



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

ASYNCHRONNÍ MOTOR S VÝKONEM 7,5 KW.

7,5 KW INDUCTION MACHINE.

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martin Hemzal

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Mach, Ph.D.

BRNO 2019



Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Martin Hemzal

ID: 195312

Ročník: 3

Akademický rok: 2018/19

NÁZEV TÉMATU:

Asynchronní motor s výkonem 7,5 kW.

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Pomocí vhodného softwaru (Excel, Matlab, ...) vytvořte jednoduchý program pro analytický návrh asynchronního motoru s výkonem 7,5 kW.
2. Návrh ověřte pomocí programu RMXprt.
3. Analyzujte vliv konstrukčních úprav na rozměry stroje.
4. Navržený stroj upravte tak, aby došlo ke zmenšení jeho rozměrů.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] KOPYLOV, Igor Petrovič. Stavba elektrických strojů: celostátní vysokoškolská učebnice pro elektrotechnické fakulty vysokých škol technických. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988, 685 s.
- [2] BOLDEA, I. a NASAR, S. A. The induction machine handbook. Boca Raton: CRC Press, 2002. ISBN 08-49-0004-5.
- [3] PYRHONEN, J.; JOKINEN t.; HRABOVCOVÁ V. Design of rotating electrical machines. John Wiley and Sons, 2007. ISBN 978-0-470-69516-6.

Termín zadání: 4.2.2019

Termín odevzdání: 22.5.2019

Vedoucí práce: Ing. Martin Mach, Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Bakalářská práce Návrh asynchronního motoru s výkonem 7,5 kW se zabývá analytickým návrhem asynchronního motoru. Práce je členěna do šesti částí. První částí je úvod do problematiky úkolu. Ve druhé části je krátce rozebrána teorie asynchronního motoru. Následující část se zabývá analytickým výpočtem. V další části je provedeno ověření návrhu v programu RMXprt. Na závěr jsou srovnány výsledky výpočtu s programem Rmxprt.

Klíčová slova

Asynchronní motor, analytický výpočet, RMXprt, návrh,

Abstract

Bachelor thesis Induction motor 7,5 kW deals with analytic design of induction motor. The project is structured into 6 parts. First part is about introduction to a problem. The second part shortly analyses theory of induction motor. The next part deals with analytic calculation. In the next part the design is checked in the RMxpert module. In the conclusion both analytic calculation and RMxpert results are compared.

Keywords

Induction motor, analytic calculation, RMxpert, Design

Bibliografická citace:

HEMZAL, Martin. *Asynchronní motor s výkonem 7,5 kW*. [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117002>.
Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. Vedoucí práce Martin Mach.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Návrh asynchronního motoru s výkonem 7,5 kW jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: **23. května 2019**

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Martinu Machovi, PhD. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne: **23. května 2019**

.....

podpis autora

Obsah

1	Úvod.....	11
2	Asynchronní Stroj	12
2.1	Rozdělení asynchronních strojů	12
2.2	Konstrukce asynchronního stroje	12
2.3	Princip asynchronního stroje.....	13
3	Návrh asynchronního motoru.....	14
3.1	Zadané hodnoty	14
3.2	Výpočet základních rozměrů.....	14
3.3	Výpočet vinutí statoru	16
3.4	Výpočet rozměrů drážek a zubů statoru.....	19
3.5	Volba vzduchové mezery	21
3.6	Výpočet rotoru	21
3.7	Výpočet magnetického obvodu.....	24
3.8	Odpory a reaktance asynchronního motoru	27
3.9	Ztráty a účinnost asynchronního motoru.....	32
3.10	Rozběhové charakteristiky asynchronního motoru	34
4	Simulace v rmxprt a porovnání výsledků.....	42
5	Konstrukční úpravy stroje	46
5.1	Vinutí statoru.....	46
5.2	Vzduchová mezera	46
5.3	Rotor.....	47
5.4	Plechý	48
5.5	Porovnání výsledku z RMxpert	50
6	Závěr	54

Seznam obrázků

Obr. 3-1 přibližné hodnoty účinnosti a účinníku [3]	15
Obr. 3-2 koeficient k_E [3]	15
Obr. 3-3 Hustota proudu a magnetická indukce [3].....	16
Obr. 3-4 Drážkové rozteče statoru asynchronního motoru s vsypávaným vinutím [3]	16
Obr. 3-5 Střední hodnota součinu AJ [3]	19
Obr. 3-6 Velikost vzduchové mezery [3].....	21
Obr. 3-7 činitel k_i v závislosti na $\cos \varphi$ [3]	22
Obr. 3-8 BH křivka plechů M350-50A [5]	25
Obr. 3-9 činitel k_γ [3]	30
Obr. 3-10 činitel Δ_z [3].....	30
Obr. 3-11 činitel β_{02} [3]	33
Obr. 3-12 křivky $\varphi(\xi)$ [3]	35
Obr. 3-13 činitel k_x [3].....	36
Obr. 3-14 činitel χ_δ [3].....	38
Obr. 4-1 uživatelské prostředí RMxpert	42
Obr. 4-2 Momentová charakteristika.....	44
Obr. 4-3 Statorový proud.....	44
Obr. 4-4 Magnetická indukce v motoru.....	45
Obr. 5-1 Magnetická indukce v motoru s měděnou klecí.....	47
Obr. 5-2 Magnetická indukce ve stroji se dvěma měděnými tyčema.....	48
Obr. 5-3 BH křivka elektrotechnických plechů [5][6].....	49
Obr. 5-4 Ztrátové křivky elektrotechnických plechů [5][6].....	49
Obr. 5-5 Rotorová drážka.....	50
Obr. 5-6 Momentová charakteristika.....	50
Obr. 5-7 Statorový proud ve fázi.....	51
Obr. 5-8 Účinník.....	51
Obr. 5-9 Výkon.....	52
Obr. 5-10 Účinnost.....	52

Seznam tabulek

Tabulka 3-1 Koeficient K_D	14
Tabulka 4-1 Magnetické indukce	42
Tabulka 4-2 Jmenovité hodnoty	43
Tabulka 5-1 Jmenovité hodnoty	53
Tabulka 5-2 Jmenovité hodnoty vypočtené MKP	53

1 ÚVOD

Navrhovaný motor by měl sloužit k pohonu axiálního čerpadla. Celé čerpadlo včetně motoru by mělo být umístěno uvnitř trubky s vnitřním průměrem 200 mm. Výhodou tohoto provedení je to, že maximální vnější průměr je dán pouze průměrem potrubí. Toho lze s výhodou použít například u hlubinných vrtů, kde může být čerpadlo umístěno přímo v potrubí a nutný průměr vrtů je přitom ovlivněn pouze průměrem potrubí.

Součástí celého systému bude i oběžné kolo čerpadla a usměrňovací lopatky, které kromě usměrňování kapaliny budou sloužit i k uchycení motoru v potrubí. Kdyby tyto součásti byly vyrobeny z kovu, značně by to zlepšilo chlazení motoru. Ale vzhledem k jejich pravděpodobně složitému tvaru (přesný tvar ještě není znám) budou vytištěny z plastu na 3D tiskárně. To ale bohužel podmínky motoru značně zhorší.

2 ASYNCHRONNÍ STROJ

Asynchronní stroj je stroj přeměňující elektrickou energii na mechanickou, nebo energii mechanickou na elektrickou. Jeho jednoduchost, spolehlivost a hospodárnost zapříčinila jeho velké využití. Variabilita jeho konstrukce umožňuje vyrábět motory s rozsahem otáček od desítek otáček až do 100000 min^{-1} . O výkonech desítek wattů až 20 MW. [4]

2.1 Rozdělení asynchronních strojů

Asynchronní stroje můžeme dělit dle jejich funkce na [4]:

- Asynchronní motor, přiváděná elektrická energie je měněna na mechanickou.
- Asynchronní generátor, přiváděná mechanická energie je měněna na elektrickou.
- Asynchronní brzda, využívá moment, který vzniká otáčením rotoru opačným směrem, jímž by se otáčel působením elektromagnetických sil.

Dále jej můžeme dělit z hlediska konstrukce [4]:

- Asynchronní motor s kroužkovou kotvou
- Asynchronní motor s kotvou nakrátko

2.2 Konstrukce asynchronního stroje

Asynchronní stroj se skládá z několika částí, statorový svazek, statorové vinutí, rotorový svazek, rotorové vinutí, ložiska a ložiskové štíty.

Statorový svazek je tvořen z dynamových plechů, aby byly zmenšeny ztráty vířivými proudy. Na vnitřním obvodu jsou vyraženy, popřípadě vypáleny laserem statorové drážky, ve kterých je uloženo třífázové vinutí. Tento svazek je zalisován do kostry. Rotorový svazek je složen z dynamových plechů a na jeho vnějším obvodě jsou statorové drážky, ve kterém je vinutí. U asynchronního stroje s kotvou nakrátko je vinutí tvořeno tyčemi z hliníku nebo mědi, které jsou zkratované kruhy. U stroje s kroužkovou kotvou je vinutí tvořeno měděnými cívkami připojenými na kroužky. [1]

2.3 Princip asynchronního stroje

Při připojení statorového vinutí na trojfázovou symetrickou soustavu dochází k vytvoření točivého magnetického pole. Toto pole protíná vodiče ve statoru a v nich dochází k indukovaní napětí, když je vinutí uzavřeno teče jím proud a ten vytváří magnetické pole rotoru. Vzájemným působením magnetických polí vzniká síla, působící ve směru otáčení magnetického pole statoru. [1]

Synchronní otáčky magnetického pole statoru se dají spočítat jako

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} \quad (2.1)$$

f je frekvence napájecího napětí (Hz)

p je počet pólových dvojic stroje (-)

n_s jsou synchronní otáčky stroje (min^{-1})

Jak vychází z principu tohoto stroje napětí na rotorových vodičích se bude indukovat jen tehdy, když se bude magnetické pole statoru pohybovat vůči vodičům rotoru relativně. Rozdíl otáček n_s a n vůči otáčkám synchronním je definován jako skluz. [1]

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (2.2)$$

s je skluz stroje (-)

n jsou otáčky stroje (min^{-1})

3 NÁVRH ASYNCHRONNÍHO MOTORU

Jestliže nebude uvedeno jinak, celý analytický výpočet proběhl dle literatury [3].

3.1 Zadané hodnoty

Podle zadání je požadován motor o výkonu 7,5 kW. Vzhledem k umístění motoru v potrubí je maximální možná šířka statoru 156 mm. Pro pohon čerpadla jsou požadované otáčky 1600 min^{-1} . Bylo zvoleno čtyřpólové provedení, protože napájecí frekvence je blízká frekvenci sítě.

3.2 Výpočet základních rozměrů

Nejdříve byl určen vnitřní průměr statoru D na základě empirických závislostí.

$$D = K_D D_e = 0,62 \cdot 156 = 96,72 \text{ mm} \quad (3.1)$$

K_D je poměr D/D_e určený z tabulky 3.1

Tabulka 3-1 Koefficient K_D

$2p$	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

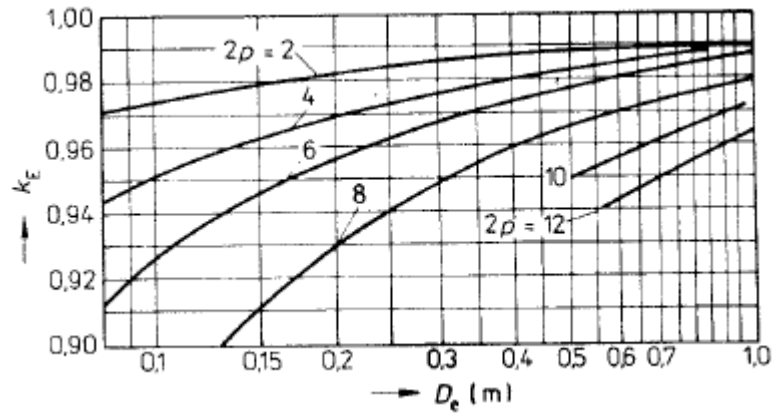
Krok pólové rozteče t_p .

$$t_p = \frac{\pi D}{2p} = \frac{\pi \cdot 106,08}{4} = 75,9637 \text{ mm} \quad (3.2)$$

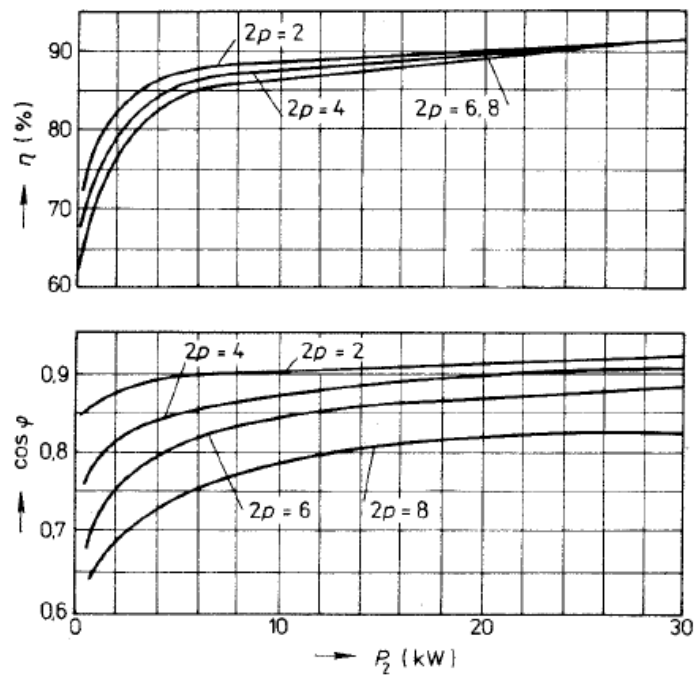
Následně se může určit vnitřní výkon stroje P_i .

$$P_i = m I U_i = P \frac{k_E}{\eta \cos \varphi} = 7500 \frac{0,965}{0,87 \cdot 0,86} = 9673,215 \text{ VA} \quad (3.3)$$

Koeficient k_E , což je poměr indukovaného napětí vinutí statoru ke jmenovitému napětí, se odečetl z obr. 3-1 a hodnoty účinnosti a účiníku z obr. 3-2.



Obr. 3-2 koeficient k_E [3]



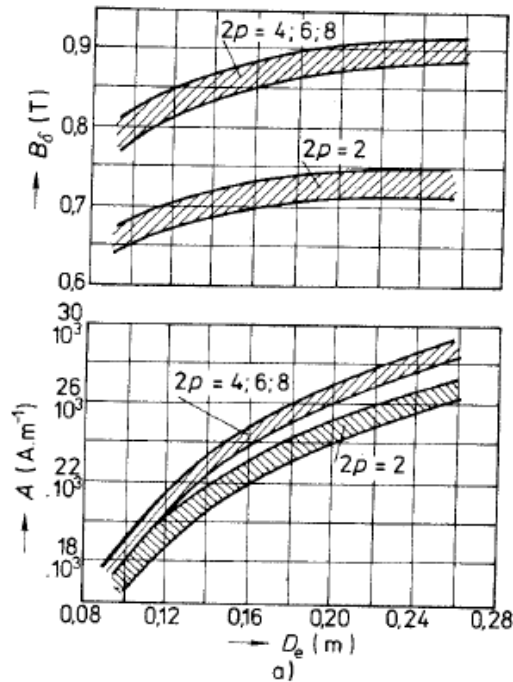
Obr. 3-1 přibližné hodnoty účinnosti a účiníku [3]

Ideální délka vzduchové mezery l_i se vypočítá ze strojové konstanty.

$$l_i = \frac{P_i}{D^2 \omega_s k_B k_{v1} A B \delta} = \quad (3.4)$$

$$= \frac{9673,215}{0,09672^2 \cdot 167,5516 \cdot 1,11 \cdot 0,96 \cdot 0,86 \cdot 24 \cdot 10^3} = 0,28 \text{ m}$$

Kde hodnoty k_{vl} pro jednovrstvá vinutí je 0,95 až 0,96. Při předpokladu sinusového pole a vlivu zploštění můžeme použít činitel pólového krytí α_δ 0,64 a činitel tvaru k_B 1,11. Během výpočtu byla délka upravena na 0,29m. Proudovou hustotu A a magnetickou indukci B odečteme z obr. 3-3.

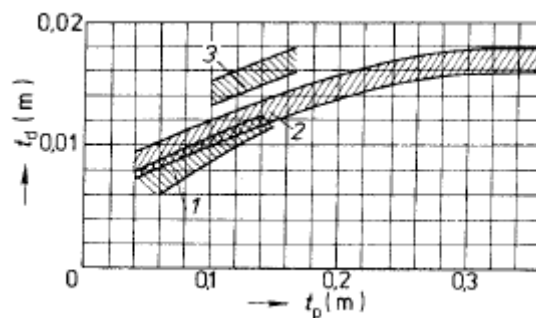


Obr. 3-3 Hustota proudu a magnetická indukce [3]

U strojů s osovou délkou do 300 mm je možné uvažovat $l_i = l_{Fe}$. Tím výpočet hlavních rozměrů končí.

3.3 Výpočet vinutí statoru

Z obrázku 3-4 byla odečtena drážková rozteč $t_{dl \min}$ a $t_{dl \max}$.



Obr. 3-4 Drážkové rozteče statoru asynchronního motoru s vsypávaným vinutím [3]

Možné počty drážek Q_{1min} a Q_{1max}

$$Q_{1min} = \frac{\pi D}{t_{d1max}} = \frac{\pi \cdot 0,09672}{0,0114} = 26,65 \quad (3.5)$$

$$Q_{1max} = \frac{\pi D}{t_{d1min}} = \frac{\pi \cdot 0,09672}{0,0083} = 36,6 \quad (3.6)$$

Výsledný počet statorových drážek Q_1 musí být dělitelný počtem fází a číslo $q = Q_1/2pm$ musí být pro většinu asynchronních strojů celé. Těmto podmínkám odpovídá $Q_1 = 36$.

Konečná hodnota drážkové rozteče je.

$$t_{d1} = \frac{\pi \cdot D}{2pmq} = \frac{\pi \cdot 0,09672}{4 \cdot 3 \cdot 3} = 8,44 \text{ mm} \quad (3.7)$$

Jmenovitý proud statorovým vinutím.

$$I_{1N} = \frac{P}{mU_N \eta \cos \varphi} = \frac{7500}{3 \cdot 230 \cdot 0,86 \cdot 0,87} = 14,528 \text{ A} \quad (3.8)$$

Při určení počtu efektivních vodičů v drážce bylo nejdříve předpokládáno, že počet paralelních vinutí je $a = 1$.

$$V'_d = \frac{\pi D A}{I_{1N} Q_1} = \frac{\pi \cdot 0,09672 \cdot 24 \cdot 10^3}{14,52 \cdot 36} = 13,95 \quad (3.9)$$

Pomocí paralelních větví a byl upraven počet efektivních vodičů v drážce, tak aby bylo číslo V_d celé, nebo aby vyžadovalo co nejmenší úpravu.

$$V_d = aV'_d = 1 \cdot 13,95 = 13,95 = 14 \quad (3.10)$$

Konečný počet závitů ve fázi vinutí.

$$N_1 = \frac{V_d Q_1}{2am} = \frac{14 \cdot 36}{2 \cdot 1 \cdot 3} = 84 \quad (3.11)$$

Lineární hustota proudu by se měla jen nepatrně lišit od hodnoty zvolené.

$$A = \frac{2mN_1 I_{1N}}{\pi D} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 84 \cdot 14,528}{\pi \cdot 0,09672} = 24097 \text{ Am}^{-1} \quad (3.12)$$

Činitel vinutí k_{v1}

$$k_{v1} = \frac{0,5}{q \sin \frac{30}{q}} = \frac{0,5}{3 \cdot \sin 10} = 0,96 \quad (3.13)$$

Hodnota magnetického toku ϕ

$$\phi = \frac{k_E U_{1N}}{4k_B N_1 f_1 k_{V1}} = \frac{0,965 \cdot 230}{4,44 \cdot 0,96 \cdot 55 \cdot 84} = 11,27 \cdot 10^{-3} \text{ Wb} \quad (3.14)$$

Magnetická indukce ve vzduchové mezeře.

$$B_\delta = \frac{\phi}{\alpha_\delta t_p l_i} = \frac{p\phi}{D l_i} = \frac{2 \cdot 0,01127}{0,09672 \cdot 0,29} = 0,804 \text{ T} \quad (3.15)$$

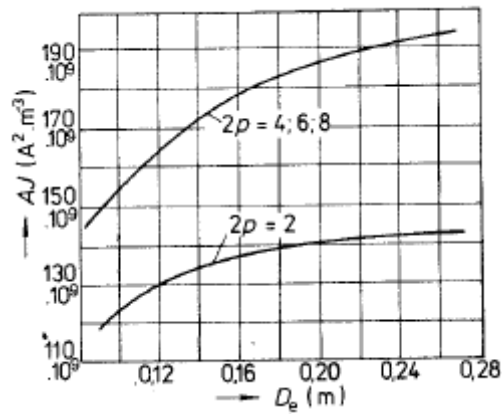
Tato hodnota přesahuje doporučený rozsah o 5,4 %, což znamená že můžeme pokračovat ve výpočtu.

Průřez efektivního vodiče S_{ef1}

$$S_{ef1} = \frac{I_{1N}}{a J_1} = \frac{14,528}{1,7397 \cdot 10^6} = 1,96 \text{ mm}^2 \quad (3.16)$$

Kde J_1 je

$$J_1 = \frac{(AJ)}{A} = \frac{178 \cdot 10^9}{24097} = 7,386 \cdot 10^6 \text{ Am}^{-2} \quad (3.17)$$



Obr. 3-5 Střední hodnota součinu AJ [3]

Byl použit vodič o průměru 1,5 mm a průřezu 1,767 mm² izolovaný lakem s přírůstkem 0,095 mm. Skutečná hodnota hustoty proudu J ve vinutí.

$$J = \frac{I_{1N}}{aS_v n_p} = \frac{14,528}{1 \cdot 1,767 \cdot 10^{-6}} = 8,221 \cdot 10^6 \text{ Am}^{-2} \quad (3.18)$$

3.4 Výpočet rozměrů drážek a zubů statoru

Rozměry drážek se volí tak, aby magnetická indukce v zubech a jhu nepřesahovala maximální hodnoty. Dále se tak, aby odpovídali rozměrům vodičů i s izolacemi.

Rozměry zubů dle přípustné indukce B_{zav} 1,7 T

$$b_z = \frac{B_{\delta} t_{d1} l_i}{B_{zav} l_{FE} k_{FE}} = \frac{0,804 \cdot 8,44 \cdot 10^{-3} \cdot 0,29}{1,7 \cdot 0,29 \cdot 0,97} = 4,12 \text{ mm} \quad (3.19)$$

Rozměry statorového jha dle přípustné indukce B_{j1} 1,4 T

$$h_{j1} = \frac{\phi}{2B_{j1} l_{FE1} k_{FE}} = \frac{11,27 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 1,4 \cdot 0,29 \cdot 0,97} = 14,3 \text{ mm} \quad (3.20)$$

Dále byly určeny rozměry drážky v řezu, nejdříve výšku drážky h_d

$$h_d = \frac{D_e - D}{2} - h_{j1} = \frac{156 - 96,72}{2} - 14,3 = 15,34 \text{ mm} \quad (3.21)$$

Šířku drážky b_1 a b_2

$$b_1 = \frac{\pi \cdot (D + 2h_d) - Q_1 b_z}{Q_1 + \pi} = \frac{\pi(96,72 + 2 \cdot 14,3) - 4,13 \cdot 36}{36 + \pi} = 6,27 \text{ mm} \quad (3.22)$$

$$b_2 = \frac{\pi(D + 2h_0 - b_0) - Q_1 b_z}{Q_1 - \pi} = \frac{\pi(96,72 + 1,4 - 3,5) - 36 \cdot 4,12}{36 - \pi} = 4,53 \text{ mm} \quad (3.23)$$

Dále je nutné určit světlé rozměry drážek, které berou v potaz vůli plechů při skládání, aby mohl být určen činitel plnění drážky.

$$b'_1 = b_1 - \Delta b_d = 6,27 - 0,1 = 6,17 \text{ mm} \quad (3.24)$$

$$b'_2 = b_2 - \Delta b_d = 4,53 - 0,1 = 4,43 \text{ mm} \quad (3.25)$$

$$h'_1 = h_1 - \Delta h_d = 11 - 0,1 = 10,9 \text{ mm} \quad (3.26)$$

Plocha, kterou zaujímá drážková izolace

$$\begin{aligned} S_i &= b_i(2h_d + b_2 + \frac{b_1 \cdot \pi}{2}) = \\ &= 0,25 \cdot (2 \cdot 15,34 + 4,53 + \frac{6,27\pi}{2}) = 11,26 \text{ mm}^2 \end{aligned} \quad (3.27)$$

Plocha drážky zbývající pro vinutí

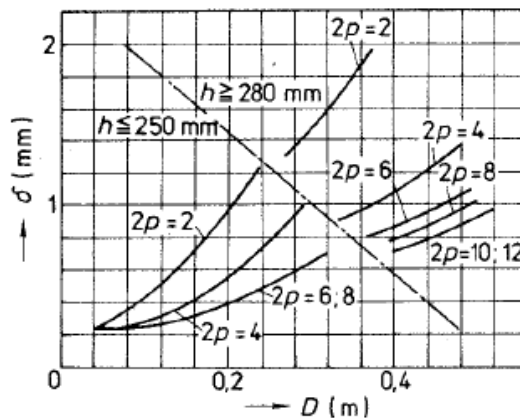
$$\begin{aligned} S'_d &= \frac{b'_1 + b'_2}{2} h_1 + \pi \cdot \frac{b_2'^2}{2} - S_i = \\ &= \frac{6,27 + 4,53}{2} 11 + \pi \cdot \frac{4,53^2}{2} - 11,26 = 80,4 \text{ mm}^2 \end{aligned} \quad (3.28)$$

Činitel plnění drážky

$$k_T = \frac{d_i^2 V_d n_p}{S'_d} = \frac{1,5^2 \cdot 14 \cdot 1}{80,4} = 0,4 \quad (3.29)$$

3.5 Volba vzduchové mezery

Vzduchová mezera se volí tak, aby byly výsledné ztráty co nejmenší. Čím je menší velikost vzduchové mezery, tím je menší její magnetický odpor a magnetické napětí. Proto zmenšení vzduchové mezery vede ke zmenšení magnetomotorického napětí a tím i magnetizačního proudu.



Obr. 3-6 Velikost vzduchové mezery [3]

Z obrázku 3-6 byla zvolena vzduchová mezera 0,25 mm.

3.6 Výpočet rotoru

Počet drážek Q_2 byl zvolen 26 a dále byl spočítán vnější průměr rotoru D_2

$$D_2 = D - 2\delta = 96,72 - 2 \cdot 0,25 = 96,22 \text{ mm} \quad (3.30)$$

Drážková rozteč statorového vinutí t_{d2}

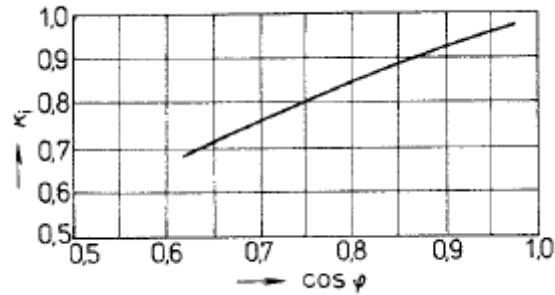
$$t_{d2} = \frac{\pi D_2}{Q_2} = \frac{\pi \cdot 96,22}{26} = 11,63 \text{ mm} \quad (3.31)$$

Činitel plnění proud p_i

$$p_i = \frac{2m_1 N_1 k_{v1}}{Q_2} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 84 \cdot 0,96}{26} = 18,61 \quad (3.32)$$

Následně může být spočítán proud ve vinutí rotoru, činitel k_i byl odečten z obr. 3-7

$$I_{2N} = k_i I_{1N} p_i = 0,89 \cdot 14,528 \cdot 18,61 = 240,63 \text{ A} \quad (3.33)$$



Obr. 3-7 činitel k_i v závislosti na $\cos \varphi$ [3]

Průřez tyče s_t , hustotu proudu J_2 volíme na horní hranici, jelikož motor je dobře chlazený.

$$s_t = \frac{I_{2N}}{J_2} = \frac{240,63}{3,5 \cdot 10^6} = 68,75 \text{ mm}^2 \quad (3.34)$$

Minimální šířka zubu rotoru s dovolenou maximální indukci B_{z2} 1,8 T.

$$b_{z2} = \frac{B_{\delta} t_{d2} l_2}{B_{z2} l_{FE} k_{FE}} = \frac{0,804 \cdot 0,01163 \cdot 0,29}{1,8 \cdot 0,29 \cdot 0,97} = 5,36 \text{ mm} \quad (3.35)$$

Rozměr drážky b_1

$$b_1 = \frac{\pi(D_2 - 2 \cdot h_0) - Q_2 B_{z2}}{\pi + Q_2} = \frac{\pi(96,22 - 2 \cdot 0,7) - 26 \cdot 5,36}{\pi + 26} = 5,44 \text{ mm} \quad (3.36)$$

Rozměr drážky b_2

$$b_2 = \sqrt{\frac{b_1^2 \left(\frac{Q_2 + \pi}{\pi} \right) - 4 s_B}{\frac{Q_2}{\pi} \cdot \frac{\pi}{2}}} = \sqrt{\frac{5,44^2 \left(\frac{26 + \pi}{\pi} \right) - 4 \cdot 68,75}{\frac{26}{\pi} \cdot \frac{\pi}{2}}} = 1,56 \text{ mm} \quad (3.37)$$

Hloubka drážky h_d

$$h_1 = (b_1 - b_2) \frac{Q_2}{2\pi} = (5.44 - 1.56) \frac{26}{2\pi} = 16,1 \text{ mm} \quad (3.38)$$

$$\begin{aligned} h_d &= h_1 + h_0 + \frac{b_1}{2} + \frac{b_2}{2} = \\ &= 16,1 + 0,7 + 0,78 + 2,72 = 20,3 \text{ mm} \end{aligned} \quad (3.39)$$

Proud v kruhu nakrátko.

$$I_{kn} = \frac{I_{2N}}{\Delta} = \frac{240,63}{0,4786} = 502,746 \text{ A} \quad (3.40)$$

Kde Δ

$$\Delta = 2 \sin \frac{\pi p}{Q_2} = 2 \sin \frac{2\pi}{26} = 0,4786 \quad (3.41)$$

Hustota proudu v kruhu se uvažuje jako 0,85 J₂

$$J_{kn} = 0,85 \cdot 3,5 = 2,975 \cdot 10^{-6} \text{ Am}^{-2} \quad (3.42)$$

Příčný průřez kruhu nakrátko

$$S_{kn} = \frac{I_{kn}}{J_{kn}} = \frac{502,746}{2,975 \cdot 10^{-6}} = 169 \text{ mm}^2 \quad (3.43)$$

Rozměry kruhu nakrátko

$$b_{kn} = h_d \cdot 1,25 = 20,3 \cdot 1,25 = 25,38 \text{ mm} \quad (3.44)$$

$$a_{kn} = \frac{S_{kn}}{b_{kn}} = \frac{169}{25,38} = 6,66 \text{ mm} \quad (3.45)$$

Rozměry vnitřního průměru rotoru D_i se určí pomocí činitele k_h , který je pro čtyřpólový stroj s osovou výškou mezi 71 a 250 mm 0,23.

$$D_i \approx D_e k_h \approx 156 \cdot 0,23 = 35,88 \text{ mm} \quad (3.46)$$

3.7 Výpočet magnetického obvodu

Pro navrhovaný motor byly zvoleny plechy m350-50A jehož BH křivka je na obr.3-8. Nejdříve byly určeny skutečné magnetické indukce v zubech a jhách statoru a rotoru.

Magnetická indukce B_{z1} v zubu statoru

$$B_{z1} = \frac{B_\delta t_{d1} l_i}{b_{z1} l_{FE} k_{FE}} = \frac{0,803 \cdot 0,00841 \cdot 0,29}{0,00412 \cdot 0,29 \cdot 0,97} = 1,69 \text{ T} \quad (3.47)$$

Magnetická indukce B_{z2} v zubech rotoru

$$B_{z2} = \frac{B_\delta t_{d2} l_i}{b_{z2r} l_{FE} k_{FE}} = \frac{0,803 \cdot 0,01163 \cdot 0,29}{0,29 \cdot 0,00536 \cdot 0,97} = 1,8 \text{ T} \quad (3.48)$$

Magnetická indukce ve jhu statoru

$$B_{j1} = \frac{\phi}{2h_{j1} l_{FE} k_{FE}} = \frac{11,27}{2 \cdot 14,3 \cdot 0,29 \cdot 0,97} = 1,40 \text{ T} \quad (3.49)$$

Magnetická indukce ve jhu rotoru

$$B_{j2} = \frac{\phi}{2h'_{j2} l_{FE} k_{FE}} = \frac{11,27}{2 \cdot 17,4 \cdot 0,29 \cdot 0,97} = 1,15 \text{ T} \quad (3.50)$$

Kde výpočtová výška h'_{j2} je

$$h'_{j2} = \frac{2+p}{3,2p} \left(\frac{D_2}{2} - h_d \right) = \frac{2+2}{3,2 \cdot 2} \left(\frac{96,22}{2} - 20,3 \right) = 17,4 \text{ mm} \quad (3.51)$$

Carterův činitel k_c

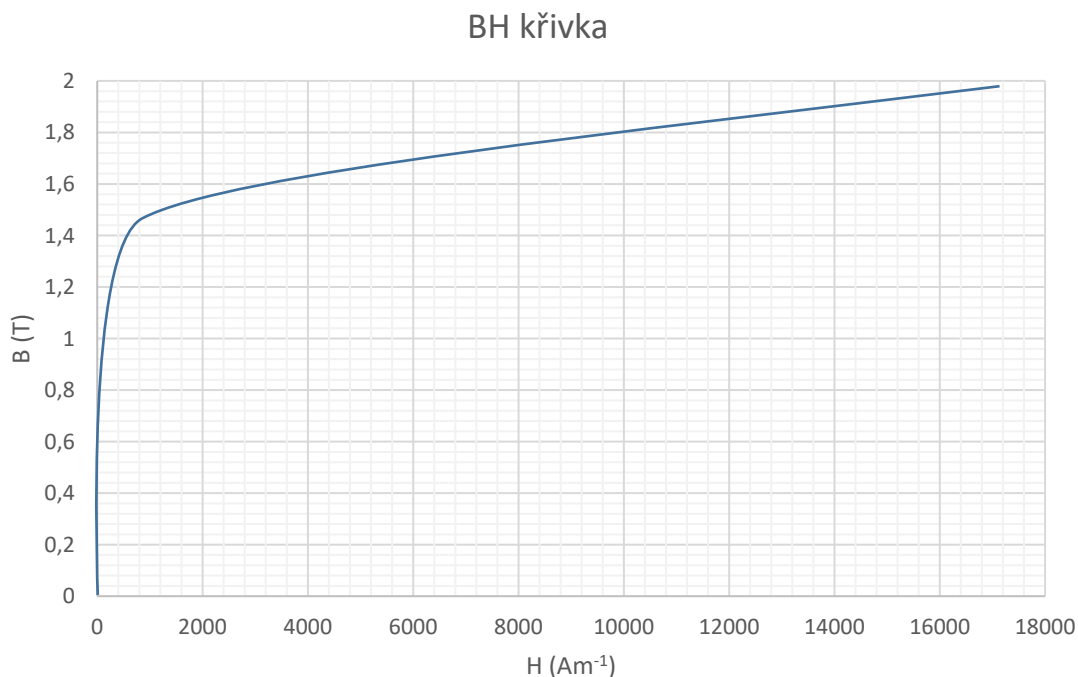
$$k_c = \frac{t_d}{t_d - \gamma \delta} = \frac{0,00843}{0,00843 - 10,32 \cdot 2,5 \cdot 10^{-4}} = 1,44 \quad (3.52)$$

Kde γ je

$$\gamma = \frac{\left(\frac{b_0}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{b_0}{\delta}} = \frac{\left(\frac{3,5}{0,25}\right)^2}{5 + \frac{3,5}{0,25}} = 10,32 \quad (3.53)$$

Magnetické napětí vzduchové mezery

$$\begin{aligned} U_\delta &= 1,59 B_\delta \delta k_c \cdot 10^6 = \\ &= 1,59 \cdot 0,803 \cdot 0,00025 \cdot 1,44 \cdot 10^6 = 459,63 \text{ A} \end{aligned} \quad (3.54)$$



Obr. 3-8 BH křivka plechů M350-50A [5]

Magnetické napětí zubu statoru

$$U_{z1} = 2h_{z1}H_{z1} = 2 \cdot 0,01534 \cdot 6186 = 189,8 \text{ A} \quad (3.55)$$

Magnetické napětí zubu rotoru

$$U_{z2} = 2h_{z2}H_{z2} = 2 \cdot 0,0203 \cdot 10720 = 435,23 \text{ A} \quad (3.56)$$

Činitel nasycení zubů k_z

$$k_z = 1 + \frac{U_{z1} + U_{z2}}{U_\delta} = 1 + \frac{189,8 + 435,23}{459,63} = 2,36 \quad (3.57)$$

Magnetické napětí jhu statoru

$$U_{j1} = l_{j1}H_{j1} = 0,1105 \cdot 481 = 53,15 \text{ A} \quad (3.58)$$

Kde délka střední indukční čáry l_{j1} ve jhu statoru je

$$l_{j1} = \frac{\pi(D_e - h_{j1})}{2p} = \frac{\pi(156 - 15,34)}{4} = 110,5 \text{ mm} \quad (3.59)$$

Magnetické napětí jhu rotoru

$$U_{j2} = l_{j2}H_{j2} = 0,02043 \cdot 146 = 3 \text{ A} \quad (3.60)$$

Délka střední magnetické indukční čáry ve jhu rotoru

$$l_{j2} = \frac{\pi(D_h - h_{j2})}{2p} = \frac{\pi(35,88 - 9,87)}{4} = 20,43 \text{ mm} \quad (3.61)$$

Výsledné napětí na jednu pólovou dvojici

$$F_m = U_\delta + U_{z1} + U_{z2} + U_{j1} + U_{j2} = 1143,17 \text{ A} \quad (3.62)$$

Činitel nasycení magnetického obvodu k_μ

$$k_\mu = \frac{F_m}{U_\delta} = \frac{1143,17}{459,63} = 2,49 \quad (3.63)$$

Magnetizační proud

$$I_\mu = \frac{pF_m}{0,9mN_1k_{v1}} = \frac{2 \cdot 1143,17}{0,9 \cdot 3 \cdot 84 \cdot 0,96} = 10,5 \text{ A} \quad (3.64)$$

Poměrná hodnota magnetizačního proud s proudem jmenovitým

$$i_\mu = \frac{10,5}{14,52} = 0,72 \quad (3.65)$$

3.8 Odporů a reaktance asynchronního motoru

Abychom mohli sestavit náhradní schéma asynchronního motoru, potažmo jeho charakteristiky, potřebujeme znát jeho odpory R_1 a R_2 , rozptylové reaktance $X_{1\sigma}$ a $X_{2\sigma}$, vzájemnou reaktanci X_{12} a fiktivní odpor R_{12} reprezentující ztráty v železe.

Odpor vinutí statoru se spočítá jako

$$R_1 = \rho_\vartheta \frac{L}{S_{\text{efa}}} = \frac{10^{-6}}{47} \cdot \frac{71,3}{1,767 \cdot 10^{-6} \cdot 1} = 0,86 \ \Omega \quad (3.66)$$

Kde celková délka vodičů jedné fáze vinutí je

$$L = l_{av}N = 0,8488 \cdot 84 = 71,3 \text{ m} \quad (3.67)$$

Střední délka závitů vinutí l_{av} se vypočítá

$$l_{av} = 2(l_d + l_\zeta) = 2(0,29 + 0,1344) = 0,8488 \text{ m} \quad (3.77)$$

Délka drážkové části l_d je rovna konstrukční délce statorového svazku 0,29m. B se u vsypávaného vynutí bere jako 0,01m. Činitel k_ξ pro čtyřpólový stroje je 1,3 a délka čela l_ξ je

$$l_\xi = k_\xi b_c + 2B = 1,30 \cdot 0,088 + 2 \cdot 0,01 = 0,1344 \text{ m} \quad (3.78)$$

Střední šířka cívky b_c určená na oblouku kružnice

$$b_c = \frac{\pi(D+h_{d1})}{2p} \beta_1 = \frac{\pi(0,09672+0,01534)}{4} \cdot 1 = 0,088 \text{ m} \quad (3.79)$$

Vyložení čel l_v kde činitel k_v pro čtyřpólový stroj je 0,4

$$l_v = k_v b_c + B = 0,40 \cdot 0,088 + 0,01 = 0,0452 \text{ m} \quad (3.80)$$

Odpor vinutí rotoru R_2

$$R_2 = R_t + 2 \frac{R_{kn}}{\Delta^2} = 175,8 + 2 \frac{2,132}{0,4786^2} = 0,1944 \text{ m}\Omega \quad (3.81)$$

Odpor tyče při teplotě 75 °C, rezistivita litého hliníku je 4,16 $\mu\Omega\text{cm}$

$$R_t = \rho_t \frac{l_t}{s_t} \cdot k = \frac{10^{-6}}{24} \cdot \frac{0,29}{68,75 \cdot 10^{-6}} = 0,1758 \text{ m}\Omega \quad (3.82)$$

Odpor kruhu nakrátko při teplotě 75 °C

$$R_{kn} = \rho_t \frac{\pi D_{kn}}{Q_2 s_{kn}} = \frac{10^{-6}}{24} \frac{\pi \cdot 0,07157}{26 \cdot 169 \cdot 10^{-6}} = 0,002132 \text{ m}\Omega \quad (3.83)$$

Odpor fáze přepočítaný na stranu statoru

$$R'_2 = R_2 \frac{4m(N_1 k_{v1})^2}{Q_2} = 194,4 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{4 \cdot 3 \cdot (84 \cdot 0,96)^2}{26} = 0,58 \Omega \quad (3.84)$$

Rozptylová reaktance statorového vinutí se spočítá dle

$$\begin{aligned} X_{1\sigma} &= 15,8 \frac{f}{100} \left(\frac{N_1}{100} \right)^2 \frac{l'_2}{pq} (\lambda_d + \lambda_{\check{c}} + \lambda_{dif}) = \\ &= 15,8 \cdot \frac{55}{100} \cdot \left(\frac{84}{100} \right)^2 \cdot \frac{0,29}{2 \cdot 3} \cdot (1,48 + 0,3 + 2,442) = 1,25 \Omega \end{aligned} \quad (3.85)$$

Činitel magnetické vodivosti drážky λ_d

$$\begin{aligned} \lambda_d &= \frac{h_3}{3b} + \left(\frac{h_2}{b} + \frac{3h_1}{b+2b_0} + \frac{h_0}{b_0} \right) = \\ &= \frac{12,458}{3 \cdot 4,53} + \left(\frac{1,05}{4,53} + \frac{3 \cdot 0,505}{4,53 + 2 \cdot 3,5} + \frac{0,7}{3,5} \right) = 1,48 \end{aligned} \quad (3.86)$$

Činitel magnetické vodivosti čel $\lambda_{\check{c}}$

$$\begin{aligned} \lambda_{\check{c}} &= 0,34 \frac{q}{l'_i} (l_{\check{c}} - 0,64\beta t_p) = \\ &= 0,34 \frac{3}{0,29} (0,1344 - 0,64 \cdot 0,0756) = 0,3 \end{aligned} \quad (3.87)$$

Činitel magnetické vodivosti diferenčního rozptylu λ_{dif}

$$\lambda_{dif} = \frac{t_{d1}}{12\delta k_c} \xi = \frac{11,63 \cdot 10^{-3}}{12 \cdot 2,5 \cdot 10^{-4} \cdot 1,44} \cdot 0,914 = 2,442 \quad (3.88)$$

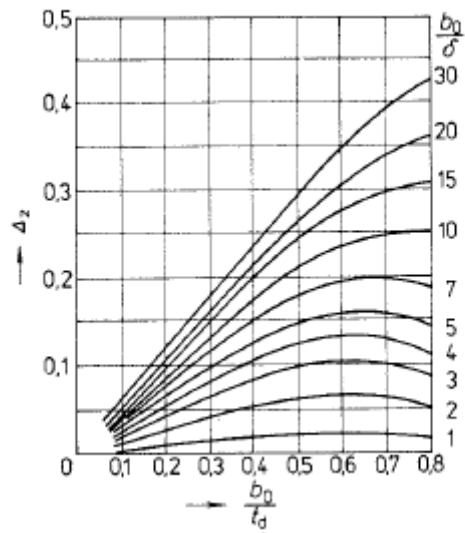
Kde činitel ξ se spočítá jako

$$\begin{aligned} \xi &= 2k'_\gamma k_\beta - k_{v1}^2 \left(\frac{t_{d2}}{t_{d1}} \right)^2 (1 + \beta_\gamma^2) = \\ &= 2 \cdot 0,7 - 0,96^2 \cdot \left(\frac{8,44}{11,63} \right)^2 (1 + 0) = 0,914 \end{aligned} \quad (3.89)$$

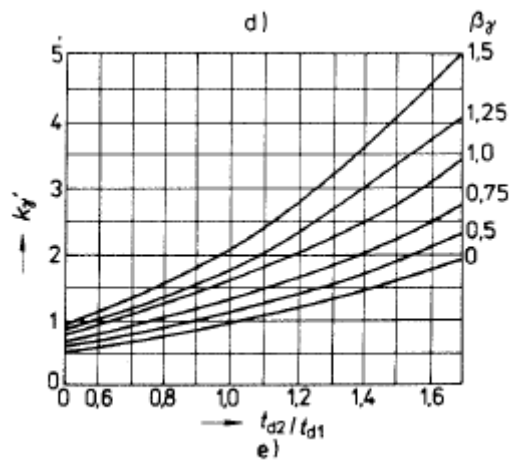
Δ_z se určí z obr. 3-9

β_γ činitel natočení drážek, nejsou-li drážky natočeny, činitel je roven 0

k'_γ činitel určený z obr. 3-10



Obr. 3-10 činitel Δ_z [3]



Obr. 3-9 činitel k_γ [3]

Výpočet rozptylové reaktance rotoru

$$\begin{aligned}
 X_{2\sigma} &= 7,9 f_1 l_i'' (\lambda_{d2} + \lambda_{\xi 2} + \lambda_{dif2}) \cdot 10^{-6} = & (3.90) \\
 &= 7,9 \cdot 50 \cdot 0,29 \cdot (1,7 + 2,587 + 0,0866) \cdot 10^{-6} = 501 \cdot 10^{-6} \Omega
 \end{aligned}$$

Činitel magnetické vodivosti drážky λ_d

$$\begin{aligned}\lambda_{d2} &= \left[\frac{h_1}{3b} \left(1 - \frac{\pi b^2}{8s_t} \right)^2 + 0,66 - \frac{b_0}{2b} \right] k_d + \frac{h_0}{b_0} = \\ &= \left[\frac{16,724}{3 \cdot 5,44} \left(1 - \frac{\pi \cdot 5,44^2}{8 \cdot 68,75} \right)^2 + 0,66 - \frac{1,5}{2 \cdot 5,44} \right] \cdot 1 + \frac{0,7}{1,5} = 1,7\end{aligned}\quad (3.91)$$

Činitel magnetické vodivosti diferenčního rozptylu rotorového vinutí

$$\lambda_{dif2} = \frac{t_{d2}}{12\delta k_c} \xi = \frac{11,63}{12 \cdot 0,25 \cdot 1,44} \cdot 0,961 = 2,587 \quad (3.92)$$

Kde činitel ξ

$$\xi = 1 + \frac{1}{5} \left(\frac{\pi p}{Q_2} \right)^2 - \frac{\Delta_z}{1 - \left(\frac{p}{Q_2} \right)^2} = 1 + \frac{1}{5} \left(\frac{\pi \cdot 2}{26} \right)^2 - \frac{0,05}{1 - \left(\frac{2}{26} \right)^2} = 0,961 \quad (3.93)$$

Činitel magnetické vodivosti čel

$$\begin{aligned}\lambda_{c2} &= \frac{2,3D_{kn}}{Q_2 l_i \Delta^2} \log \frac{4,7D_{kn}}{2a_{kn} + b_{kn}} = \\ &= \frac{2,3 \cdot 0,07157}{26 \cdot 0,29 \cdot 0,4876^2} \log \frac{4,7 \cdot 0,07157}{2 \cdot 0,0686 + 0,02465} = 0,0866\end{aligned}\quad (3.94)$$

Kde D_{kn} je střední průměr kruhu nakrátko

$$D_{kn} \approx D_2 - b_{kn} \approx 96,72 - 24,65 \approx 73,07 \text{ mm} \quad (3.95)$$

Přepočtená hodnota rozptylu na stranu statoru

$$X'_{2\sigma} = X_{2\sigma} \cdot \frac{4m(N_1 k_{v1})}{Q_2} = 501 \cdot 10^{-6} \frac{4 \cdot 3(84 \cdot 0,96)^2}{26} = 1,5 \Omega \quad (3.96)$$

3.9 Ztráty a účinnost asynchronního motoru

Ztráty v asynchronním motoru se skládají ze ztrát v železe, Joulových ztrát, ventilačních ztrát, mechanických ztrát a dodatečných ztrát.

Hlavní ztráty v železe statoru

$$\begin{aligned}\Delta P_{Feh} &= \Delta p_{1,0} \left(\frac{f_1}{50}\right)^\beta (k_{dj} B_{j1}^2 m_{j1} + k_{dz} B_{z1av}^2 m_{z1}) = \\ &= 1,39 \left(\frac{55}{50}\right)^{1,5} (1,6 \cdot 1,4^2 \cdot 13,8 + 1,8 \cdot 1,69^2 \cdot 5,05) = 116,45 W\end{aligned}\quad (3.97)$$

Kde činitele uvažující vliv nerovnoměrnosti rozložení toku jsou k_{dj} 1,6 a k_{dz} 1,8. Hmotnosti železa m_{j1} a m_{z1} se spočítají jako

$$\begin{aligned}m_{j1} &= \pi(D_e - h_{j1})h_{j1}l_{Fe1}k_{Fe}\gamma_{Fe} = \\ &= \pi(0,156 - 0,0143) \cdot 0,0143 \cdot 0,29 \cdot 0,97 \cdot 7710 = 13,8 kg\end{aligned}\quad (3.98)$$

$$\begin{aligned}m_{z1} &= h_{z1}b_{z1av}Q_1l_{Fe1}k_{Fe}\gamma_{Fe} = \\ &= 0,01534 \cdot 0,004213 \cdot 36 \cdot 0,29 \cdot 0,97 \cdot 7710 = 5,05 kg\end{aligned}\quad (3.99)$$

Povrchové ztráty v rotoru

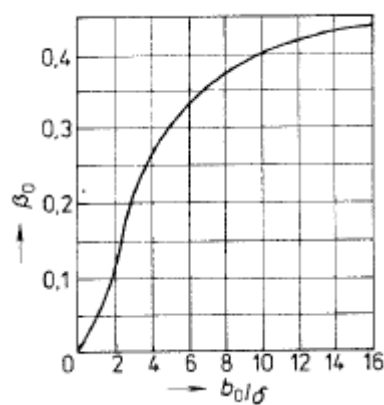
$$\begin{aligned}\Delta P_{\delta p2} &= p_{\delta p2}(t_{d2} - b_{02})Q_2l_{Fe2} = \\ &= 329,1(0,00844 - 0,0015) \cdot 26 \cdot 0,29 = 17,22 W\end{aligned}\quad (3.100)$$

Kde $p_{\delta p2}$

$$\begin{aligned}p_{\delta p2} &= 0,5k_{01} \left(\frac{Q_1 n}{10000}\right)^{1,5} (B_{02}t_{d1}10^3)^2 = \\ &= 0,5 \cdot 1,4 \cdot \left(\frac{36 \cdot 1650}{10000}\right)^{1,5} (0,49 \cdot 11,63)^2 = 329,1 W m^{-2}\end{aligned}\quad (3.101)$$

A B_{02} je

$$B_{02} = \beta_{02}k_c B_\delta = 0,42 \cdot 1,44 \cdot 0,803 = 0,49 T\quad (3.102)$$



Obr. 3-11 činitel β_{02} [3]

Pulsní ztráty v zubech rotoru

$$\begin{aligned} \Delta P_{p2} &= 0,11 \left(\frac{Q_1 n}{1000} B_{p2} \right)^2 m_{z2} = \\ &= 0,11 \left(\frac{36 \cdot 1650}{1000} \cdot 0,275 \right)^2 \cdot 6,13 = 179,92 \text{ W} \end{aligned} \quad (3.103)$$

Amplituda pulsace indukce

$$B_{p2} = \frac{\gamma_1 \delta}{2t_{d2}} B_{z2av} = \frac{10,32 \cdot 0,25}{8,44 \cdot 2} \cdot 1,8 = 0,275 \text{ T} \quad (3.104)$$

Hmotnost zubů rotoru

$$\begin{aligned} m_{z2} &= Q_2 h_{z2} b_{z2av} l_{Fe2} k_{Fe} \gamma_{Fe} = \\ &= 26 \cdot 0,0203 \cdot 0,00536 \cdot 0,29 \cdot 0,97 \cdot 7710 = 6,13 \text{ kg} \end{aligned} \quad (3.105)$$

Celkové ztráty v železe

$$\begin{aligned} \Delta P_{Fe} &= \Delta P_{Feh} + \Delta P_{p2} + \Delta P_{\delta p2} = \\ &= 116,45 + 17,22 + 179,92 = 312,89 \text{ W} \end{aligned} \quad (3.106)$$

Ztráty ve vinutí statoru

$$\Delta P_{j1} = m R_1 I_{1N}^2 = 3 \cdot 0,86 \cdot 14,528^2 = 544,54 \text{ W} \quad (3.107)$$

Ztráty ve vinutí rotoru

$$\Delta P_{j2} = mR_2 I_{2N}^2 = 3 \cdot 501 \cdot 10^{-6} \cdot 240,63^2 = 87,027 \text{ W} \quad (3.108)$$

Ztráty mechanické

$$\begin{aligned} \Delta P_{mech} &= K_T \left(\frac{n}{10}\right)^2 D_e^4 = \\ &= 1,0972 \cdot \left(\frac{1650}{10}\right)^2 \cdot 0,156^4 = 17,7 \text{ W} \end{aligned} \quad (3.109)$$

Kde K_T je

$$K_T = 1,3(1 - D_e) = 1,3(1 - 0,156) = 1,0972 \quad (3.110)$$

Dodatečné ztráty při jmenovitém chodu

$$\Delta P_d = 0,005 P_{1N} = 0,005 \frac{P_{2N}}{\eta} = 0,005 \frac{7500}{0,87} = 43,1 \text{ W} \quad (3.111)$$

Celkové ztráty

$$\begin{aligned} \Delta P_{cel} &= \Delta P_{Fe} + \Delta P_{j1} + \Delta P_{j2} + \Delta P_{mech} + \Delta P_d = \\ &= 312,89 + 544,54 + 87,027 + 17,7 + 43,1 = 1005,257 \text{ W} \end{aligned} \quad (3.112)$$

3.10 Rozběhové charakteristiky asynchronního motoru

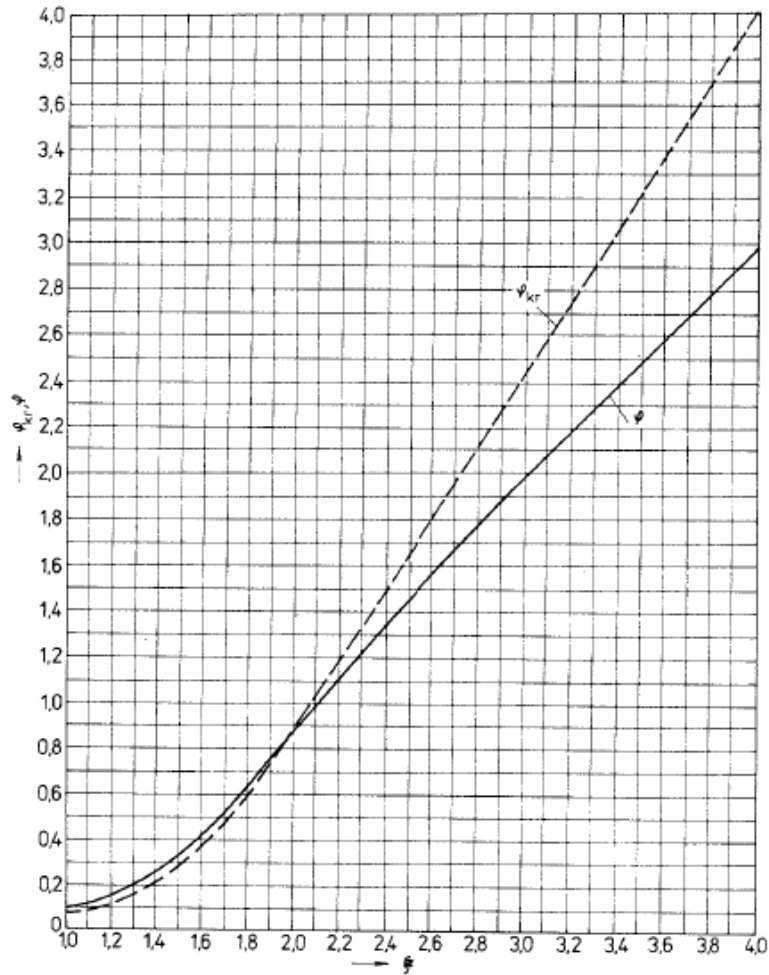
Při zvýšení frekvence rotorového proudu nakrátko vzniká skin efekt, který vytlačuje proud do horní části tyče, zvyšuje proud a snižuje reaktanci. Proto se s ním musí počítat při rozběhu. Výpočet bude proveden pro skluz 1, další výpočty jsou provedeny stejně. Uvedené výpočty platí při přímém napojení stroje k síti. Navrhovaný stroj bude pravděpodobně napájen z měniče, což umožňuje nastavení rozběhu.

Redukovaná výška vodiče

$$\xi = 65,15 h_t \sqrt{s} = 65,15 \cdot 0,0196 \cdot \sqrt{1} = 1,277 \quad (3.113)$$

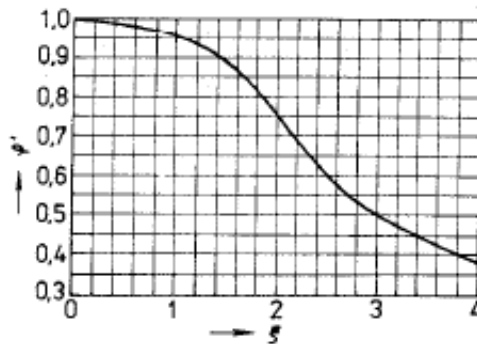
Hloubka vniku proudu h_R

$$h_R = \frac{h_t}{1+\varphi(\xi)} = \frac{0,0196}{1+0,19} = 0,01647 \quad (3.114)$$



Obr. 3-12 křivky $\varphi(\xi)$ [3]

Činitel $k_x = \varphi'(\xi)$, dle obr. 3-13 je k_x 0,92



Obr. 3-13 činitel k_x [3]

Omezená plocha průřezu S_R

$$S_R = \frac{\pi b_2^2}{8} + \frac{b_2 + b_R}{2} \left(h_R - \frac{b_2}{2} \right) = \quad (3.115)$$

$$= \frac{\pi \cdot 5,44^2}{8} + \frac{5,44 + 2,126}{2} \left(16,47 - \frac{5,44}{2} \right) = 63,64 \text{ mm}^2$$

Kde b_R je

$$b_R = b_2 - \frac{b_2 - b_1}{h_1} \left(h_R - \frac{b_2}{2} \right) = \quad (3.116)$$

$$= 5,44 - \frac{5,44 - 1,56}{16,1} \left(16,47 - \frac{5,44}{2} \right) = 2,126 \text{ mm}$$

Činitel k_R

$$k_R = \frac{S_t}{S_R} = \frac{68,92}{63,64} = 1,083 \quad (3.117)$$

Činitel K_R

$$K_R = 1 + \frac{R_t}{R_2} (k_R - 1) = 1 + \frac{0,1758}{0,1963} (1,083 - 1) = 1,075 \quad (3.118)$$

Odpor statoru se skin efektem

$$R'_{2\xi} = K_R \cdot R'_2 = 1,075 \cdot 0,58 = 0,623 \Omega \quad (3.119)$$

Činitel magnetické vodivosti drážky λ_d s vlivem skin efektu

$$\begin{aligned}\lambda_{d\xi 2} &= \left[\frac{h_1}{3b} \left(1 - \frac{\pi b^2}{8s_t} \right)^2 + 0,66 - \frac{b_0}{2b} \right] k_X + \frac{h_0}{b_0} = \\ &= \left[\frac{16,724}{3 \cdot 5,44} \left(1 - \frac{\pi \cdot 5,44^2}{8 \cdot 68,75} \right)^2 + 0,66 - \frac{1,5}{2 \cdot 5,44} \right] \cdot 0,92 + \frac{0,7}{1,5} = 1,598\end{aligned}\quad (3.120)$$

Činitel K_X

$$K_X = \frac{\lambda_{d\xi 2} + \lambda_{\xi 2} + \lambda_{dif 2}}{\lambda_{d2} + \lambda_{\xi 2} + \lambda_{dif 2}} = \frac{1,598 + 2,587 + 0,0866}{1,7 + 2,587 + 0,0866} = 0,9767 \quad (3.121)$$

Rozptylová reaktance s vlivem skin efektu

$$X'_{2\sigma\xi} = X'_{2\sigma} \cdot K_X = 1,5 \cdot 0,9767 = 1,465 \Omega \quad (3.122)$$

Při zvýšení skluzu nad skluz zvratu dochází ke zvýšení odběru proudu, a to vede k tomu, že se rozptylové toky zvětšují a dochází k velkému nasycení zubů. Činitel vodivosti drážkového rozptylu i magnetická vodivost diferenčního rozptylu se zmenšuje.

Proud rotoru počítaný přibližně bez uvažování vlivu nasycení.

$$\begin{aligned}I'_2 &\approx \frac{U_{1N}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_{2\xi}}{s} \right)^2 + (X_{1\sigma} + X'_{2\sigma\xi})^2}} = \\ &= \frac{230}{\sqrt{\left(0,86 + \frac{0,623}{1} \right)^2 + (1,25 + 1,465)^2}} = 74,35 A\end{aligned}\quad (3.123)$$

Celkové magnetické napětí na jednu drážku vinutí

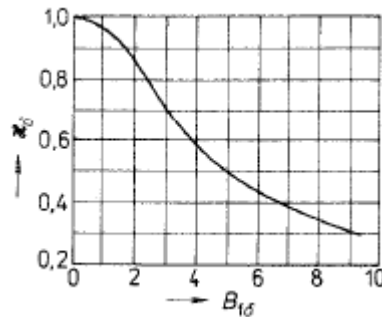
$$\begin{aligned}F_{dav} &= 0,7 \frac{k_n I_1 V_{d1}}{a} \left(k'_\beta + k_{y1} k_{v1} \frac{Q_1}{Q_2} \right) \\ &= 0,7 \frac{1,4 \cdot 74,35 \cdot 14}{1} \cdot \left(1 + 0,96 \frac{36}{26} \right) = 2376 A\end{aligned}\quad (3.124)$$

Fiktivní indukce rozptylového toku ve vzduchové mezeře

$$B_{f\delta} = \frac{F_{dav} \cdot 10^{-6}}{1,6\delta C_n} = \frac{2376 \cdot 10^{-6}}{1,6 \cdot 0,00025 \cdot 0,92} = 6,456 T \quad (3.125)$$

Kde C_n

$$C_n = 0,64 + 2,5 \sqrt{\frac{\sigma}{t_{d1} + t_{d2}}} = 0,64 + 2,5 \sqrt{\frac{0,25}{11,66 + 8,44}} = 0,92 \quad (3.126)$$



Obr. 3-14 činitel χ_δ [3]

Z obrázku 3-14 byl odečten činitel χ_δ a spočítáno dodatečné otevření drážek rotoru

$$\Delta b_{01} = (t_{d1} - b_{01})(1 - \chi_\delta) = (11,66 - 3,5)(1 - 0,41) = 4,797 \text{ mm} \quad (3.127)$$

Úbytek z činitele magnetické vodivosti statoru vlivem nasycení

$$\begin{aligned} \Delta \lambda_{d1n} &= \frac{h_{01} + 0,58h'}{b_{01}} \cdot \frac{\Delta b_{01}}{\Delta b_{01} + 1,5b_{01}} = \\ &= \frac{0,7 + 0,58 \cdot 1,05}{3,5} \cdot \frac{4,797}{4,797 + 1,5 \cdot 3,5} = 0,179 \end{aligned} \quad (3.128)$$

Činitel magnetické vodivosti statoru s vlivem nasycení

$$\lambda_{d1n} = \lambda_{d1} - \Delta \lambda_{d1n} = 1,48 - 0,179 = 1,3 \quad (3.129)$$

Činitel magnetické vodivosti diferenčního rozptylu včetně nasycení

$$\lambda_{dif1n} = \lambda_{dif1}\chi_{\delta} = 2,442 \cdot 0,41 = 1 \quad (3.130)$$

Rozptylová reaktance fáze statorového vinutí s uvažováním vlivu nasycení

$$X_{1\sigma n} = X_{1\sigma} \cdot \frac{\lambda_{dif1n} + \lambda_{d1n} + \lambda_{\xi1}}{\lambda_{dif1} + \lambda_{d1} + \lambda_{\xi1}} = 1,25 \cdot \frac{1 + 1,3 + 0,3}{1,48 + 2,442 + 0,3} = 0,77 \Omega \quad (3.131)$$

Úbytek činitele vodivosti rotoru v důsledku nasycení

$$\Delta\lambda_{d2n} = \frac{h_{02}}{b_{02}} \cdot \frac{\Delta b_{02}}{\Delta b_{02} + b_{02}} = \frac{0,7}{1,5} \frac{4,01}{4,01 + 1,5} = 0,34 \quad (3.132)$$

Kde Δb_{02}

$$\Delta b_{02} = (t_{d2} - b_{02})(1 - \chi_{\delta}) = (8,44 - 1,5)(1 - 0,41) = 4,01 \text{ mm} \quad (3.133)$$

Činitel drážkové vodivosti s vlivem nasycení a skin efektu

$$\lambda_{d2\xi n} = \lambda_{d2\xi} - \Delta\lambda_{d2n} = 1,598 - 0,34 = 1,258 \quad (3.134)$$

Činitel magnetické vodivosti diferenčního rozptylu včetně nasycení

$$\lambda_{dif2n} = \lambda_{dif2}\chi_{\delta} = 2,587 \cdot 0,41 = 1,06 \quad (3.135)$$

Přepočtená hodnota rozptylová reaktance rotoru s vlivem skin efektu a nasycení

$$\begin{aligned} X'_{2\sigma\xi n} &= X'_{2\sigma} \cdot \frac{\lambda_{dif2n} + \lambda_{d2\xi n} + \lambda_{\xi2}}{\lambda_{dif2} + \lambda_{d2\xi} + \lambda_{\xi2}} = \\ &= 1,5 \cdot \frac{1,06 + 1,26 + 0,0866}{1,598 + 2,587 + 0,0866} = 0,87 \Omega \end{aligned} \quad (3.136)$$

Vzájemná reaktance vinutí statoru a rotoru při spouštění

$$X_{12n} = X_{12} \frac{F_m}{U_\delta} = 20,65 \frac{1143,27}{459,63} = 51,36 \Omega \quad (3.137)$$

Činitel rozptylu c_{1pn}

$$c_{1pn} = 1 + \frac{X_{1\sigma n}}{X_{12n}} = 1 + \frac{0,77}{51,36} = 1,015 \quad (3.138)$$

Přepočtený rotorový proud I'_2

$$I'_2 = \frac{U_{1N}}{\sqrt{\left(R_1 + c_{1pn} \frac{R'_2 \xi}{s}\right)^2 + (X_{1\sigma n} + c_{1pn} X'_{2\sigma \xi n})^2}} = \quad (3.139)$$

$$I'_2 = \frac{230}{\sqrt{\left(0,86 + 1,015 \frac{0,623}{1}\right)^2 + (0,77 + 1,015 \cdot 0,87)^2}} = 103,28 \text{ A}$$

Statorový proud

$$I_1 = I'_2 \frac{\sqrt{\left(R_1 + c_{1pn} \frac{R'_2 \xi}{s}\right)^2 + (X_{1\sigma n} + c_{1pn} X'_{2\sigma \xi n} + X_{12n})^2}}{c_{1pn} X_{12n}} \quad (3.140)$$

$$I_1 = 103,28 \frac{\sqrt{\left(0,86 + 1,015 \frac{0,623}{1}\right)^2 + (0,77 + 1,015 \cdot 0,87 + 51,36)^2}}{1,015 \cdot 51,36} = 105,07 \text{ A}$$

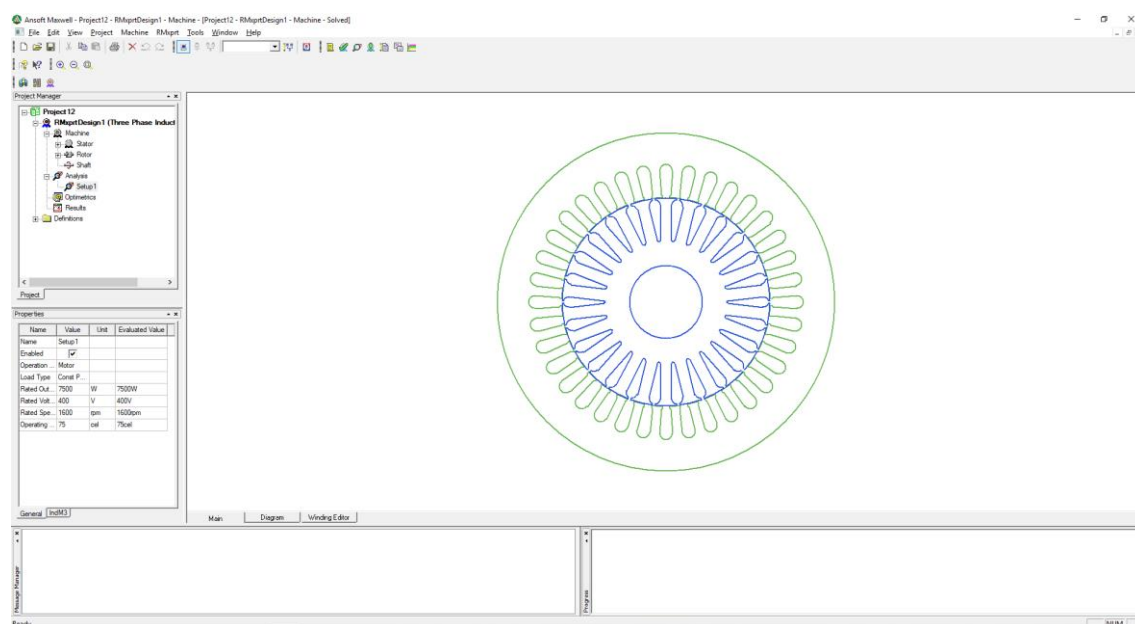
Moment motoru

$$M_{mech} = \frac{U_{N1}^2 m_1 p \frac{R'_2 \xi}{s}}{2\pi f \left[\left(R_1 + c_{1pn} \frac{R'_2 \xi}{s} \right)^2 + (X_{1\sigma n} + c_{1pn} X'_{2\sigma \xi n})^2 \right]} = \quad (3.141)$$

$$M_{mech} = \frac{230^2 \cdot 3 \cdot 2 \frac{0,623}{1}}{2\pi 55 \left[\left(0,86 + 1,015 \frac{0,623}{1} \right)^2 + (0,77 + 1,015 \cdot 0,87)^2 \right]} = 115,24 \text{ Nm}$$

4 SIMULACE V RMXprt A POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ

Pomocí programu RMXprt proběhl analytický výpočet dle navržených hodnot pomocí literatury [3]. Dále byl nastaven materiál elektromagnetických plechu dle [5]. Pro měděné vinutí byl vybrán materiál ‚copper‘ a pro litý hliník byl upraven materiál z knihovny. Hřídel byla nastavena jako nemagnetický materiál.



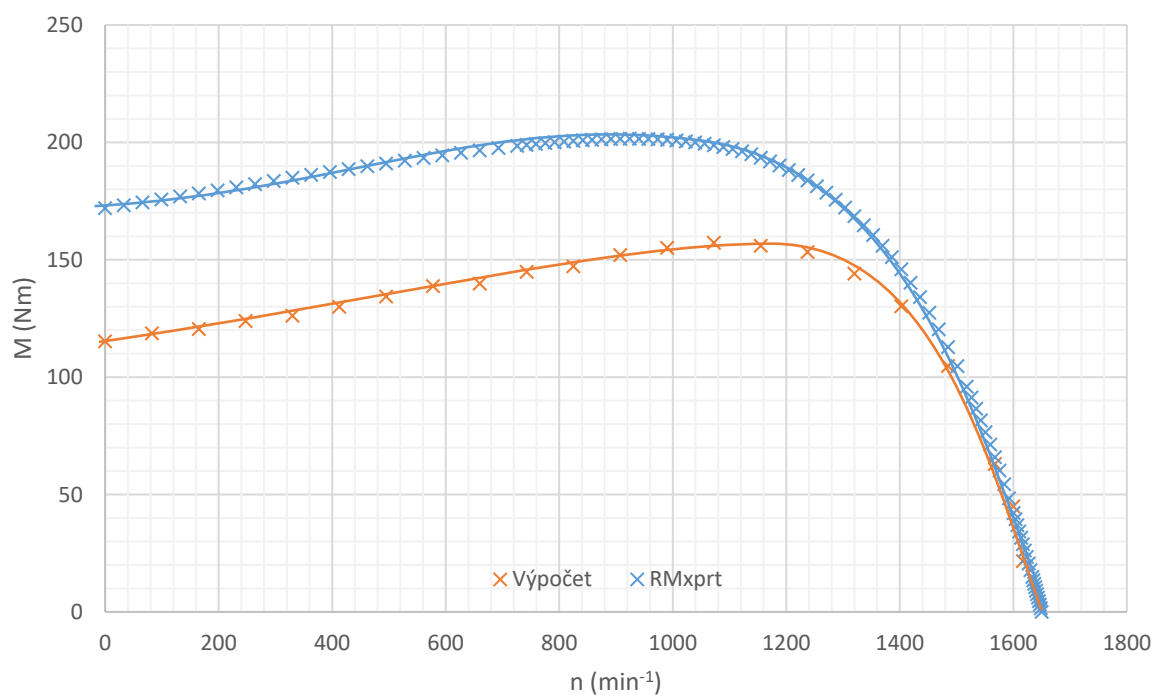
Obr. 4-1 uživatelské prostředí RMXprt

Tabulka 4-1 Magnetické indukce

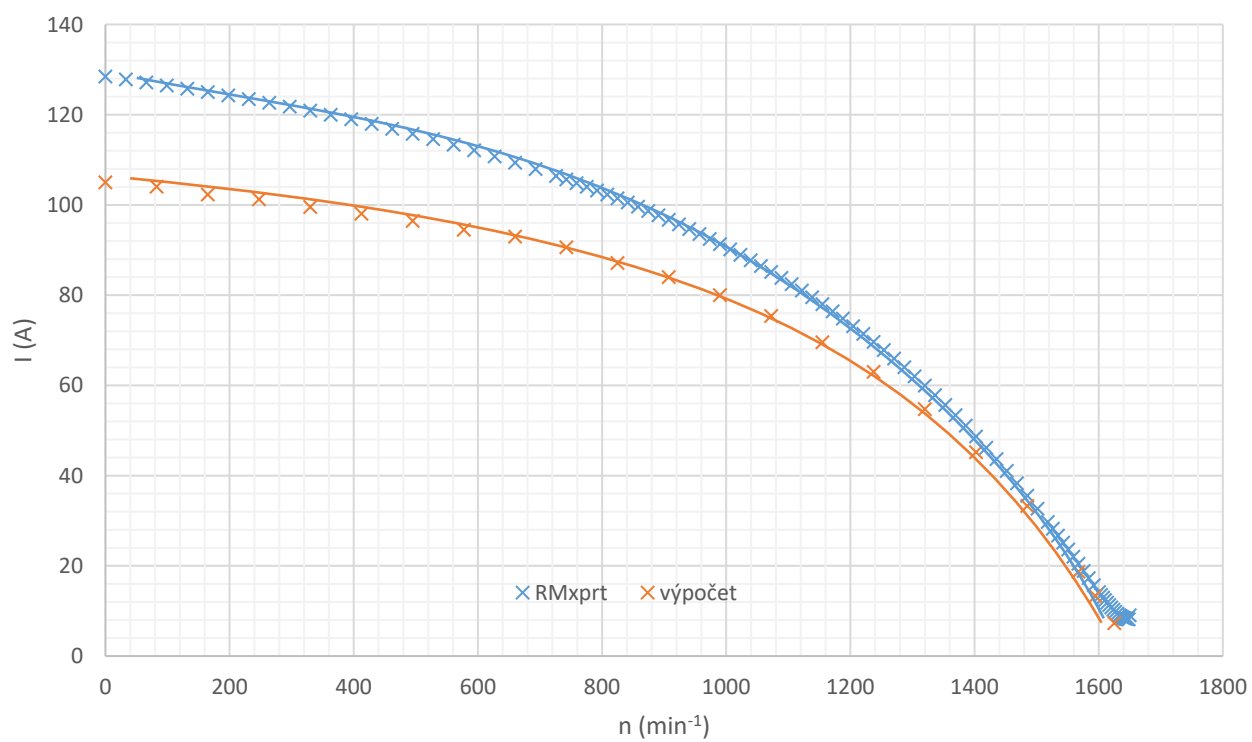
Magnetická indukce	Výpočet	RMxprt
	(T)	(T)
v zubu statoru	1,69	1,54
ve jhu statoru	1,4	1,34
v zubu rotoru	1,8	1,66
ve jhu rotoru	1,15	1,57
ve vzduchové mezeře	0,803	0,728

Tabulka 4-2 Jmenovité hodnoty

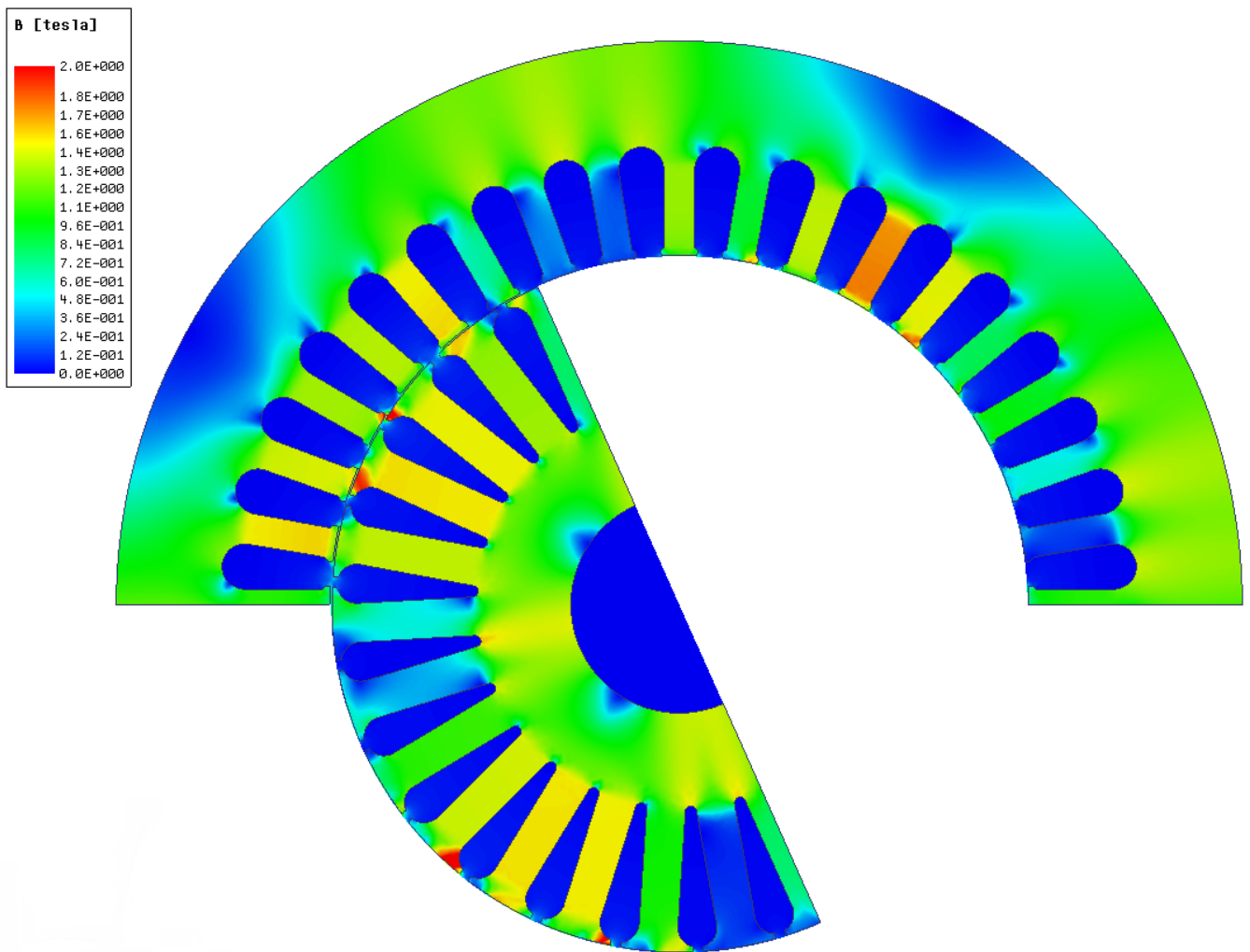
Jmenovité hodnoty		Výpočet	RMxpřt
Fázový proud statoru	(A)	14,53	14,84
Magnetizační proud	(A)	10,52	7,78
fázový proud rotoru	(A)	12,21	11,97
Proudová hustota vinutí statoru	(Amm ⁻²)	8,22	8,39
Proudová hustota rotorových tyčí	(Amm ⁻²)	3,5	3,23
Proudová hustota kruhu	(Amm ⁻²)	2,98	2,75
Odpor vinutí statoru	(Ω)	0,86	0,78
Rozptylová reaktance statoru	(Ω)	1,25	0,62
Odpor vinutí rotoru	(Ω)	0,58	0,58
Rozptylová reaktance rotoru	(Ω)	1,5	1,22
magnetizační reaktance	(Ω)	20,65	25,6
ztráty ve statorovém vinutí	(W)	544,54	516,78
ztráty v kleci rotoru	(W)	87,03	249,67
ztráty v železe	(W)	312,9	92,4
celkové ztráty	(W)	1005,3	1233,8
výstupní výkon	(W)	7500,8	7499,5
skluz	(-)	0,033	0,032
otáčky	(min ⁻¹)	1594,8	1596,4
moment	(Nm)	44,91	44,84
účinnost	(-)	0,88	0,86



Obr. 4-2 Momentová charakteristika



Obr. 4-3 Statorový proud



Obrázek 4-4 Magnetická indukce v motoru

Asynchronní motor s hliníkovou klecí má axiální délku 290 mm a jmenovité hodnoty 44,84 Nm při 1596,4 otáčkách.

Hodnoty analytického výpočtu a analýzy z programu RMXprt jsou ve jmenovité oblasti téměř totožné. Velký rozdíl v momentové charakteristice a statorového proudu je při rozběhu motoru. To může být způsobeno rozdílnými hodnotami náhradního schématu zejména rozptylovou reaktancí statoru.

5 KONSTRUKČNÍ ÚPRAVY STROJE

Při úpravách stroje bylo postupováno jako při jeho návrhu. Původní návrh má axiální délku 290 mm. Cílem je tento rozměr zmenšit.

5.1 Vinutí statoru

Počet drážek určen na základě geometrie stroje zůstává stejný. Při zkrácení délky stroje dojde při stejném počtu závitů v cívce ke zvýšení magnetické indukce ve vzduchové mezeře. Vzhledem k doporučeným hodnotám magnetické indukce ve vzduchové mezeře, která je pro asynchronní stroje typicky v rozmezí 0,7 až 0,9, je nutno zvýšit počet vodičů v cívce. Tudíž zkracování stroje vede k vyššímu počtu vodičů ve statorové drážce. Jelikož se jedná o motor se vsypávaným vinutím je nutné sledovat činitel plnění drážky. Z hlediska výroby je vhodné, aby činitel plnění drážky nepřekročil hodnotu 0,75. Tyto fakty vedly k volbě délky motoru 240 mm a 16 vodičů místo původních 14. Činitel plnění drážky je 0,7, což je z technologického hlediska téměř maximální možná hodnota.

5.2 Vzduchová mezera

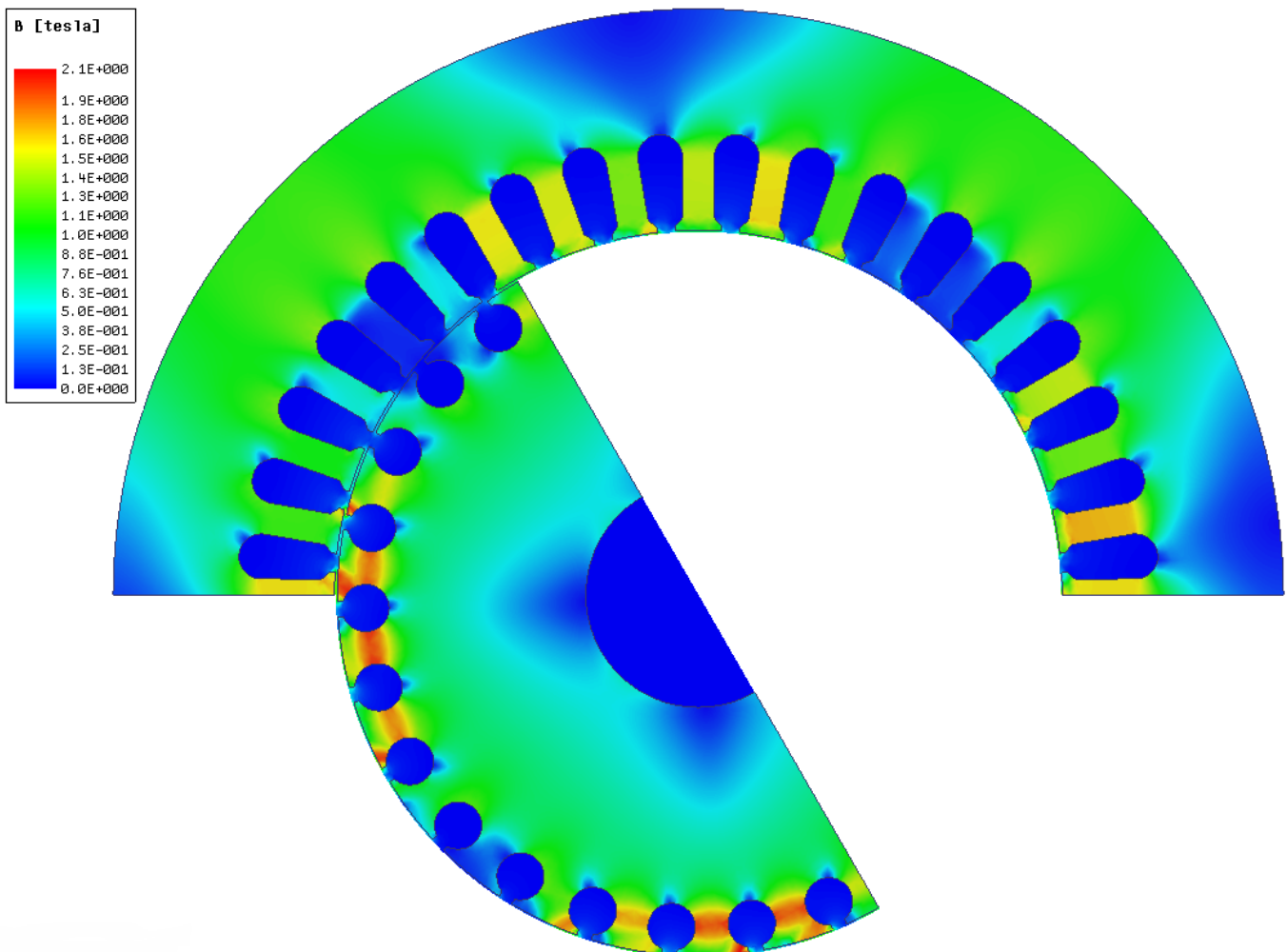
Na základě literatury [3] byla zvolena vzduchová mezera 0,25 mm. Tato hodnota je volena na základě osové výšky stroje. Avšak na stroj, který je navrhovaný v této bakalářské práci nemůže být pohlíženo z hlediska osové výšky vzhledem ke svým atypickým rozměrům, ale mnohem lepší bude na něj pohlížet z hlediska výkonu. Proto byla zvolena vzduchová mezera 0,4 mm. Tato hodnota bude vhodnější i vzhledem k výrobě daného motoru.

Toto ovšem povede ke zvýšení magnetizačního proudu, a tudíž k horšímu účinníku stroje. Zároveň se zhorší i účinnost, protože narostou ztráty ve vinutí.

5.3 Rotor

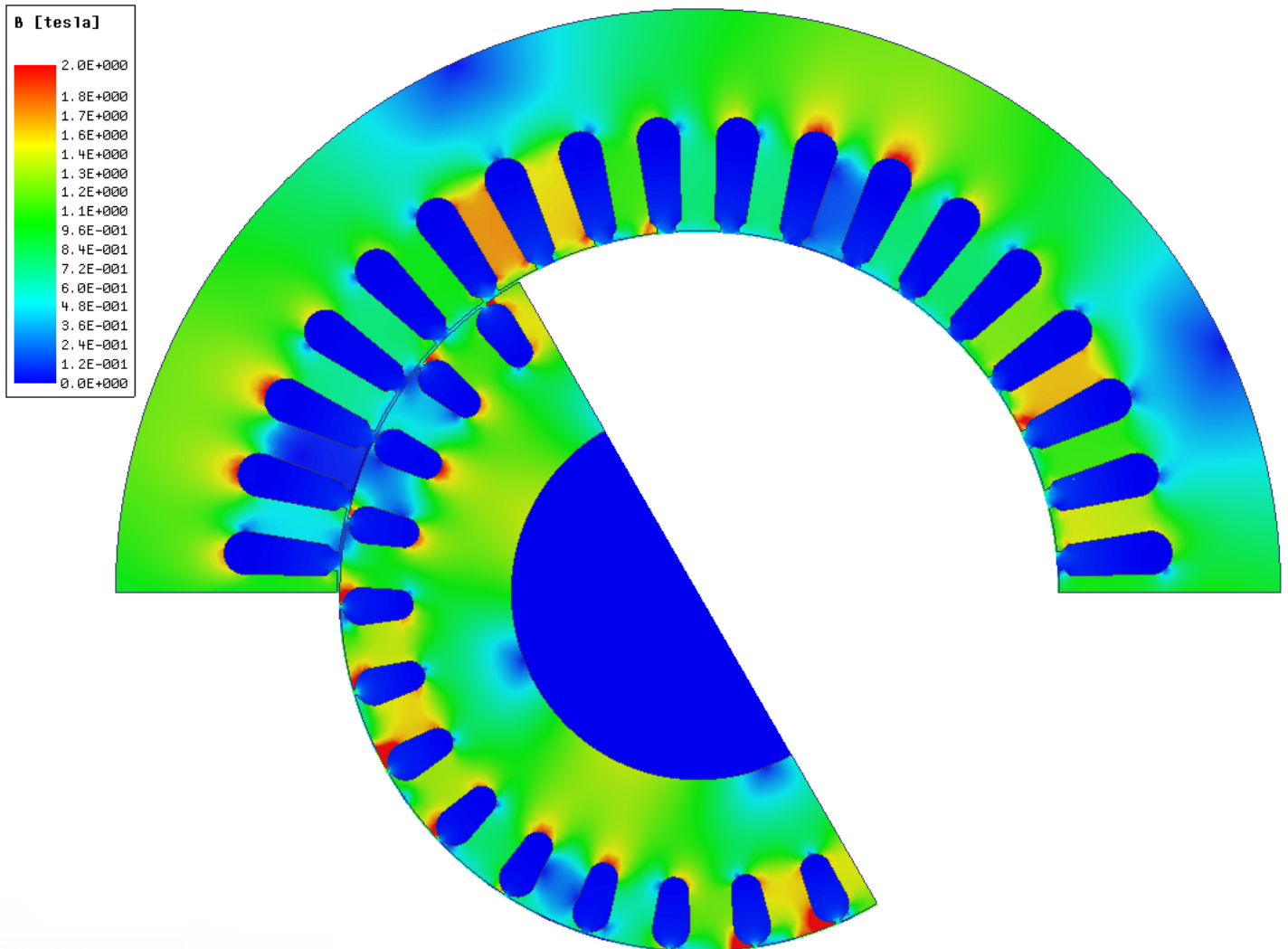
Při zkrácení délky motoru není možné použít hliníkovou klec kvůli nižší vodivosti. Proto byla zvolena klec měděná.

Měděná klec se dá vyrobit tlakovým litím, podobně jako hliníková klec. Jde ale o podstatně náročnější proces. Pro výrobu jednoho motoru na pokusy s čerpadlem je vhodné použít klec, která bude spájená, a proto byla vybrána tyč kruhového profilu. Rozložení magnetické indukce v rotoru je na obr. 5-1. Kvůli kruhovému profilu dochází k přesycení rotorového zubu v nejužším místě, což vede k navýšení magnetizačního proudu.



Obrázek 5-1 Magnetická indukce v motoru s měděnou klecí

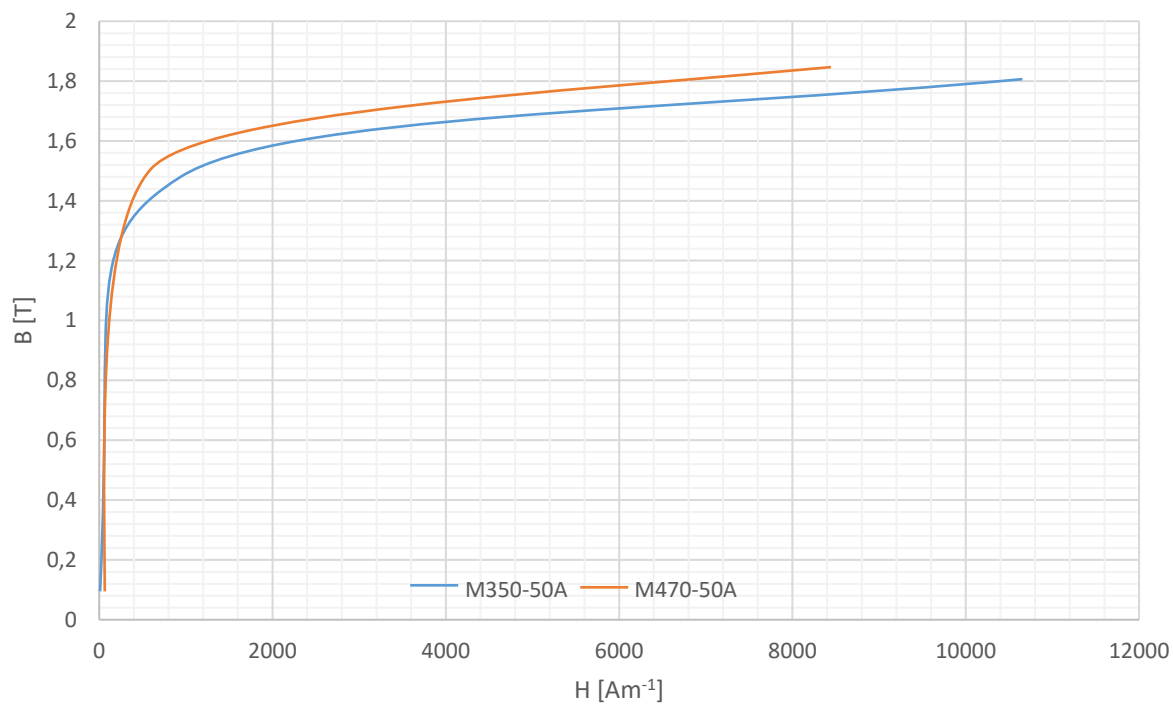
Aby bylo možné snížit vysoké sycení v zubech rotoru je třeba změnit tvar rotorové drážky. Toho bylo dosaženo pomocí použití dvou tyčí pod sebou s různým průměrem.



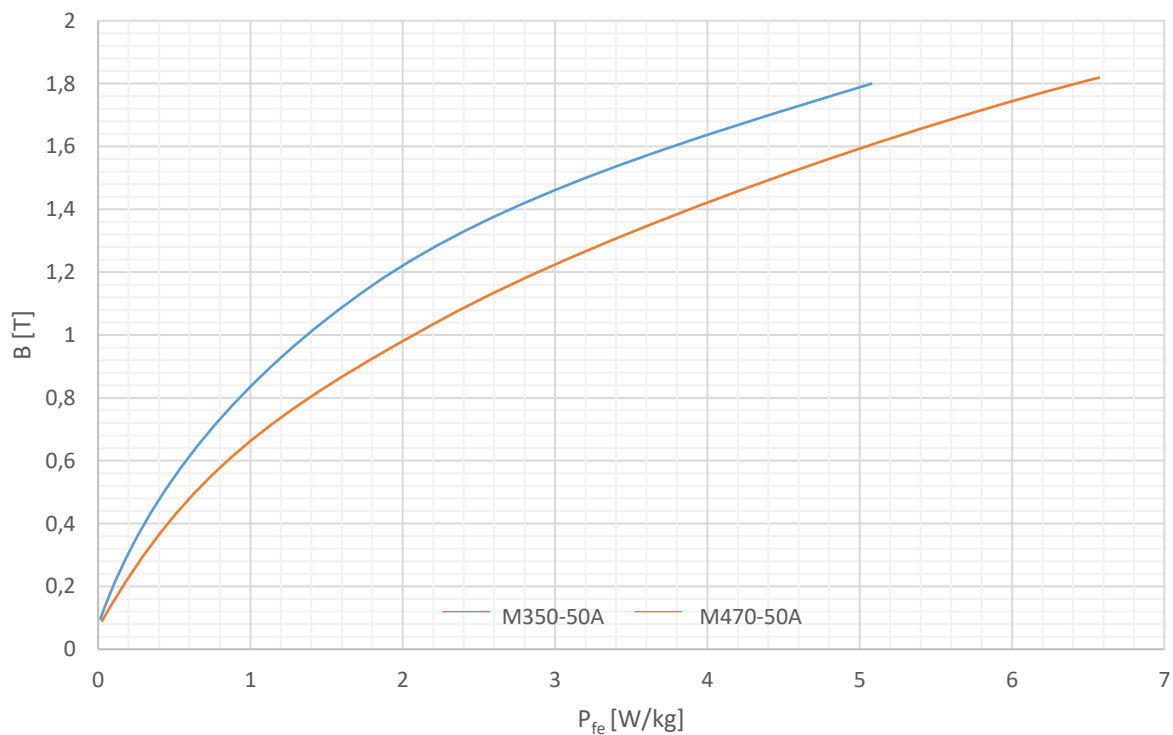
Obrázek 5-2 Magnetická indukce ve stroji se dvěma měděnými tyčema

5.4 Plechy

Při volbě elektrotechnických plechů je třeba najít kompromisní řešení mezi plechy s malými měrnými ztrátami a vhodnou B-H křivkou daného plechu. Pro tento motor byl zvolen plech m470-50A, který má sice větší měrné ztráty, ale vhodnější B-H křivku, díky menší intenzitě magnetického pole je v částech motoru menší magnetické napětí a díky tomu se zmenší magnetizační proud.



Obrázek 5-3 BH křivka elektrotechnických plechů [5][6]

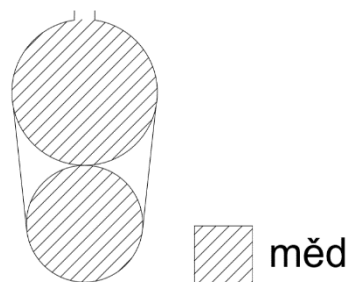


Obrázek 5-4 Ztrátové křivky elektrotechnických plechů [5][6]

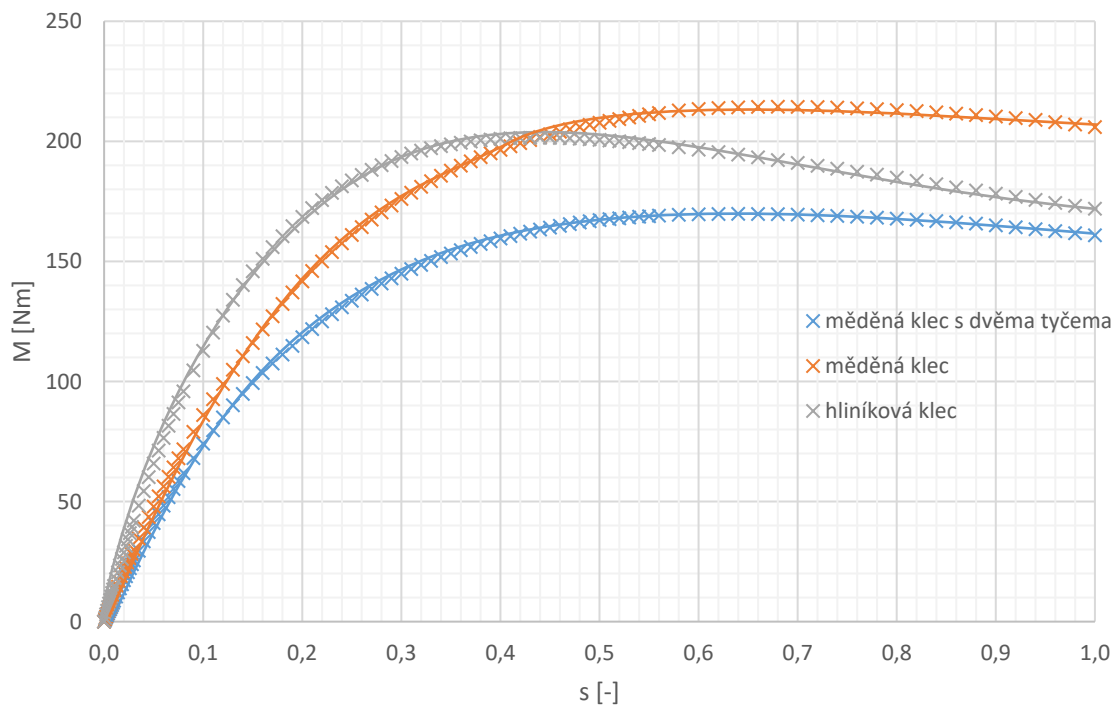
5.5 Porovnání výsledku z RMxpřt

V rámci modulu RMxpřt byly navrženy a simulovány všechny model navrhnutých motorů. U motoru s měděnými tyčemi byly nastaveny materiály pro statorové vinutí „copper“ a pro tyče materiál „copper100“ s upravenou vodivostí mědi pro 100 °C. Pro plechy byl nastaven materiál M350-50A.

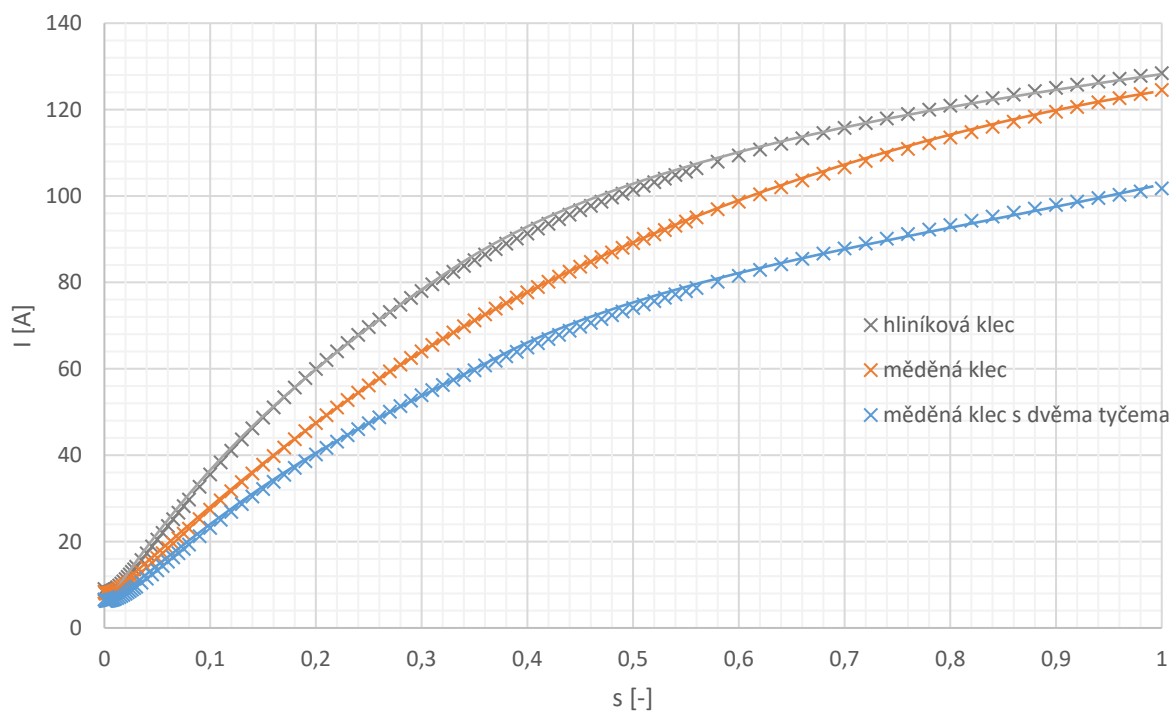
Pro návrh s dvěma tyčema byly nastaveny materiály pro statorové vinutí „copper“ a pro plechy materiál M470-50A. Vzhledem k možnostem modulu RMxpřt byla vodivost rotorových tyčí upravena, aby odpovídala skutečnému obsahu mědi.



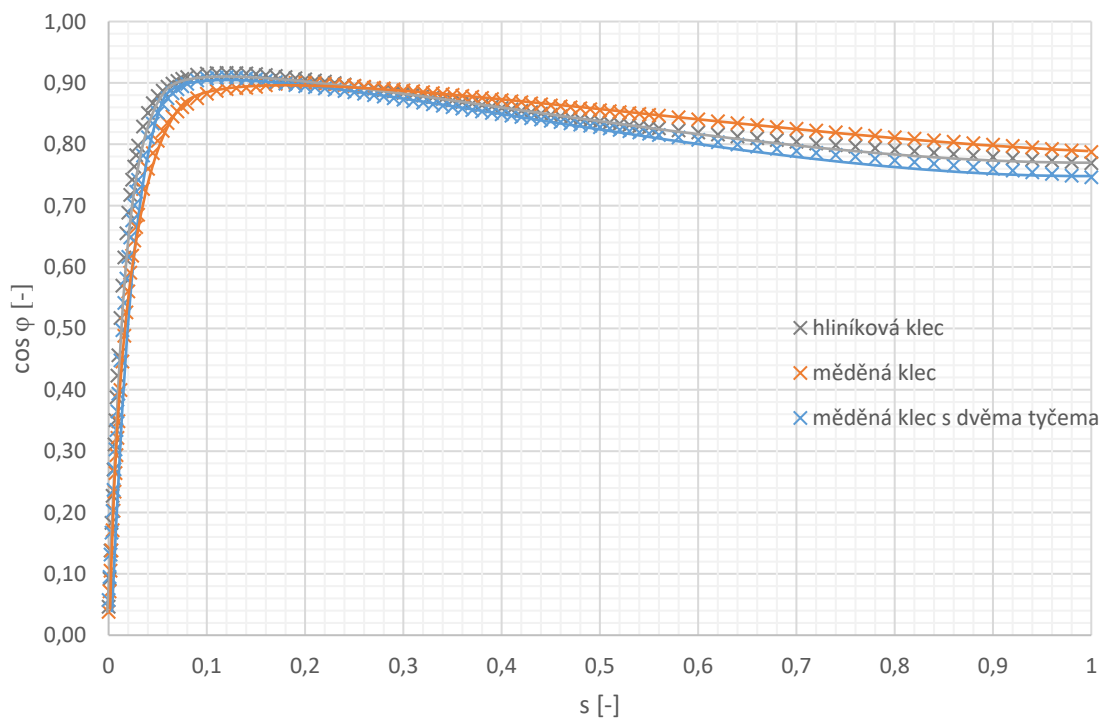
Obrázek 5-5 Rotorová drážka



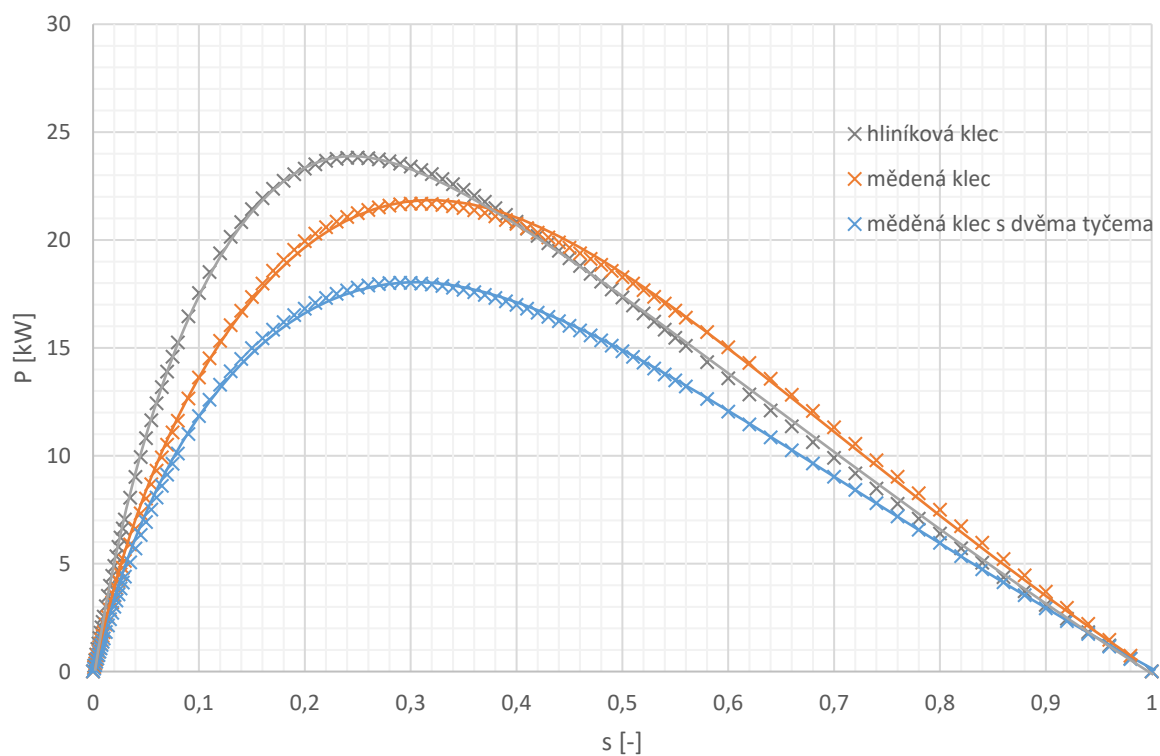
Obrázek 5-6 Momentová charakteristika



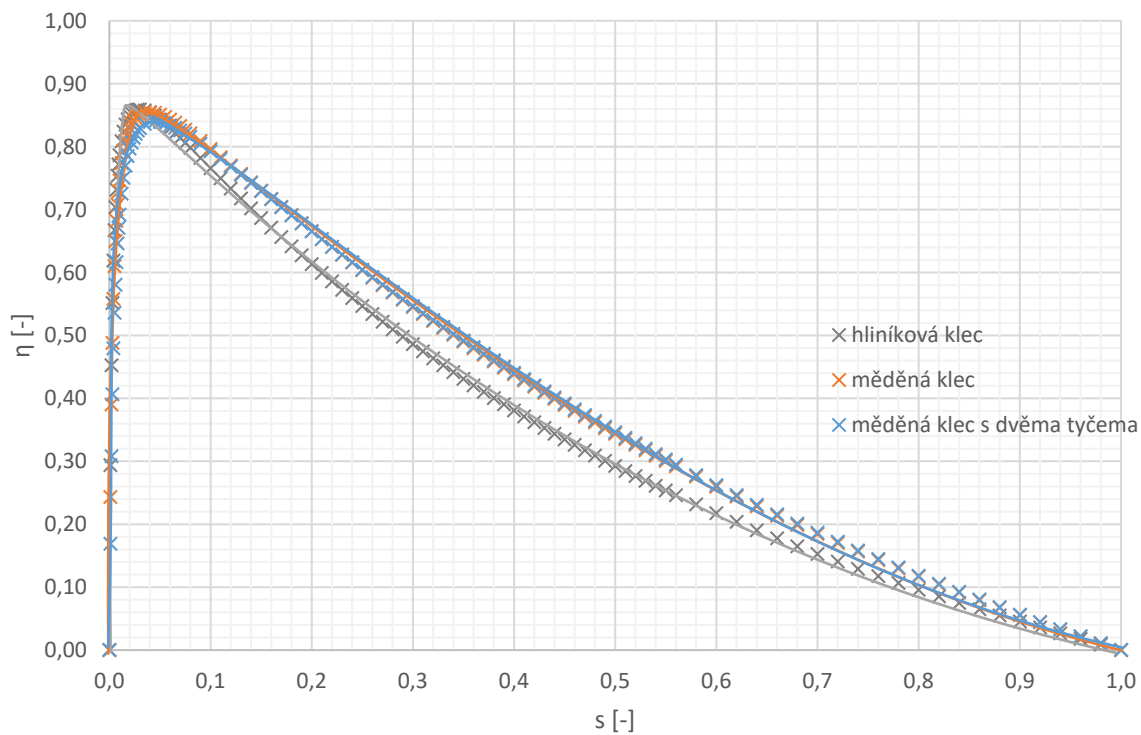
Obrázek 5-7 statorový proud ve fázi



Obrázek 5-8 účinník



Obrázek 5-9 Výkon



Obrázek 5-10 účinnost

Tabulka 5-1 Jmenovité hodnoty

	Hliníková klec	Měděná klec	Měděná klec s dvěma tyčema
Statorový proud (A)	14,84	15,11	14,28
Magnetizační proud (A)	7,78	8,16	5,99
Rotorový proud (A)	11,97	12,2	12,3
Proudová hustota ve statoru (A/mm ²)	8,39	8,55	8,11
Proudová hustota tyčích (A/mm ²)	3,23	8,32	6,8
Proudová hustota v kruhu (A/mm ²)	2,75	7,74	6,56
Magnetická indukce v zubu statoru (T)	1,54	1,6	1,48
Magnetická indukce v zubu rotoru (T)	1,66	2,12	1,66
Magnetická indukce ve jhu statoru (T)	1,34	1,2	1,35
Magnetická indukce ve jhu rotoru (T)	1,57	1,24	1,49
Magnetická indukce ve vzduchové mezeře (T)	0,728	0,75	0,78
odpor statorového vinutí (Ω)	0,78	0,775	0,77
rozptylová reaktance statoru (Ω)	0,62	0,714	0,89
odpor rotorové klece (Ω)	0,58	0,81	0,95
rozptylová reaktance rotoru (Ω)	1,22	0,89	1,3
ztráty ve statoru (W)	516,78	530,6	475,6
ztráty v rotoru (W)	249,67	363	437,7
ztráty v železe (W)	92	71	147
účinnost (-)	0,86	0,85	0,84
účinník (-)	0,81	0,81	0,86
jmenovitý moment (Nm)	44,84	44,69	44,71
jmenovité otáčky (min ⁻¹)	1596,84	1602,33	1601,54
jmenovitý skluz	0,0322	0,0462	0,055

Tabulka 5-2 Jmenovité hodnoty vypočtené MKP

	hliníková klec	měděná klec	měděná klec s dvěma tyčema
výkon (W)	7768,59	7660,57	7326,97
příkon (W)	8590,86	8595,2	8420,31
účinnost (-)	0,904	0,89	0,87
moment (Nm)	46,51	45,72	43,729

6 ZÁVĚR

Bakalářská práce se zabývá analytickým návrhem asynchronního motoru o výkonu 7,5 kW a otáčkách 1600 min^{-1} . Motor je určen jako pohon čerpadla. První část je věnována popisu funkce asynchronního motoru a jeho konstrukci. Další část je analytický výpočet asynchronního motoru proveden pomocí literatury [3]. Následně je proveden výpočet pomocí programu RMxprt. Na základě výsledků a požadavku na velikost motoru byly provedeny konstrukční úpravy.

Při analytickém výpočtu bylo odečítáno mnoho konstant na základě doporučení literatury. Tyto konstanty vzhledem k nestandardním rozměrům motoru, průměr statorového plechu 156 mm je nezvyklí pro motory o výkonu 7,5 kW, mohly být nepřesné a ovlivnit výsledky analytického výpočtu.

V první části výpočtu jsou určeny základní rozměry motoru. Počet statorových drážek, statorového vinutí a magnetické indukci ve vzduchové mezeře. Následně byly určeny rozměry rotorových drážek. V další části byla spočítána rotorová klec. Následně byly určeny magnetické napětí v částech motoru a určen magnetizační proud. Pro výpočet náhradního schématu byly určeny odpory a reaktance statorového vinutí a rotorové klece. Na základě těchto parametrů byly určeny rozběhové charakteristiky.

První návrh s hliníkovou klecí má axiální délku 290 mm. Výhoda asynchronního motoru s hliníkovou klecí spočívá v levné výrobě a možnosti navrhnout jakýkoli tvar rotorové drážky. Po úpravách stroje se délku podařilo snížit na 240 mm. Vzhledem ke zvětšení odporu rotorové klece motoru došlo ke zvýšení momentové přetížitelnosti. Zároveň díky použití kruhové profilu tyči klesla reaktance rotoru, a to vede k většímu maximálnímu momentu. Nevýhodou tohoto uspořádání je přesycování zubů rotoru, což vede k vyššímu magnetizačnímu proudu. Proto bylo přistoupeno na úpravu měděné klece a použití jiných elektrotechnických plechů. Díky tomu bylo dosaženo menšího magnetizačního proudu a zmenšení proudové hustoty ve vinutí. Avšak vzhledem ke tvaru drážky došlo ke zvětšení reaktance rotoru. To vedlo ke zmenšení maximálního momentu, ale zároveň tato úprava měla pozitivní vliv na zmenšení spouštěcího proudu. Nevýhodou motoru s měděnou klecí je větší náročnost při výrobě, což vede ke zvýšení ceny motoru.

Literatura

- [1] *Elektrické stroje*. Brno, 2016. Skriptum. FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.
- [2] JUCHELKA, R. Návrh asynchronního motoru pro kaskádní systém čerpání kapalin. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 65 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc..
- [3] KOPYLOV, I.P. *Stavba elektrických strojů: celostátní vysokoškolská učebnice pro elektrotechnické fakulty vysokých škol technických*. 1. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988, 688 s. ISBN 04-532-88.
- [4] MRAVEC, Rudolf. *Elektrické stroje a přístroje: I. Elektrické stroje*. 1. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1979, 432 s.
- [5] *Typical data for SURA M350-50A* [online]. Sweden, 2009 [cit. 2019-01-07]. Dostupné z: <https://cogent-power.com/cms-data/downloads/m350-50a.pdf>
- [6] *Typical data for SURA M470-50A* [online]. Sweden, 2008 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://cogent-power.com/cms-data/downloads/m470-50a.pdf>
- [7] FIŠER, J. Návrh a měření asynchronního motoru malého výkonu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 48 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martin Mach.

Seznam symbolů a zkratek

Zkratky:

FEKT ... Fakulta elektrotechniky a komunikačních
technologií

VUT ... Vysoké učení technické v Brně

Symbols:

A	lineární hustota proudu	(Am^{-1})
a	počet paralelních větví vinutí statoru	(-)
a_{kn}	radiální rozměr kruhu	(mm)
B_{δ}	magnetická indukce ve vzduchové mezeře	(T)
B_{j1}	magnetická indukce ve jhu statoru	(T)
B_{j2}	magnetická indukce ve jhu rotoru	(T)
B_{z1}	Magnetická indukce v zubu statoru	(T)
B_{z2}	Magnetická indukce v zubu rotoru	(T)
b_1	šířka drážky	(mm)
b_2	šířka drážky	(mm)
b_{kn}	axiální rozměr kruhu	(mm)
b_{z1}	rozměr statorového zubu	(mm)
b_{z2}	rozměr rotorového zubu	(mm)
c_{1pn}	činitel rozptylu	(-)
$\cos \varphi$	účinník	(-)
D	vnitřní průměr statoru	(mm)
D_e	vnější průměr statoru	(mm)
D_i	vnitřní průměr rotoru	(mm)
D_{kn}	střední průměr kruhu nakrátko	(mm)
D_2	vnější průměr rotoru	(mm)
F_m	napětí na jednu pólovou dvojici	(A)
f	frekvence napájecího napětí	(Hz)
h_d	hloubka drážky	(mm)
h_{j1}	statorové jho	(mm)
h'_{j2}	výpočtová výška jha rotoru	(mm)

I_{1N}	jmenovitý proud statoru	(A)
I_1	Statorový proud	(A)
I'_2	přepočtený rotorový proud	(A)
I_{2N}	jmenovitý proud rotoru	(A)
I_{kn}	proud v kruhu nakrátko	(A)
I_μ	magnetizační proud	(A)
i_μ	poměrná hodnota magnetizačního proudu	(-)
J_1	Proudová hustota ve vinutí	(Am ⁻²)
J_{kn}	Proudová hustota v kruhu	(Am ⁻²)
K_D	koeficient poměru průměru statoru	(-)
K_E	poměr indukovaného napětí ve statoru ku jmenovitému	(-)
k_B	činitel tvaru	(-)
k_c	carterův činitel	(-)
k_T	činitel plnění drážky	(-)
k_{v1}	činitel statorového jednovrstvého vinutí	(-)
k_z	činitel nasycení zubů	(-)
k_μ	činitel nasycení magnetického obvodu	(-)
L	celková délka vodičů	(-)
l_{av}	střední délka závitu vinutí	(m)
l_ξ	délka čela	(m)
l_{Fe}	délka statorového a rotorového svazku	(mm)
l_i	ideální délka vzduchové mezery	(m)
l_{j1}	délka střední magnetické indukční čáry	(mm)
M_{mech}	mechanický moment motoru	(Nm)
m	počet fází	(-)
m_{j1}	hmotnost jha statoru	(kg)
m_{z1}	hmotnost zubů statoru	(kg)
m_{j2}	hmotnost jha statoru	(kg)
m_{z2}	hmotnost zubů statoru	(kg)
N_1	počet závitů ve fázi vinutí	(-)
n	jmenovité otáčky	(min ⁻¹)
n_s	synchronní otáčky	(min ⁻¹)
P	jmenovitý výkon	(W)
P_i	vnitřní výkon stroje	(W)
p	počet pólových dvojic	(-)

p_i	činitel plnění proudu	(-)
Q_1	počet statorových drážek	(-)
Q_2	počet rotorových drážek	(-)
q	počet drážek na pól a fázi	(-)
R_1	odpor vinutí statoru	(Ω)
R_2	odpor vinutí rotoru	(Ω)
R_t	odpor tyče rotoru	(Ω)
R_{kn}	odpor kruhu nakrátko	(Ω)
S'_d	Plocha drážky pro vinutí	(mm^2)
S_{ef1}	průřez efektivního vodiče	(mm^2)
S_i	plocha drážkové izolace	(mm^2)
S_t	průřez rotorové tyče	(mm^2)
S_{kn}	příčný průřez kruhu	(mm^2)
s	skluz stroje	(-)
t_{d1}	drážková rozteč statoru	(mm)
t_{d2}	drážková rozteč rotoru	(mm)
t_p	krok pólové rozteče	(mm)
U_δ	magnetické napětí vzduchové mezery	(A)
U_{j1}	magnetické napětí jha statoru	(A)
U_{j2}	magnetické napětí jha rotoru	(A)
U_{z1}	magnetické napětí zubu statoru	(A)
U_{z2}	magnetické napětí zubu rotoru	(A)
V_d	počet paralelních vodičů v drážce	(-)
$X_{1\sigma}$	rozptylová reaktance statorového vinutí	(Ω)
$X_{2\sigma}$	rozptylová reaktance rotorového vinutí	(Ω)
X_{12}	magnetizační reaktance	(Ω)
X_{12n}	magnetizační reaktance při spouštění	(Ω)
ΔP_{Feh}	Hlavní ztráty v železe	(W)
$\Delta P_{\delta p2}$	povrchové ztráty v rotoru	(W)
ΔP_{p2}	pulsní ztráty v zubech rotoru	(W)
β_γ	činitel natočení drážek	(-)
δ	vzduchová mezera	(mm)
η	účinnost	(-)
λ_d	činitel magnetické indukce vodivosti drážky statoru	(-)
λ_ε	činitel magnetické vodivosti čel statoru	(-)

λ_{dif}	činitel magnetické vodivosti diferenčního rozptylu statoru	(-)
λ_{d2}	činitel magnetické indukce vodivosti drážky rotoru	(-)
λ_{e2}	činitel magnetické vodivosti čel rotoru	(-)
λ_{dif2}	činitel magnetické vodivosti diferenčního rozptylu rotoru	(-)
ϕ	magnetický tok	(Wb)
ω_s	synchronní rychlost	(rads ⁻¹)

Seznam příloh

1 Výpočet rozměrů	60
-------------------------	----

1 Výpočet rozměrů

Vd=16; %% počet vodiču v drážce
a=1; %% počet paralelních vinutí
m=3; %% počet fází
kv1=0.96; %% cinitel vinutí
kE=0.965; %%
U1n=230; %% nominalní napětí
Q1=36; %% počet drážek statoru
f1=55; %% frekvence napájení
D=0.09672; %% Vnitřní průměr statoru
De=0.156; %% vnější průměr statoru
li=0.240; %% délka železa
p=2; %% počet polových dvojic
q=Q1/(2*p*m); %% počet drážek na fázi
kFE=0.97; %% cinitel plnění železa
Bzav=1.6; %% maximální indukce zubu statoru
Bzav1=1.6;
Bj1=1.4; %% maximální indukce ve jhu
ho=0.0007; %% výška otevření
bo=0.0025; %% otevření drážky
di= 0.0015; %% průměr drátu
Q2= 26; %% počet rotorových drážek
delta= 0.0004; %% délka vzduchové mezery
I1N=14.528; %% jmenovitý proud
ki=0.89; %% cinitel ki
J2=8000000; %% proudová hustota

$h_0=0.0003$; %% odsazeni drazek rotoru
 $td_1=(\pi \cdot D)/(2 \cdot p \cdot m \cdot q)$; %% drazkova roztec
 $N_1=(V_d \cdot Q_1)/(2 \cdot a \cdot m)$; %% pocet zavitu na fazi
 $f_i=(k_E \cdot U_{1n})/(4.44 \cdot k_{v1} \cdot N_1 \cdot f_1)$; %% magneticky tok
 $B_{\Delta}=(p \cdot f_i)/(D \cdot l_i)$; %% indukce ve vzduchove mezere
 $b_z=(B_{\Delta} \cdot l_i \cdot td_1)/(B_{zav} \cdot l_i \cdot k_{FE})$; %% sirka zubu
 $h_{j1}=f_i/(2 \cdot B_{j1} \cdot l_i \cdot k_{FE})$; %% vyska statoroveho jha
 $h_d=((D_e - D)/2) - h_{j1}$; %% vyska statorove drazky
 $b_1=(\pi \cdot (D + 2 \cdot h_d) - Q_1 \cdot b_z)/(Q_1 + \pi)$; %% sirka drazky
 $b_2=(\pi \cdot (D + 2 \cdot h_o - b_o) - Q_1 \cdot b_z)/(Q_1 - \pi)$; %% sirka drazky
 $h_1=h_d - h_o - (b_2/2) - (b_2 - b_o)/2$; %% vyska drazky
 $S_i=(0.25 \cdot (2 \cdot h_d + b_2 + ((b_1 \cdot \pi)/2)))/1000$; %% obsah izolace
 $sd=((((b_1 + b_2)/2) \cdot h_1) + \pi \cdot ((b_2 \cdot b_2)/2)) - S_i$; %% obsah drazky
 $k_T=(d_i \cdot d_i \cdot V_d)/(sd)$ %% plneni drazky
 $D_2=D - 2 \cdot \Delta$; %% vnejsi prumer rotoru
 $td_2=(\pi \cdot D_2)/Q_2$; %% drazkova roztec rotoru
 $c_{Pi}=(2 \cdot m \cdot N_1 \cdot k_{v1})/26$; %% cinitel plneni proudu
 $I_2N=k_i \cdot I_1N \cdot c_{Pi}$; %% proud rotoru
 $st=I_2N/J_2$; %% prurez tyce
 $b_{zr}=(B_{\Delta} \cdot l_i \cdot td_2)/(B_{zav} \cdot l_i \cdot k_{FE})$; %% sirka zubu rotoru
 $b_{1r}=(\pi \cdot (D_2 - 2 \cdot h_0) - Q_2 \cdot b_{zr})/(\pi + Q_2)$; %% sirka drazky
 $b_{2r}=\sqrt{((b_{1r} \cdot b_{1r} \cdot ((Q_2/\pi) + (\pi/2)) - 4 \cdot st)/((Q_2/\pi) - (\pi/2)))}$; %% sirka drazky
 $h_{1r}=(b_{1r} - b_{2r}) \cdot (26/(2 \cdot \pi))$; %% vyska drazky
 $I_{kn}=I_2N/0.4786$; %% proud kruhem
 $J_{kn}=0.85 \cdot J_2$; %% proudova hustota kruhem
 $h_{dr}=h_{1r} + b_{1r}/2 + b_{2r}/2$; %% vyska drazky
 $S_{kn}=I_{kn}/J_{kn}$; %% obsah kruhu
 $b_{kn}=h_{dr} \cdot 1.25$; %% vyska kruhu
 $a_{kn}=S_{kn}/b_{kn}$; %% sirka kruhu