot l_{Fe}} \cdot \left( \frac{b_{i1}}{\lambda_{ekv}} + \frac{b_1 + b_2}{16 \cdot \lambda'_{ekv}} \right) = \quad (146)$$

$$\Delta T_{izd} = \frac{590,55}{36 \cdot 0,058 \cdot 0,127} \cdot \left( \frac{0,03 \cdot 10^{-3}}{0,16} + \frac{0,01068 + 0,00792}{16 \cdot 1,05} \right) =$$

$$\Delta T_{izd} = 2,88 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$b_{i1} = 0,30 \text{ mm}$$

$$\lambda_{ekv} = 0,16 \text{ W/mK}$$

$$\lambda'_{ekv} = 1,05 \text{ W/mK}$$

Výpočtový obvod statorové drážky

$$O_{d1} = 2h_{d1} + b_1 + b_2 = 2 \cdot 0,01979 + 0,01068 + 0,00792 = \quad (147)$$

$$O_{d1} = 0,058 \text{ m}$$

Teplotní spád na tloušťce izolace čel

$$\Delta T_{izč} = \frac{\Delta P'_{jč1}}{2 \cdot Q_1 \cdot O_{č1} \cdot l_{č1}} \cdot \left( \frac{b_{ič}}{\lambda_{ekv}} + \frac{h_{d1}}{12 \cdot \lambda'_{ekv}} \right) = \quad (148)$$

$$= \frac{590,55}{2 \cdot 36 \cdot 0,058 \cdot 0,191} \cdot \left( \frac{0}{0,16} + \frac{0,01979}{12 \cdot 1,05} \right) = 1,16 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$O_{č1} = O_{d1} = 0,058 \text{ m}$$

$$b_{ič} = 0, \text{ neizolovaná čela vinutí}$$

$$\lambda_{ekv} = 0,16 \text{ W/mK}$$

$$\lambda'_{ekv} = 1,05 \text{ W/mK}$$

Oteplení vnějšího povrchu čel nad teplotu vzduchu uvnitř stroje

$$\Delta T_{povč} = K \cdot \frac{\Delta P_{jč1}}{2 \cdot \pi \cdot D_{1i} \cdot \alpha_1 \cdot l_{v1}} = 0,2 \cdot \frac{590,55}{2 \cdot \pi \cdot 0,1485 \cdot 105 \cdot 0,06} = \quad (149)$$

$$\Delta T_{povč} = 20,09 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Střední oteplení statorového vinutí nad teplotu vzduchu uvnitř stroje

$$\Delta T_{vinuti} = \frac{(\Delta T_{Fe} + \Delta T_{izd}) \cdot 2 \cdot l_{Fe}}{l_{av}} + \frac{(\Delta T_{izč} + \Delta T_{povč}) \cdot 2 \cdot l_{č}}{l_{av}} = \quad (150)$$

$$\Delta T_{vinuti} = \frac{(14,54 + 2,88) \cdot 2 \cdot 0,127}{0,636} + \frac{(1,16 + 20,09) \cdot 2 \cdot 0,191}{0,636} =$$

$$\Delta T_{vinuti} = 22,19 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Součet ztrát

$$\sum \Delta P' = \Delta P + (k_\rho - 1) \cdot (\Delta P_{j1} + \Delta P_{j2}) = \quad (151)$$

$$\sum \Delta P' = 3827,29 + (1,07 - 1) \cdot (1381,96 + 282,48) =$$

$$\sum \Delta P' = 3943,8 \text{ W}$$

Součet všech ztrát odváděných do vzduchu uvnitř stroje

$$\sum \Delta P'_{\nu} = \Delta P' - (1 - K) \cdot (\Delta P'_{jd1} + \Delta P_{Feh}) - 0,9 \cdot \Delta P_{mech} = \quad (152)$$

$$\sum \Delta P'_{\nu} = 3943,8 - (1 - 0,2) \cdot (590,55 + 91,92) - 0,9 \cdot 137,81 =$$

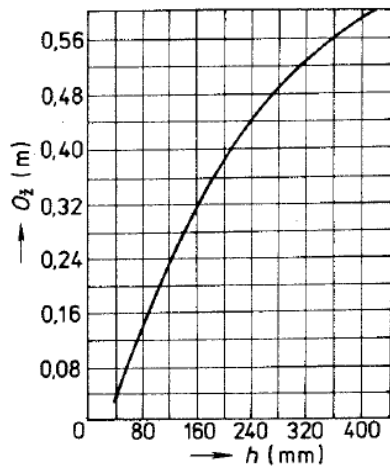
$$\sum \Delta P'_{\nu} = 3273,79 \text{ W}$$

Ekvivalentní ochlazovací povrch tělesa stroje

$$S_{t\tilde{t}l} = (\pi \cdot D_{e1} + 8 \cdot O_{\tilde{z}}) \cdot (l_d + 2l_v) = \quad (153)$$

$$S_{t\tilde{t}l} = (\pi \cdot 0,225 + 8 \cdot 0,24) \cdot (0,127 + 2 \cdot 0,06) = 0,648 \text{ m}^2$$

Obvod příčného řezu žeber  $O_{\tilde{z}} = 0,24 \text{ m}$



Obr. 0.11 obvod příčného řezu žebel [1]

Oteplení vzduchu ve stroji nad teplotu okolí

$$\Delta T_{vz} = \frac{\sum \Delta P'_v}{S_{těl} \cdot \alpha_1} = \frac{3273,79}{0,648 \cdot 105} = 48,11^\circ\text{C} \quad (154)$$

Střední oteplení statorového vinutí nad teplotu okolí

$$\Delta T_{vin} = \Delta T_{vinuti} + \Delta T_{vz} = 22,19 + 48,11 = 70,3^\circ\text{C} \quad (155)$$

## 2.8 Výpočet ventilace

Činitel uvažující změnu chladících podmínek po délce povrchu kostry ofukované vnějším ventilátorem

$$k_m = m \sqrt{\frac{n}{100} \cdot D_{1e}} = 1,8 \sqrt{\frac{1420}{100} \cdot 0,225} = 3,22 \quad (156)$$

$m = 1,8$  pro motory s  $2p \geq 4$

Potřebný průtok vzduchu pro ventilaci

$$Q_v = \frac{k_m \cdot \sum \Delta P_v'}{1100 \cdot \Delta T_{vz}} = \frac{3,22 \cdot 3273,79}{1100 \cdot 48,11} = 0,199 \text{ m}^3/\text{s} \quad (157)$$

Průtok vzduchu, který dodává vnější ventilátor

$$Q'_v = 0,1 \cdot m \cdot \frac{n}{100} \cdot D_{1e}^2 = 0,1 \cdot 3,15 \cdot \frac{1420}{100} \cdot 0,225^2 = \quad (158)$$

$$Q'_v = 0,227 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$m = 3,15 \text{ pro motory s } 2p \geq 4$$

### 3 Ověření návrhu pomocí metody konečných prvků

Protože ve většině analýz elektrických či magnetických polí se vyskytují různé faktory, které mohou ovlivňovat výsledky (např.: použití materiálů, které mají nelineární charakteristiky, složité uspořádání prvků či okrajové podmínky apod.) je vhodné k řešení použít numerické metody. Metoda konečných prvků se používá především pro kontrolu a ověřování stanovených hodnot a vlastností, které již byly určeny pro daný model analytickým výpočtem.

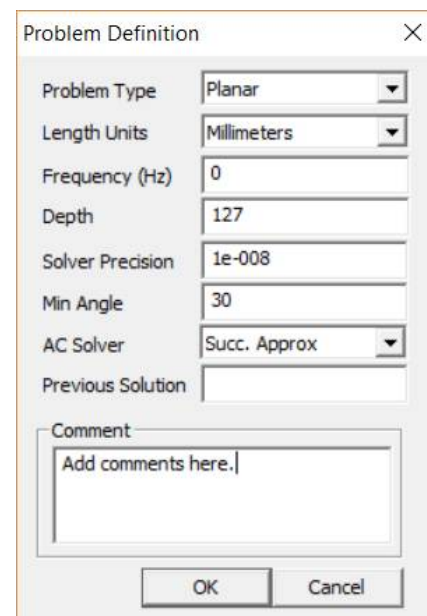
Tato metoda je numerickou metodou, která využívá toho, že danou oblast rozloží na konečný počet prvků. Praktický výpočet pak probíhá tak, že se vytvoří geometrický model tělesa, který se spojitě rozdělí na prvky konečných rozměrů. Základním prvkem je trojúhelník, kde rohy tohoto prvku jsou uzlovými body, ke kterým se vytváří daná síť, jejíž hustota pak ovlivňuje přesnost výsledků. [4] V následující části práce bylo popsáno modelování stroje pomocí metody konečných prvků v programu FEMM 4.2.

#### Postup modelování stroje

Nejdříve jsem nakreslila rozměrový výkres motoru, který jsem poté ve formátu dxf. importovala do prostředí programu FEMM. Výkres jsem vytvořila v programu Solidworks 2015, protože FEMM má pouze základní funkce pro kreslení daných objektů a bylo by náročné v něm výkres vytvořit.

#### Definování problému

Po spuštění programu FEMM bylo nutné si z nabízených problémů vybrat ten, který jsem chtěla řešit, v mém případě magnetický problém. V následujícím kroku bylo nutné nadefinovat problém. Volba „Problem Type“ určuje, jak vypadá daný 2D model ve 3D prostoru, kdy „Planar“ určuje to, že se model pouze protáhne do hloubky, kterou jsem zadala do kolonky „Depth“. Ve třetí kolonce „Frequency (Hz)“ bylo třeba nastavit jednotlivé frekvence, které odpovídaly skluzům v rozmezí 0 až 1, kdy  $s = 0$  stav naprázdno a  $s = 1$  stav nakrátko



Obr. 3.1 Definování problému



## Nastavení vlastností jednotlivých ploch

V další fázi bylo potřeba určit materiálové vlastnosti jednotlivých částí modelu. FEMM obsahuje knihovnu s již předdefinovanými materiály. Dal se tedy vybrat materiál z této nabízené knihovny, či si přidat svůj vlastní, dle potřeby. Nastavení materiálu jsem provedla v záložce „Properties“ → „Material Library“, čímž jsem se dostala do knihovny materiálů, kde jsem našla potřebné materiály a přetáhla je do okénka vpravo.

Nyní už jsem jen přiřadila jednotlivý materiál pro statorové/rotorové drážky, vzduchovou mezeru, magnetický obvod a hřídel. Model s přiřazenými materiálovými vlastnostmi, nadefinovanými proudy a se sítí pro výpočet, byl pro ilustraci uveden na následujícím obr. Obr. 3.2 *Nastavení materiálových vlastností*.

Pouze pro dané plechy M36, tvořící magnetický obvod jsem použila nelineární B-H charakteristiku, pro získání přesnějších výsledků. Charakteristika plechů byla načtena z textového souboru. Nastavení materiálových vlastností pro plechy je zobrazeno na Obr. 3.3 *Nastavení materiálových vlastností*. Průběh B-H charakteristiky jsem pak znázornila Obr. 3.3 *B-H charakteristika použitých plechů M36*

Block Property

Name: plechy\_M-43 and M-36

B-H Curve: Nonlinear B-H Curve

Linear Material Properties

Relative  $\mu_x$ : 1      Relative  $\mu_y$ : 1

$\phi_{hx}$ , deg: 0       $\phi_{hy}$ , deg: 0

Nonlinear Material Properties

Edit B-H Curve       $\phi_{hmax}$ , deg: 0

Coercivity

$H_c$ , A/m: 0

Electrical Conductivity

$\sigma$ , MS/m: 6.25

Source Current Density

J, MA/m<sup>2</sup>: 0

Special Attributes: Lamination & Wire Type

Laminated in-plane

Lam thickness, mm: 0.5      Lam fill factor: 0.97

Number of strands: 0      Strand dia, mm: 0

OK      Cancel

Obr. 3.2 *Nastavení materiálových vlastností*

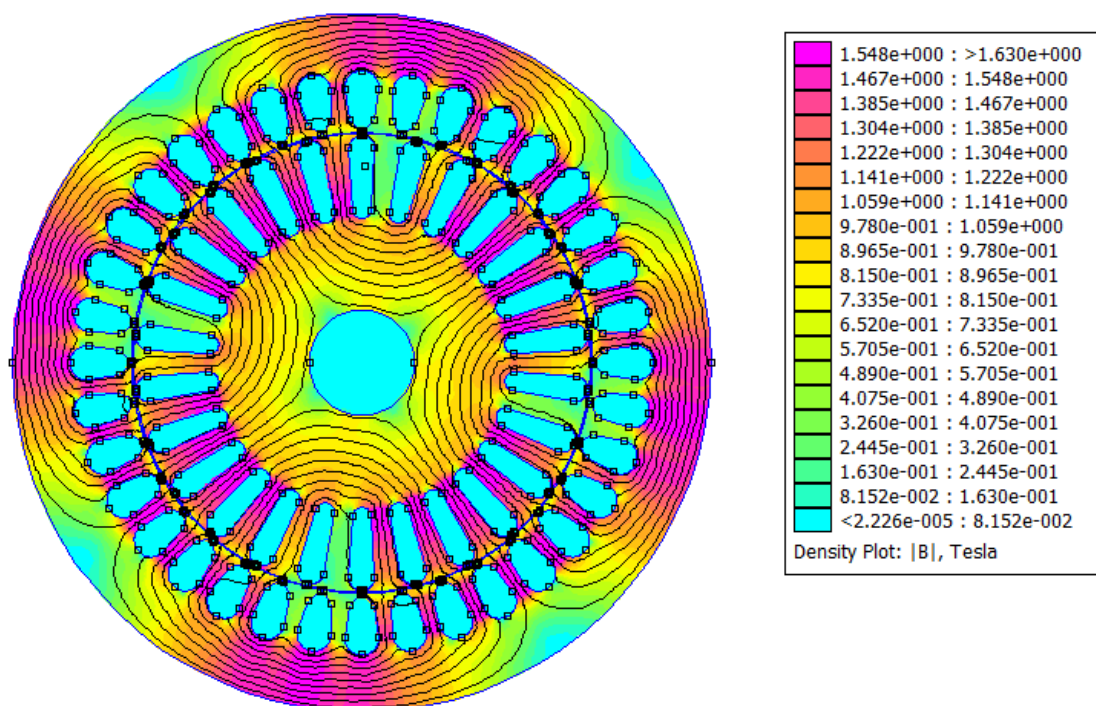


## Získání jednotlivých hodnot pro výpočet

Po správném nastavení všech parametrů jsem spustila vykreslení sítě modelu, kde jsem zjemnila síť v důležitých částech, tedy především ve vzduchové mezeře. Zjemněné zasíťování je možné vidět na Obr. 3.4 *Zasíťovaný model s nadefinovanými vlastnostmi*.

Bylo potřeba ovšem myslet na to, že čím jemnější síť, tím delší bude doba výpočtu. Tento krok byl důležitý, protože jsem musela provést opakované simulace pro všechny skluzy a jim odpovídající hodnoty proudů. Při zadávání hodnot proudů je třeba dbát na to, aby hodnoty byly, co možná nejpřesnější z toho důvodu, že i malé odchylky způsobují velké rozdíly od původních výsledků.

Výslednou velikost momentu odpovídající jednotlivým skluzům jsem získala změřením na integrační cestě, uprostřed vzduchové mezery, kam jsem pro tyto účely dokreslila kružnici.



Obr. 3.5 Rozložení magnetické indukce motoru, pro stav naprázdno  $s=0$

## Stanovení parametrů náhradního schéma

Pro výpočet parametrů náhradního schématu jsem čerpala z literatury [5]

### 3.1 Stanovení magnetizační reaktance $X_\mu$

Magnetizační reaktanci jsem určila ze stavu naprázdno, tedy pro  $s = 0$ . Energii magnetického pole jsem získala pomocí integrálu přes plochu magnetického obvodu (Magnetic field energy)

Energie magnetického pole  $W_m = 6,3681 J$

Energie magnetického pole přepočtená na jednu fázi

$$W_{mf} = \frac{W_m}{m} = \frac{6,3681}{3} = 2,21227 J \quad (159)$$

Vztah pro magnetickou indukčnost

$$L = \frac{2W_{mf}}{I_\mu^2} = \frac{2 \cdot 2,2127}{10,20^2} = 0,0408 H \quad (160)$$

Výsledná magnetizační reaktance

$$X_\mu = \omega_1 \cdot L = 2\pi \cdot f \cdot L = 2\pi \cdot 50 \cdot 0,0408 = 12,819 \Omega \quad (161)$$

### 3.2 Stanovení odporu respektujícího ztráty v železe $R_{Fe}$

Nejprve bylo nutné stanovit ztráty v železe, to jsem provedla pomocí integrálu přes plochu železa. (Hysteresis, Total losses). Následně bylo nutné určit činnou složku proudu naprázdno  $I_{0\check{c}}$ .

Ztráty v železe  $\Delta P_{Fe} = 16,9 W$

$$R_{Fe} = \frac{\Delta P_{Fe}}{m \cdot I_{0\check{c}}^2} = \frac{16,9}{3 \cdot 1,2869^2} = 3,4 \Omega \quad (162)$$

### 3.3 Stanovení statorového odporu $R_1$

Pro stanovení odporu drážky, bylo třeba zjistit ztráty v drážce. (Resistive losses)

Toto měření jsem prováděla pro stav nakrátko, kdy skluz  $s = 1$ .

$$\Delta P_j = 57,0846 \text{ W}$$

Odpor statorové drážky

$$R_d = \frac{\Delta P_j}{I_{ef}^2} = \frac{57,0846}{20,59^2} = 0,1346 \Omega \quad (163)$$

Výsledný statorový odpor

$$R_1 = R_d \cdot \frac{Q_1}{m} = 0,1346 \cdot \frac{36}{3} = 1,615 \Omega \quad (164)$$

### 3.4 Stanovení rozptylové reaktance $X_{1\sigma}$

V prvním kroku bylo třeba odečíst magnetickou energii statorové drážky pomocí integrálu přes plochu drážky (Magnetic field energy)

Energie magnetického pole v drážce  $W_m = 0,46937 \text{ J}$

Energie magnetického pole v drážce přepočtená na jednu fázi

Vztah pro magnetickou indukčnost

$$L_d = \frac{2W_m}{I_{ef}^2} = \frac{2 \cdot 0,46937}{20,59^2} = 2,214 \cdot 10^{-3} \text{ H} \quad (165)$$

Výsledná magnetizační reaktance

$$X_{1\sigma} = \omega_s \cdot L_d = 148,7 \cdot 2,214 \cdot 10^{-3} = 0,6955 \Omega \quad (166)$$

### 3.5 Stanovení rozptylové reaktance $X'_{2\sigma}$

Pro stanovení rozptylové reaktance bylo třeba stanovit magnetickou energii rotorové tyče

Energie magnetického pole v tyči  $W_{mt} = 0,577207 \text{ J}$

$$L_t = \frac{2W_m}{I_t^2} = \frac{2 \cdot 0,1924}{366,42^2} = 2,866 \cdot 10^{-6} H \quad (167)$$

Reaktance rotorové tyče

$$X_t = \omega_s \cdot L_t = 148,7 \cdot 2,866 \cdot 10^{-6} = 4,26 \cdot 10^{-4} \Omega \quad (168)$$

Výsledná rozptylová reaktance

$$X'_{2\sigma} = p_z \cdot \frac{X_t}{\kappa} = 3872 \cdot \frac{4,26 \cdot 10^{-4}}{2} = 0,825 \Omega \quad (169)$$

Kde  $\kappa$  je největší společný dělitel počtu drážek a pólových dvojic a  $p_z$  je impedanční převod motoru

### 3.6 Stanovení rotorového odporu $R'_2$

Ztráty v rotorové tyči  $\Delta P_t = 184,968 W$

Odpor tyče přepočítaný na jednu fázi

$$R_t = \frac{\Delta P_t}{I_{ef}^2} = \frac{2 \cdot 184,968}{366,42^2} = 1,377 \cdot 10^{-4} H \quad (170)$$

Rotorový odpor

$$R_{2t} = \frac{R_t}{\kappa} = \frac{1,377 \cdot 10^{-4}}{2} = 6,88 \cdot 10^{-4} \Omega \quad (171)$$

Výsledný odpor

$$R'_2 = p_z \cdot R_{2t} = 3872 \cdot 6,88 \cdot 10^{-4} = 2,66 \Omega \quad (172)$$

## Závěr

Cílem této diplomové práce bylo vytvořit elektromagnetický návrh čtyřpólového asynchronního motoru s klecí nakrátko o výkonu 10kW. Nejprve byly určeny hlavní rozměry stroje, stator o vnějším průměru  $D_{1e} = 225$  mm a vnitřním průměru vrtání  $D_{1i} = 148,5$  mm a 36 drážkami, protože je stroj menších rozměrů pro výkon  $P = 10$  kW postačilo jednovrstvé vsypávané vinutí. Ideální délka stroje  $l_{Fe} = 127$  mm a vzduchová mezera  $\delta = 5$  mm. Vnější průměr rotoru  $D_{2e} = 148,5$  mm, vnitřní průměr rotoru  $D_{2i} = 33,93$  mm. Účinnost motoru jsem stanovila z vypočtených ztrát, kdy  $\eta = 86,2$  %, hodnota se od původní odhadované hodnoty 88% liší jen nepatrně. Indukce ve vzduchové mezeře  $B_{\delta} = 0,866$  T se od předběžné hodnoty  $B_{\delta} = 0,88$  T, také téměř neliší. Při výpočtu byl použit především zdroj literatury [1], pro tepelný výpočet a zatížení stroje, pak doplněn literaturou [2] a [3].

V následujícím kroku byly tyto hodnoty získané výpočtem ověřeny metodou konečných prvků v programu FEMM 4.2 pomocí simulací modelu, pro různé frekvence odpovídající daným skluzům. Z této simulace byly vyneseny hodnoty momentové charakteristiky. V následující tabulce Tab. 0.I, jsem srovnala momenty získané jednotlivými metodami.

Tab. 0.II Tabulka hodnot  $k$  výpočtu čel vsypávaného vinutí

skluz	[-]	0	0,0278	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
M (FEMM)	[Nm]	0,68	32,25	64,83	66,80	53,78	54,36	49,77	46,55	44,38	42,42	40,72	39,23
M (s)	[Nm]	1,47	37,01	92,92	97,17	82,72	69,19	58,67	50,63	44,41	39,48	35,50	32,23
rozdíl	[Nm]	0,79	4,76	28,09	30,37	28,94	14,83	8,89	4,08	0,03	2,94	5,22	6,99

Vzniklý rozdíl mezi jednotlivými metodami, je způsobený především nepřesností hodnot zadávaných proudů, protože odchylka několik desetin ampérů, již velice ovlivňuje výsledné hodnoty momentu v řádech desítek.

Dalším bodem bylo srovnání parametrů náhradního schématu získaných výpočtem a dopočtených pomocí simulací z FEMMu. Postup získání hodnot byl popsán v třetí kapitole. Při výpotu hodnot ze simulací jsem čerpala z literatury [5]. Získané hodnoty pro srovnání parametrů náhradního schéma jsou uvedeny v tabulce Tab. 0.II

Tab. 0.IITabulka hodnot k výpočtu čel vsypávaného vinutí

prvek	$X_{\mu}$	$R_{fe}$	$R_1$	$X_{1\sigma}$	$X_{2\sigma}'$	$R_2'$
analytický výpočet	13,588	0,382	1,087	1,087	0,865	0,31
FEMM	12,819	3,4	1,615	0,696	0,825	2,66
rozdíl	0,769	3,018	0,528	0,392	0,04	2,35

Odchyly mezi hodnotami ze simulace a analytické metody tvoří nepřesné zadání některých materiálových vlastností, nepřesných hodnot proudů, nepřesná nelineární B-H charakteristika plechů, kdy FEMM je na všechny tyto nepřesnosti způsobené při zadávání vstupních hodnot velmi citlivý a také zároveň analytickým výpočtem nemůžeme nikdy dosáhnout absolutně přesné hodnoty. Proto prvky náhradního schématu, nelze úplně přesně stanovit. Odstraněním tohoto problému by bylo vytvoření nějakého softwarového programu pro analytický výpočet, který by stanovil přesnější hodnoty proudů.

Navzdory mým rozdílným hodnotám, které vzešly ze simulace a analytického výpočtu, považuji tyto výsledky za dobré.



## Seznam literatury a informačních zdrojů

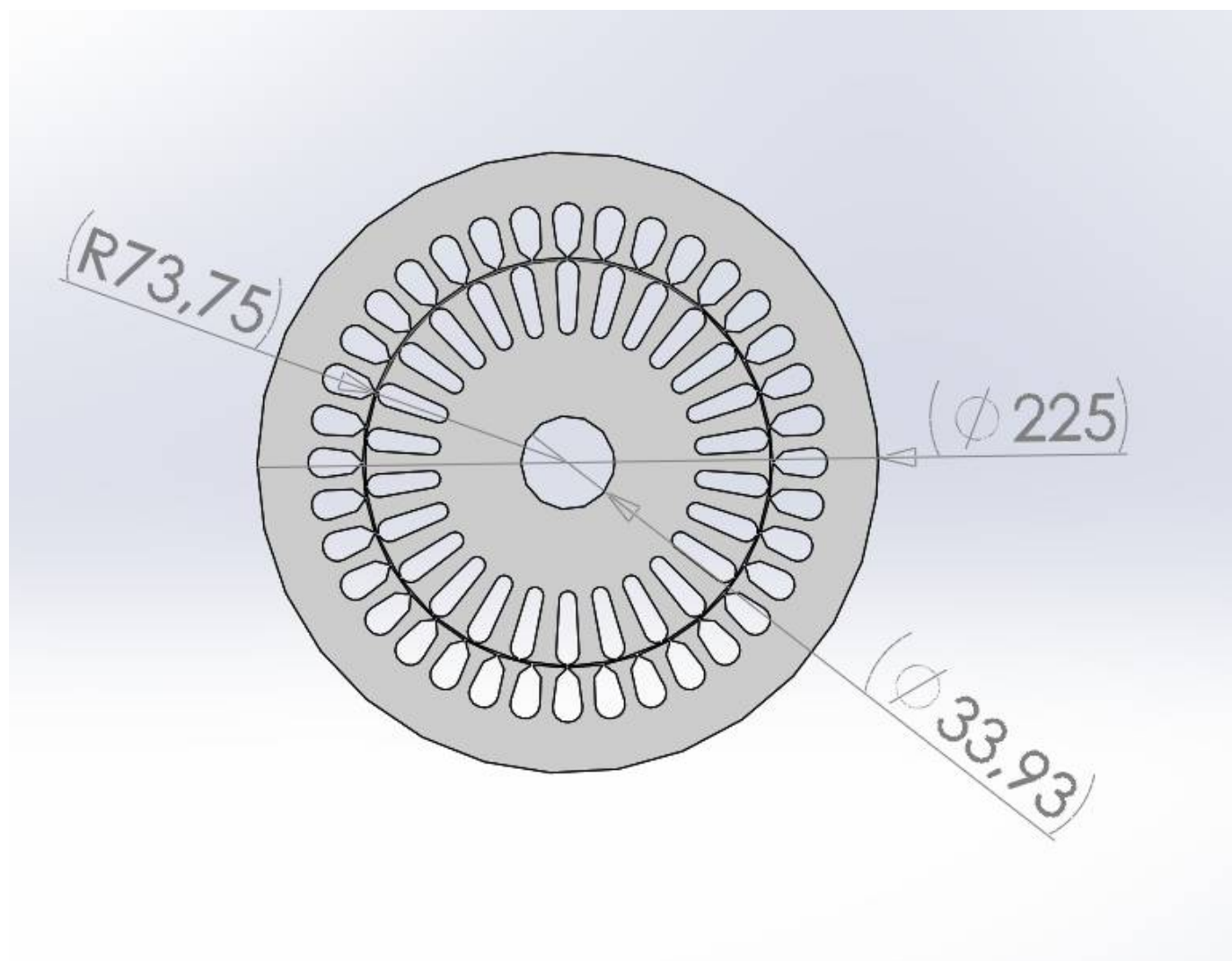
- [1] KOPYLOV, Igor Petrovič a kolektiv. *Stavba elektrických strojů*, 1. vydání Praha: SNTL, 1988. 688 s.
- [2] PECHÁNEK, Roman *Učební materiály z předmětu PEZ*. Dostupné z: <https://courseware.zcu.cz/>
- [3] ČERVENÝ, Josef *Učební materiály z předmětu SES1,2*. Dostupné z: <https://courseware.zcu.cz/>
- [4] BURSA, Jan. *Metoda konečných prvků [online]* dostupné z: [http://www.umt.fme.vutbr.cz/~jbursa/Stud\\_opory/MKP4.pdf](http://www.umt.fme.vutbr.cz/~jbursa/Stud_opory/MKP4.pdf)
- [5] HRUŠKA, Karel. *Speciální klece asynchronních strojů*. Dizertační práce. ZČU v Plzni, 2011
- [6] Vítězslav Stýskala, *Lekce z elektrotechniky [online]* Dostupné z: [http://fe1.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske\\_FS/prednasky/sylab\\_As-Motory%20nazorne%206\\_2.pdf](http://fe1.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske_FS/prednasky/sylab_As-Motory%20nazorne%206_2.pdf)
- [7] BAŠTA, Jan, CHLÁDEK, Jaroslav a MAYER, Imrich. *Teorie elektrických strojů*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1968.
- [8] PETROV, G. N. *Elektrické stroje 2 : Asynchronní stroje - synchronní stroje*. 1. vydání . Praha : Academia, 1982. 732 stran

## Zdroje obrázků

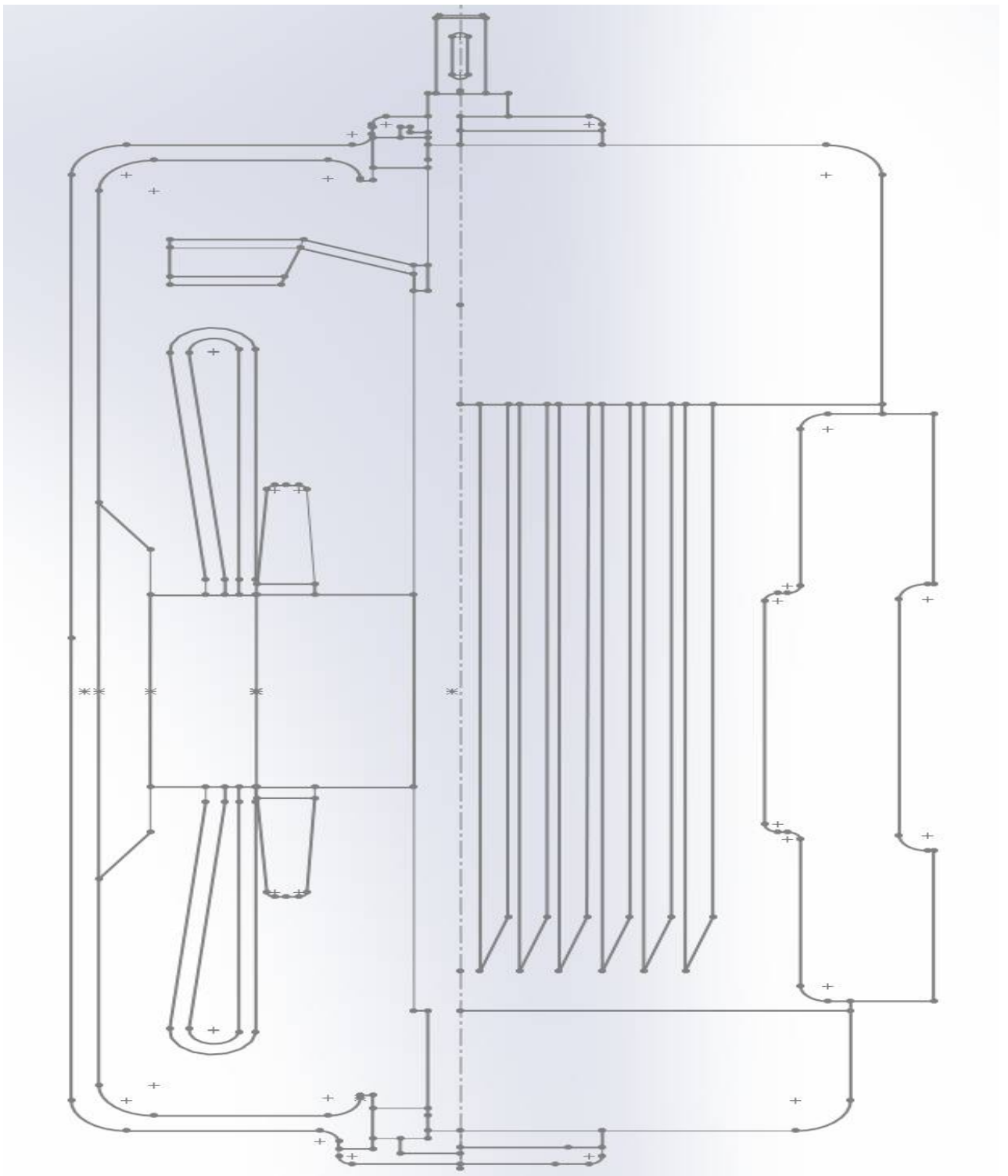
- (1) Obr. 1.1 převzat  
z: [http://fe1.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske\\_FS/prednasky/sylab\\_As-Motory%20nazorne%206\\_2.pdf](http://fe1.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske_FS/prednasky/sylab_As-Motory%20nazorne%206_2.pdf)
- (2) Obr. 1.2 převzat z:  
[http://fe1.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske\\_FS/prednasky/sylab\\_As-Motory%20nazorne%206\\_2.pdf](http://fe1.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske_FS/prednasky/sylab_As-Motory%20nazorne%206_2.pdf)

## Přílohy

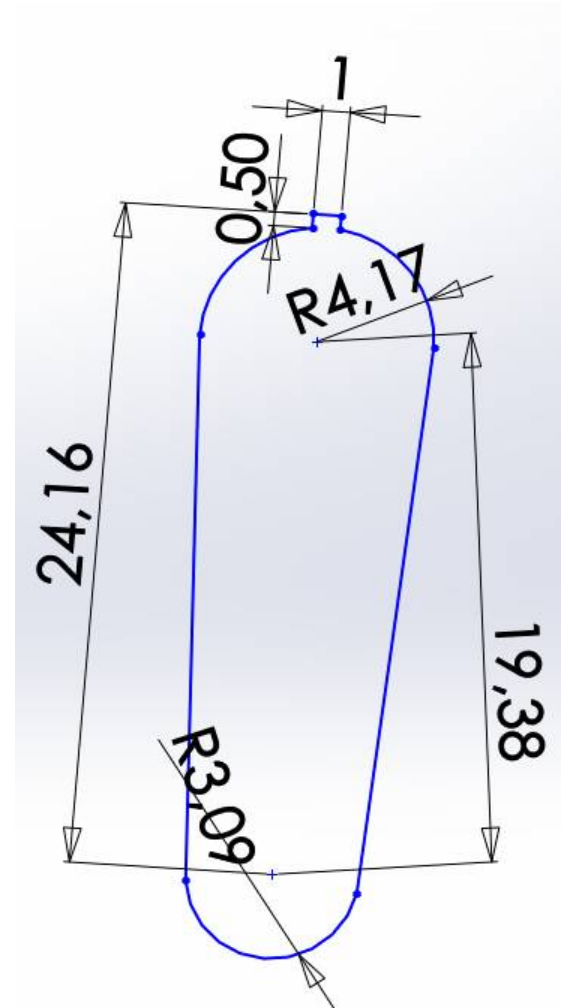
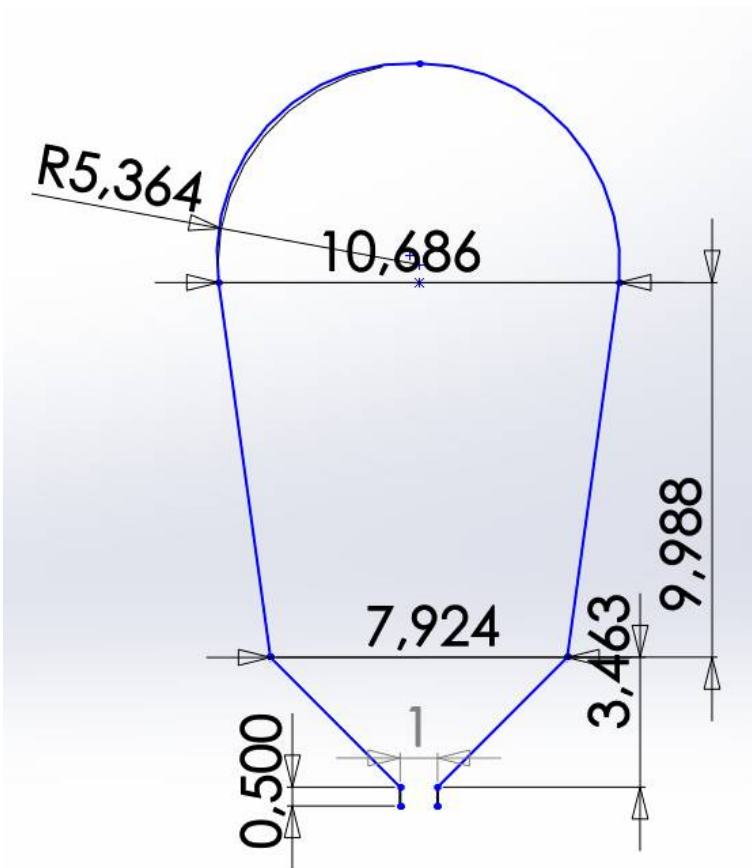
### Příloha A – Příčný řez



**Příloha B–Podélný řez**



Příloha C–Drážky



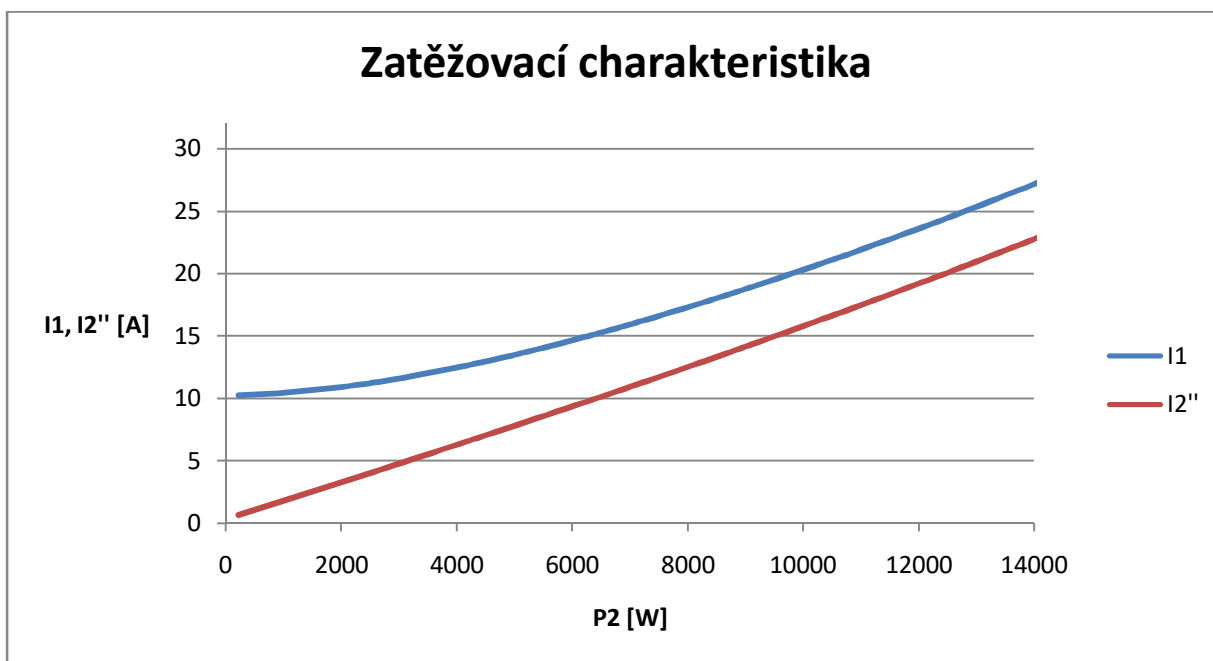
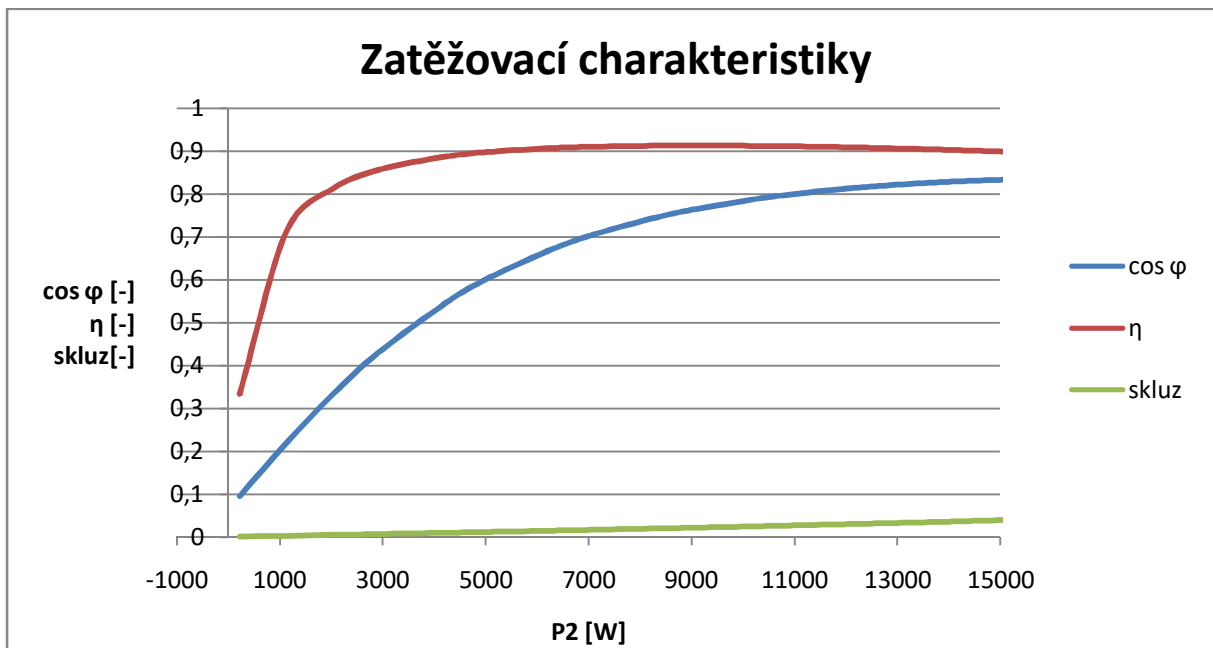
## Příloha D–Tabulka hodnot pro výpočet zatěžovací charakteristik

vztah	jednotky	skluz																		
		0	0,02775	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1							
1	$aR2'/s$	[0]	0	12,3885	3,437808	1,718904	1,145936	0,859452	0,687562	0,572968	0,491115	0,429726	0,381979	0,344						
2	$bR2'/s$	[0]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0						
3	R	[0]	344,0396425	12,99148	3,696667	1,977763	1,404795	1,118311	0,946421	0,831827	0,749974	0,688585	0,640838	0,603						
4	X	[0]	2,241547824	2,241548	2,241548	2,241548	2,241548	2,241548	2,241548	2,241548	2,241548	2,241548	2,241548	2,242						
5	Z	[0]	344,0469446	13,18344	4,32318	2,989328	2,645371	2,505026	2,433156	2,390915	2,363683	2,344928	2,331354	2,321						
6	$I2''$	[A]	0,668513421	17,44613	53,20158	76,94037	86,94434	91,81541	94,52743	96,1975	97,30576	98,08405	98,65513	99,09						
7	$\cos \varphi2'$	[-]	0,999978776	0,985439	0,855081	0,661608	0,531039	0,446427	0,388968	0,347912	0,317291	0,293649	0,274878	0,26						
8	$\sin \varphi2'$	[-]	0,006515238	0,170028	0,518495	0,74985	0,847347	0,89482	0,921251	0,937527	0,948328	0,955913	0,961479	0,966						
9	$I1\dot{c}$	[A]	0,968444311	17,49205	45,79158	51,20429	46,47078	41,28881	37,06812	33,76817	31,17415	29,1022	27,41806	26,03						
10	$I1j$	[A]	10,18789927	13,14987	37,76831	67,87728	83,8556	92,34182	97,26705	100,3713	102,4614	103,9434	105,0384	105,9						
11	$I1$	[A]	10,23382509	21,88357	59,35751	85,02473	95,87124	101,1522	104,0909	105,8994	107,0988	107,9406	108,5579	109						
12	$I2'$	[A]	0,698113625	18,2186	55,55722	80,3471	90,79403	95,88078	98,71289	100,4569	101,6142	102,427	103,0234	103,5						
13	P1	[W]	668,2265748	12069,51	31596,19	35330,96	32064,84	28489,28	25577	23300,04	21510,16	20080,52	18918,46	17958						
14	$\Delta P1$	[W]	77,88332896	356,127	2620,112	5375,997	6835,106	7608,86	8057,391	8339,805	8529,782	8664,39	8763,777	8840						
15	$Pj2$	[W]	99,04826308	452,9051	3332,133	6836,934	8692,558	9676,582	10247	10606,16	10847,77	11018,95	11145,35	11242						
16	$\Delta Pds$	[W]	14,04128361	64,20475	472,3699	969,2177	1232,275	1371,772	1452,636	1503,551	1537,801	1562,069	1579,987	1594						
17	$\Delta P$	[W]	445,3122438	1077,413	6220,625	12481,31	15796,05	17553,82	18572,77	19214,35	19645,93	19951,72	20177,51	20350						
18	P2	[W]	222,9143311	10992,1	25375,57	22849,65	16268,79	10935,46	7004,23	4085,69	1864,234	128,7921	-1259,04	-2392						
19	$\eta$	[-]	0,33359094	0,910733	0,803121	0,646732	0,507372	0,383845	0,273849	0,175351	0,086668	0,006414	-0,06655	-0,13						
20	$\cos \varphi$	[-]	0,094631705	0,799323	0,771454	0,602228	0,484721	0,408185	0,356113	0,31887	0,291078	0,269613	0,252566	0,239						

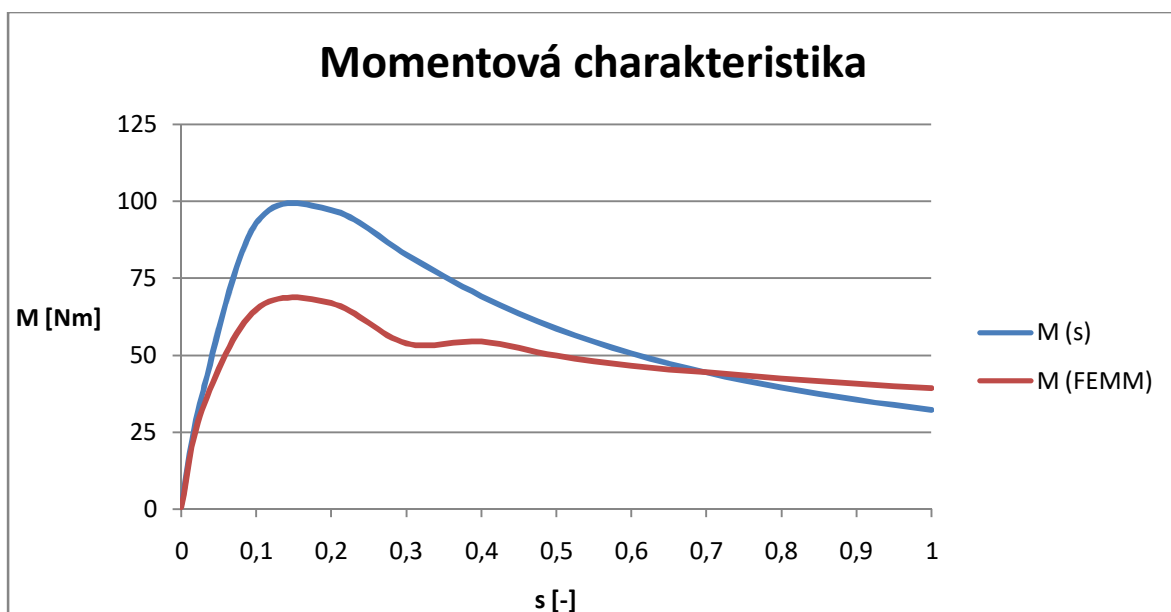
**Příloha E – Tabulka zatěžovacích proudů pro simulace v FEMMu**

skluz	0	0,02775	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	[-]
f pro jednotlivé skluzy	0	<b>1,3875</b>	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	[Hz]
IA {Re}	14,47281	30,94804194	83,9442	120,2431	135,5824	143,0509	147,2068	149,7644	151,4606	152,651	153,524	154,187	[A]
IA {Im}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	[A]
Iu_A {Re}	15,51												[A]
Iu_A {Im}	0												[A]
IA' {Re}	-14,4728	-30,94804194	-83,9442	-120,243	-135,582	-143,051	-147,207	-149,764	-151,461	-152,651	-153,524	-154,187	[A]
IA' {Im}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	[A]
Iu_A' {Re}	-15,51												[A]
Iu_A' {Im}	0												[A]
IB {Re}	-7,23641	-15,47402097	-41,9721	-60,1216	-67,7912	-71,5254	-73,6034	-74,8822	-75,7303	-76,3255	-76,762	-77,0935	[A]
IB {Im}	12,53382	26,80179052	72,69781	104,1336	117,4178	123,8857	127,4848	129,6998	131,1687	132,1997	132,9557	133,5299	[A]
Iu_B {Re}	-7,755												[A]
Iu_B {Im}	13,43205												[A]
IB' {Re}	7,236407	15,47402097	41,9721	60,12156	67,79121	71,52544	73,60341	74,88222	75,7303	76,32551	76,76202	77,0935	[A]
IB' {Im}	-12,5338	-26,80179052	-72,6978	-104,134	-117,418	-123,886	-127,485	-129,7	-131,169	-132,2	-132,956	-133,53	[A]
Iu_B' {Re}	7,755												[A]
Iu_B' {Im}	-13,4321												[A]
IC {Re}	-7,23641	-15,47402097	-41,9721	-60,1216	-67,7912	-71,5254	-73,6034	-74,8822	-75,7303	-76,3255	-76,762	-77,0935	[A]
IC {Im}	-12,5338	-26,80179052	-72,6978	-104,134	-117,418	-123,886	-127,485	-129,7	-131,169	-132,2	-132,956	-133,53	[A]
Iu_C {Re}	-7,23641												[A]
Iu_C {Im}	-12,5338												[A]
IC' {Re}	7,236407	15,47402097	41,9721	60,12156	67,79121	71,52544	73,60341	74,88222	75,7303	76,32551	76,76202	77,0935	[A]
IC' {Im}	12,53382	26,80179052	72,69781	104,1336	117,4178	123,8857	127,4848	129,6998	131,1687	132,1997	132,9557	133,5299	[A]
Iu_C' {Re}	7,236407												[A]
Iu_C' {Im}	12,53382												[A]

**Příloha F– Zatěžovací charakteristiky**



## Příloha D– Momentové charakteristiky



Tabulka hodnot:

skluz	[-]	0	0,0278	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
M (FEMM)	[Nm]	0,68	32,25	64,83	66,80	53,78	54,36	49,77	46,55	44,38	42,42	40,72	39,23
M (s)	[Nm]	1,47	37,01	92,92	97,17	82,72	69,19	58,67	50,63	44,41	39,48	35,50	32,23
rozdíl	[Nm]	0,79	4,76	28,09	30,37	28,94	14,83	8,89	4,08	0,03	2,94	5,22	6,99