



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

NÁVRH SYNCHRONNÍHO STROJE S VNOŘENÝMI MAGNETY

DESIGN OF INTERIOR PERMANENT MAGNET MACHINE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Kristián Kuna

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Bárta, Ph.D.

BRNO 2018



Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**
Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Kristián Kuna

ID: 186440

Ročník: 3

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Návrh synchronního stroje s vnořenými magnety

POKyny PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Na základě literární rešerše popište synchronní stroje s vnořenými magnety.
2. Popište postup návrhu strojů s vnořenými magnety.
3. Vytvořte program v MATLAB pro elektromagnetický návrh synchronního stroje s vnořenými magnety dle požadovaných parametrů.
4. Parametry navrženého stroje ověřte v RMxprt a ANSYS Maxwell.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] J. Pyrhonen, J. Jokinen, V. Hrabovcova "Design of Rotating Electrical Machines" John Wiley & Sons, Ltd, 2008. 512 s. ISBN 978-0-470-69516-6(H/B)
- [2] A. E. Fitzgerald, Ch. Kingsley, S. Umans "Electric Machinery", McGraw-Hill Companies Inc., 2003. 688 s. ISBN 0-07-112193-5
- [3] Juha Pyrhonen, Valeria Hrabovcova, R. Scott Semken „Electrical Machine Drives Control: An Introduction“ Wiley, November 2016, ISBN: 978-1-119-26045-5

Termín zadání: 5.2.2018

Termín odevzdání: 28.5.2018

Vedoucí práce: Ing. Jan Bárta, 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.

Bibliografická citácia práce:

KUNA, K. Návrh synchronného stroja s vnorenými magnetmi. Brno: Vysoké učení technické v Brne, Fakulta elektrotechniky a komunikačných technológií, 2018. 50 s. Vedúci bakalárskej práce Ing. Jan Bárta, Ph.D.

„Vyhlasujem, že svoju bakalársku prácu na téma Návrh synchronného stroja s vnorenými magnetmi som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho bakalárskej práce a s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce. Ako autor uvedenej bakalárskej práce ďalej vyhlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto bakalárskej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, predovšetkým som nezasiahol nepovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovení § 11 a nasledujúcich autorského zákona č. 121/2000 Sb., vrátane možných trestnoprávných dôsledkov plynúcich z ustanovení časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákonníku č. 40/2009 Sb.“

V Brne, dňa 23.05.2018

.....

ABSTRAKT

Pre rozvoj synchrónnych strojov s permanentnými magnetmi bol kľúčový vývoj výkonovej elektroniky, zlepšovania ich parametrov, ale aj zvýšenie dostupnosti permanentných magnetov. Cieľom tejto práce je porovnať rôzne topológie rotora u synchrónnych strojov s vnorenými permanentnými magnetmi a vypracovať základný elektromagnetický návrh synchrónneho stroja s vnorenými permanentnými magnetmi.

KLÚČOVÉ SLOVA:

Synchrónne stroje, Synchrónne stroje s vnorenými permanentnými magnetmi, Topológia rotora, Elektromagnetický návrh stroja

ABSTRACT

For the development of synchronous machines with permanent magnets were essential the development of power electronics, improvement of the parameters, as well as the increase of the availability of permanent magnets. The purpose of this thesis is to compare the different rotor topologies in synchronous machines with inside permanent magnets and to develop the basic electromagnetic design of synchronous machine with inside permanent magnets.

KEY WORDS:

Synchronous machines, Synchronous machines with inside permanent magnets, Topology of rotor, Electromagnetic design of machine

Pod'akovanie:

Touto cestou by som rád veľmi pekne pod'akoval svojmu vedúcemu bakalárskej práce - pánovi Ing. Janovi Bártovi, Ph.D., za odborné vedenie bakalárskej práce, trpezlivosť, rozsiahle konzultácie, ako aj odborné poznámky a podnetné myšlienky pri písaní tejto bakalárskej práce.

V Brne, dňa 23.05.2018

.....
podpis autora

OBSAH

I.ZOZNAM OBRÁZKOV	8
II.ZOZNAM TABULIEK.....	9
III. ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK.....	10
1ÚVOD	12
2SYNCHRÓNNE STROJE S PERMANENTNÝMI MAGNETY.....	13
2.1 PRINCÍP ČINNOSTI.....	14
2.2 POPIS STROJA V USTÁLENOM STAVE.....	14
2.3 POROVNANIE DRUHOV IPM STROJA	17
2.3.1 DRUHY ROTOROV POUŽÍVANÉ PRE IPM STROJE.....	17
2.3.2 POROVNANIE IPM STROJA PODĽA DRUHU VINUTIA.....	18
2.3.3 POROVNANIE PREVÁDZKOVÝCH VLASTNOSTÍ IMP STROJOV.....	19
2.3.4 POUŽÍVANÉ PREVEDENIE STROJOV S VNÚTORNÝMI MAGNETY	19
3ANALYTICKÝ NÁVRH STROJOV S IPM.....	21
3.1 METODOLÓGIA ELEKTROMAGNETICKÉHO NÁVRHU	21
3.2 ELEKTROMAGNETICKÝ NÁVRH.....	21
4NÁVRH STROJA	27
4.1 NÁVRH STROJA V MATLABE	27
5OVERENIE PARAMETROV NAVRHNUTÉHO STROJA.....	30
5.1 OVERENIE V RMXprt	30
5.2 ANSYS MAXWELL PARAMETRE	32
6ZÁVER.....	43
7LITERATÚRA.....	45
PRÍLOHY.....	47

I. ZOZNAM OBRÁZKOV

OBRÁZOK Č. 2.2: NÁHRADNÉ SCHÉMA STROJA [4]	15
OBRÁZOK Č. 2.3: FÁZOROVÝ DIAGRAM, MOTOROVÝ REŽIM [1].....	17
OBRÁZOK Č. 2.4: DRUHY TOPOLOGIE ROTORA	17
OBRÁZOK Č. 4.1: POČIATOČNÝ VÝPOČET ROTORA STROJA	28
OBRÁZOK Č. 4.2: DOPOČÍTANÉ ROZMERU DRÁŽKY	29
OBRÁZOK Č. 4.3: VÝPOČET VÝŠKY PM.....	29
OBRÁZOK Č. 5.1: GEOMETRIA STROJA RMXPRT.....	30
OBRÁZOK Č. 5.2: VINUTIE STROJA A ZAPOJENIE JEDNEJ FÁZY	31
OBRÁZOK Č. 5.3: CELÝ MODEL NAVRHOVANÉHO IPM STROJA.....	33
OBRÁZOK Č. 5.4: KONEČNO-PRVKOVÁ SIEŤ NAVRHOVANÉHO IPM STROJA	33
OBRÁZOK Č. 5.5: DETAIL VZDUCHOVEJ MEDZERY.....	34
OBRÁZOK Č.5.6: MAGNETICKÁ INDUKCIA A INDUKČNÝ TOK V STAVE NAPRÁZDNO ..	34
OBRÁZOK Č. 5.7: INDUKOVANÉ NAPÄTIE V TROCH FÁZACH	35
OBRÁZOK Č. 5.8: NORMÁLOVÁ ZLOŽKA MAGNETICKEJ INDUKCIE UPROSTRED VZDUCHOVEJ MEDZERY	36
OBRÁZOK Č.5.9: NORMALIZOVANÝ HARMONICKÝ OBSAH NORMÁLOVEJ ZLOŽKY MAGNETICKEJ INDUKCIE UPROSTRED VZDUCHOVEJ MEDZERY	36
OBRÁZOK Č. 5.10: ZÁVISLOSŤ VÝKONU NA UHLE NATOČENIA	37
OBRÁZOK Č. 5.11: ZÁVISLOSŤ MOMENTU NA UHLE NATOČENIA	38
OBRÁZOK Č. 5.12: MAGNETICKÁ INDUKCIA A INDUKČNÝ TOK V ZAŤAŽENOM STAVE	38
OBRÁZOK Č. 5.13: PREHĽAD STRÁT V ČASE.....	39
OBRÁZOK Č. 5.14: FÁZOROVÝ DIAGRAM NAVRHOVANÉHO STROJA.....	41

II. ZOZNAM TABULIEK

TABUĽKA Č. 1: POROVNANIE STROJOV P=4, SV [6]	18
TABUĽKA Č. 2: POROVNANIE STROJOV P=4, RV [6].....	19
TABUĽKA Č. 3: POŽADOVANÉ HODNOTY IPM STROJA	27
TABUĽKA Č. 4: VYPOČÍTANÉ HODNOTY V MATLABE.....	28
TABUĽKA Č. 5: VYPOČÍTANÉ HODNOTY STROJA PRI PLNOM ZAŤAŽENÍ	31
TABUĽKA Č. 6: HODNOTY MAGNETICKÝCH INDUKCIÍ V STAVE NAPRÁZDNO	32
TABUĽKA Č. 7: NAMERANÉ HODNOTY INDUKCIE V STAVE NAPRÁZDNO	35
TABUĽKA Č. 8: NAMERANÉ HODNOTY INDUKCIE V ZAŤAŽENOM STAVE	39
TABUĽKA Č. 9: STRATY V ZAŤAŽENOM STAVE.....	40
TABUĽKA Č. 10: PREPOČÍTANÉ HODNOTY DO D A Q OSY	41
TABUĽKA Č. 11: VÝSLEDKY V ZAŤAŽENOM STAVE	41

III. ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK

Značka	Veličina
h_{PM}	Výška permanentných magnetov
h_{yr}	Magnetická sila poľa v rotorovom jarme
h_{ys}	Magnetická sila poľa v statorovom jarme
$L_{s\sigma}$	Rozptylová indukčnosť statora
Ψ_{PM}	Zpriahnutý magnetický tok permanentných magnetov
Ψ_d	Zpriahnutý magnetický tok v pozdĺžnej ose
Ψ_q	Zpriahnutý magnetický tok v priečnej ose
Ψ_{sd}	Zpriahnutý magnetický tok statora v pozdĺžnej ose
Ψ_{sq}	Zpriahnutý magnetický tok statora v priečnej ose
A_a	Intenzita prúdu
B_{PM}	Intenzita toku permanentných magnetov
B_{max}	Maximálna intenzita toku
B_{ys}	Intenzita toku v jarme statora
B_δ	Maximálna hodnota intenzity toku
D_r	Optimálna hrúbka rotora
D_s	Optimálna hrúbka statora
H_c	Koercitívna sila
L_d	Pozdĺžna indukčnosť
L_{md}	Magnetizačná indukčnosť v pozdĺžnej ose
L_q	Priečna indukčnosť
M_r	Potrebný moment stroja
N_{ph}	Počet závitov
R_D	Odpor vinutia v pozdĺžnej ose
R_F	Odpor budiaceho vinutia
R_Q	Odpor vinutia v priečnej ose
R_s	Odpor statora
U_{ib}	Vnútorne budiace napätie
U_{ph}	Napätie vo fáze
U_s	Fázor statorového napätia
V_r	Objem rotora
X_d	Reaktancia v pozdĺžnom smere
X_q	Reaktancia v priečnom smere
i_D	Prúd vinutím v pozdĺžnej ose
i_F	Budiaci prúd
i_{PM}	Prúd vytvorený permanentnými magnetmi
i_Q	Prúd vinutím v priečnej ose

i_d	Prúd statora v pozdĺžnej ose
i_q	Prúd statora v priečnej ose
k_{Fe}	Faktor zaplnenia lamináciou
k_{wp}	Faktor vinutia
l_s	Dĺžka statora
u_F	Napätie na budiacom vinutí
u_d	Napätie statora v pozdĺžnej ose
u_q	Napätie statora v priečnej ose
w_{PM}	Konečná hrúbka permanentných magnetov
Z_{Qs}	Počet drážok vodičov
α_{PM}	Skutočná hrúbka magnetov
α_δ	Efektívna hrúbka magnetov vo vzduchovej medzere
σ_{Ftan}	Tangenciálne napätie
τ_p	Pólový rozostup
ϕ_{PM}	Magnetický tok permanentných magnetov
ϕ'_{PM}	Celkový magnetický tok permanentných magnetov
$\phi_{leak,br}$	Straty toku v stroji
ϕ_δ	Magnetický tok vo vzduchovej medzere
a	Počet paralelných vetví fáze
$\cos\phi$	Účinník
emf E_f	Elektromotorická sila
emf E_m	Elektromotorická sila vo vzduchovej medzere
IPM	Synchrónne stroje s permanentnými magnetmi vnorenými v rotore
L	Dĺžka rotora
l'	Uvažovaná dĺžka rotora
m	Počet fáz
n	Počet otáčok
p	Počet pólov
P	Výkon
PM	Permanentné magnety
Q_s	Počet drážok statora
SPM	Synchrónne stroje s permanentnými magnetmi na povrchu rotora
SSPM	Synchrónne stroje s permanentnými magnetmi
U	Napätie
δ	Zaťažovací uhol
η	Účinnosť
ω	Okamžitá hodnota uhlovej rýchlosti
σ	Veľkosť vzduchovej medzery
v	Zaťažovací uhol

1 ÚVOD

Dlhú dobu boli v oblasti pohonov s regulovanými otáčkami jednosmerné stroje väčšinou skupinou, a to predovšetkým kvôli ľahkému regulovaniu ich otáčok, ako aj jednoduchosti odbudzovania a možnosti priameho pripojenia na batériu.

Tieto stroje však majú aj svoje značné nevýhody, ktoré sú spôsobené komutátorom, v rámci ktorého mimo iné vznikajú straty spôsobené dosadajúcimi uhlíkovými kefami. Uhlíky sa pri využívaní stroja obrusujú a vzniká jemný prach, ktorý sa usadzuje v stroji, čo zapríčiňuje potrebu pravidelnej údržby stroja. Kvôli nevyhnutnosti pravidelnej údržby stroja potom súčasne vznikajú aj ďalšie náklady spojené najmä s prevádzkou a výmenou opotrebovaných súčiastok, čím sa celý stroj značne predražuje.

Postupom času rozvoj výkonovej elektroniky, zlepšovanie jej parametrov, znižovanie ceny, ale aj väčšia dostupnosť permanentných magnetov (PM) s veľkou magnetickou hustotou, viedli k širšiemu využitiu synchrónnych strojov s permanentnými magnetmi. K prudkému vývoju synchrónnych strojov s permanentnými magnetmi ďalej pomohla aj súčasná informovanosť o zmenšujúcich sa zásobách fosílnych palív, ako aj snaha o vývoj efektívnejších dopravných prostriedkov s nižšou spotrebou paliva a zachovaním komfortu cestujúcich.

V súčasnej dobe sa ďalej zvyšuje záujem o elektrické pohony aj ako alternatívu pre motory spaľovacie. Mimo iné aj tento fakt vedie k potrebe hlbšieho preskúmania synchrónnych strojov s PM a ich rozširujúceho využitia v rôznych druhoch rozvíjajúceho sa priemyslu.

Táto práca sa zameriava na synchrónne stroje s vnorenými permanentnými magnetmi (IPM), ako aj na ich porovnanie so synchrónnymi strojmi s PM na povrchu.

Práca je štruktúrne rozdelená na dve separátne časti, a to časť teoretickú a praktickú. Teoretická časť sa zaoberá poznatkami o synchrónnych strojoch s vnútornými magnetmi, ako aj teoretickým postupom, ktorý sa bežne používa pri navrhovaní týchto druhov strojov. V praktickej časti je potom vytvorený samostatný návrh synchrónneho stroja s vnútornými magnetmi.

Cieľom tejto práce je zhrnúť poznatky o synchrónnych strojoch s vnorenými magnetmi, ako aj navrhnúť funkčný synchrónny stroj s vnorenými magnetmi pomocou počítačových modelov, ktoré budú následne overené pomocou počítačových programov Ansys Maxwell a RMXprt.

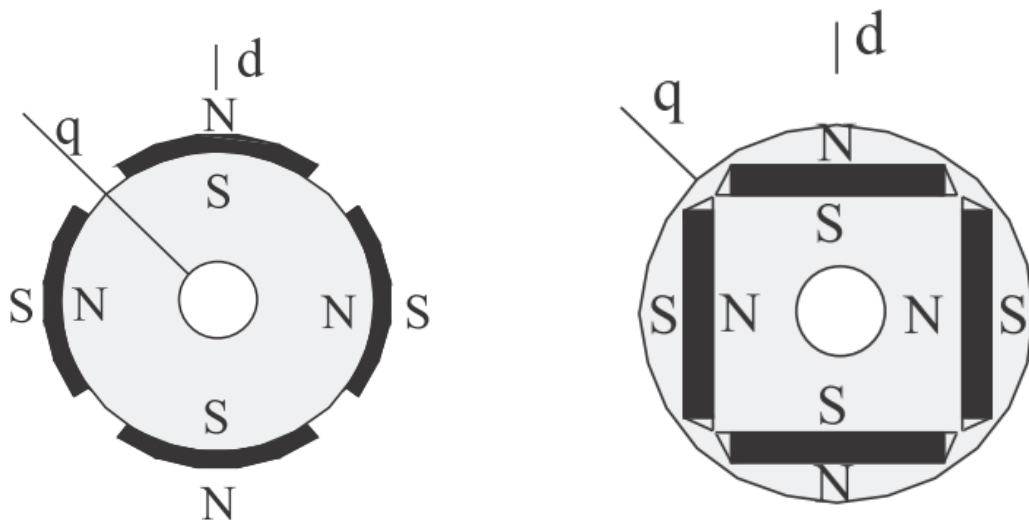
2 SYNCHRÓNNE STROJE S PERMANENTNÝMI MAGNETY

Názov synchronné stroje bol odvodený od ich rotora, ktorý sa otáča rovnakou, teda synchronnou rýchlosťou ako točivé magnetické pole statora [1].

Synchronné stroje zahŕňajú celú rodinu elektrických strojov, a to samostatne budených synchronných strojov, reluktančných synchronných strojov a synchronných strojov s permanentnými magnetmi (SSPM) [2].

V posledných rokoch sa synchronné stroje s PM tešia zvlášť veľkej pozornosti. Používajú sa v pohonoch automobilov, lietadiel, ale aj ako generátory na výrobu elektrickej energie. Stator SSPM má často trojfázové vinutie striedavého stroja. Rotorové magnetické pole je budené pomocou PM a tým, že má stroj budiace vinutie nahradené PM nevznikajú straty budiaceho vinutia, čo pomáha zvýšiť účinnosť stroja [1].

Stroje s permanentnými magnetmi môžeme rozdeliť na stroje s PM na povrchu a na stroje s vnútornými PM.



Obrázok č. 2.1: Synchronné stroje - na ľavej strane s PM na povrchu, na pravej strane s vnútornými PM [1]

Povrchové usporiadanie PM (SPM, vid'. Obrázok č. 2.1 - ľavá strana) možno považovať za typ s nevyjadrenými pólmi, a to kvôli tomu, že existuje veľká vzduchová medzera a vplyv reakcie kotvy na tok pólu je veľmi malý. PM u tohto typu stroja sú umiestnené na povrchu rotora, teda vo vzduchovej medzere, ktorá predstavuje materiál s permeabilitou skoro v ideálnom prípade rovnou permeabilite vákua μ_0 . Presná permeabilita sa dá určiť podľa druhu a kvality PM [1]. Celú vzduchovú medzeru vrátane PM tak možno považovať za homogénny priestor s celkovou permeabilitou μ_0 , teda možno považovať tento typ stroja za stroj s hladkým rotorom (resp. s nevyjadrenými pólmi).

IPM usporiadania rotora sa považuje za usporiadanie s vyjadrenými pólmi, a preto je celkový moment súčtom budiaceho momentu a reluktančného momentu [2].

$$M_c = 3 * \frac{1}{\omega} * \left(\frac{U_s * U_{ib}}{X_d} * \sin(v) + U_s^2 * \frac{X_d - X_q}{2 * X_d * X_q} * \sin(2 * v) \right) \quad (2.1)$$

Rozvoj vysoko pevnostných magnetov, ako napríklad neodýmovo-železo-bórové (NdFeB) magnety, ktoré sa začali vyrábať už v 80. rokoch, pomohli aj rozvoju synchronných strojov. Z týchto magnetov sa môžu vytvoriť rôzne druhy neodýmových magnetov, v rôznych prevedeniach, tak aby sme dostali požadované výstupy na silu magnetov, ich cenu a možnosť ich vyrábať vo veľkom množstve. Neodým (Nd) je jeden z rodiny vzácnych materiálov na zemi a približne polovica jeho celosvetových zásob sa nachádza v Číne [2].

Vďaka tomu, že sa permanentné magnety nachádzajú v rotore, rotor poskytuje mechanickú ochranu pre PM, ktorá je dôležitejšia akoby sa mohlo na prvý pohľad zdať, pretože materiály, z ktorých sú PM vyrábané sú menej odolné ako laminovaná oceľ, ktorá ich obklopuje [3].

Podľa spôsobu usporiadania PM môžeme rozdeliť synchronne stroje na viacero druhov. K jednotlivým druhom synchronných strojov sa budeme bližšie zaoberať v kapitole 2.3 tejto práce.

Kvôli štruktúre rotora u IPM stroja je vzduchová medzera rozdielna v pozdĺžnej a priečnej ose (pozdĺžna osa d a priečna osa q). Ako dôsledok štruktúry rotora je magnetická anizotropia rovná obvodu synchronnej indukčnosti stroja. Indukčnosti IPM stroja sú odlišné v pozdĺžnej a priečnej ose [1].

2.1 Princíp činnosti

U synchronného stroja je stator takmer rovnaký ako u asynchronného stroja, to znamená, že na stator je privedené vo väčšine prípadov trojfázové vedenie a na rotore sú v tomto prípade umiestnené v určitom usporiadaní PM. Keď začne tiecť trojfázový prúd do statora, začne stator indukovať točivé magnetické pole a vďaka tomu sa pomocou PM v rotore rotor roztočí. Otáčky rotora a otáčky magnetického poľa statora budú zhodné, to znamená, že budú synchronne.

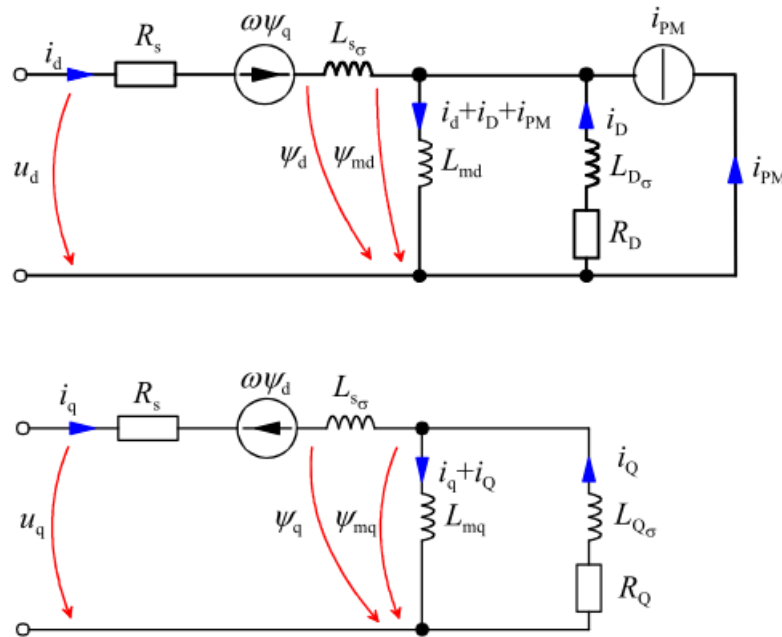
2.2 Popis stroja v ustálenom stave

Synchronne stroje s vyjadrenými pólmi sa dajú popísať pomocou obvodov v d a q ose, a to z dôvodu magnetickej asymetrie. Mnohokrát sú parametre synchronných strojov dané priamo od výrobcu, ale v prípade, že tieto k dispozícii nie sú, dajú sa získať aj prostredníctvom meraní. Parametre týchto strojov sa však nedajú využiť pri návrhu ich náhradného obvodu. Hodnoty potrebné na vytvorenie náhradného obvodu stroja sú určené pomocou série metód za rešpektovania rôznych magnetický stavov stroja. Napríklad pozdĺžna indukcia synchronného stroja sa určí v prevádzke bez záťaže a synchronná indukčnosť je vyjadrená ako súčet magnetizačnej indukcie v pozdĺžnej ose L_{md} a rozptylovej indukčnosti statora $L_{s\sigma}$ [1].

$$L_d = L_{md} + L_{s\sigma} \quad (2.2)$$

Na druhej strane sa priečna indukcia určuje za prevádzky pod záťažou (záťaž sa mení). V priečnej ose synchronná indukčnosť zodpovedá súčtu magnetizačnej indukčnosti v priečnej ose L_{mq} a rozptylovej indukčnosti zo statora $L_{s\sigma}$ [4].

Rovnako ako u samostatne budených synchronných strojov, tak aj u synchronných strojov s PM sa používa skoro rovnaké schéma zapojenia. Hlavne sa poukazuje na rotor v d a q ose.



Obrázok č. 2.2: Náhradné schéma stroja [4]

Permanentné magnety môžu byť zobrazené pomocou prúdového zdroja i_{pm} v obvode rotora. V magnetizačnej indukčii spomínaný zdroj prúdu vytvára podiel zpriahnutého magnetického toku permanentných magnetov vo vzduchovej medzere.

$$\psi_{PM} = i_{PM} * L_{md} \quad (2.3)$$

Ak sa nachádza v modely tlmiace vinutie, tak sa napäťová rovnica PM strojov mení oproti strojom so samostatným budením, a to kvôli tomu, že rovnica poľa vinutia sa neuvažuje [4].

Napäťové rovnice v strojoch s PM sú uvádzané v rotorových súradniciach:

$$u_{sd} = R_s * i_{sd} + \frac{d\psi_{sd}}{dt} - \omega * \psi_{sq} \quad (2.4)$$

$$u_{sq} = R_s * i_{sq} + \frac{d\psi_{sq}}{dt} + \omega * \psi_{sd} \quad (2.5)$$

$$0 = R_D * i_D + \frac{d\psi_D}{dt} \quad (2.6)$$

$$0 = R_Q * i_Q + \frac{d\psi_Q}{dt} \quad (2.7)$$

Zpriahnutý magnetický tok v častiach IPM stroja je definovaný podľa rovníc:

$$\psi_{sd} = L_{sd} * i_{sd} + L_{md} * i_D + \psi_{PM} \quad (2.8)$$

$$\psi_{sq} = L_{sq} * i_{sq} + L_{mq} * i_Q \quad (2.9)$$

$$\psi_{sq} = L_{sq} * i_{sq} + L_{mq} * i_Q \quad (2.10)$$

$$\psi_Q = L_{mq} * i_{sq} + L_Q * i_Q \quad (2.11)$$

V publikácií [4] je uvedená rovnica momentu pre synchronne stroje v tomto tvare:

$$M = \frac{3}{2} * p * (\psi_d * i_q - \psi_q * i_d) = \frac{3}{2} * p [(L_d - L_q) * i_d * i_q + \psi_{PM} * i_q] \quad (2.12)$$

Rovnica vychádza z takzvaného princípu kríženia polí, ktorý je bližšie popísaný v publikácií [4]. Taktiež je táto rovnica takmer zhodná so samostatne budenými synchronnými strojmi.

Pokiaľ budeme uvažovať, že rozdiel indukcií v pozdĺžnej a priečnej ose je rovný nula ($L_d - L_q = 0$), tak sa výpočet krútiaceho momentu zjednoduší na:

$$M = \frac{3}{2} * p * \psi_{pm} * i_q \quad (2.13)$$

Z vyššie uvedenej rovnice vyplýva, že na zvýšenie momentu M sa používa prúd v priečnej ose i_q . Prúd v pozdĺžnej ose i_d nám bude vytvárať straty vo vinutí.

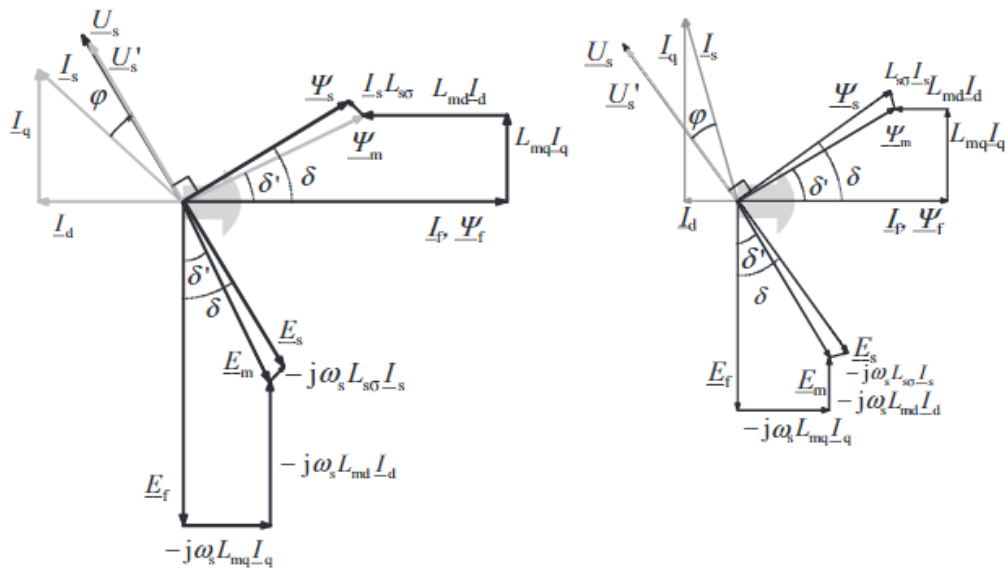
Krútiaci moment je tvorený pomocou štyroch pravidiel, a to vzhľadom k princípu kríženia polí. Prvé pravidlo je najdôležitejšie a často je aj jediným pravidlom, na ktorom v strojoch s PM záleží. Je to pravidlo, ktoré závisí na zpriahnutom magnetickom toku permanentných magnetov a na kolmici statorového prúdu na tento magnetický tok. Druhé pravidlo vychádza z rozdielu indukcií a má veľký dopad v strojoch, ktoré majú veľký rozdiel indukciách v d a q ose [4].

Uvedené pravidlá záležia na tlmiacom prúde, sú výrazné iba na krátky čas a prejavia sa iba v strojoch, v ktorých sa tlmiaci prúd môže vyskytovať. Krútiaci moment sa požíva ako začiatkový bod pre vývoj kontrolných princípov pre stroje s PM [5].

Statorový prúd v IPM stroji sa skladá z dvoch častí. Prvá časť je prúd v pozdĺžnej ose a druhá časť prúd v priečnej ose.

Na obrázku 2.3 je nakreslený fázorový diagram prebudeneho synchronného motora s vyniknutými pólmi. Uhol δ sa nachádza medzi emf E_f a vzduchovou medzerou emf E_m alebo medzi zpriahnutým magnetickým tokom vinutia a zpriahnutým magnetickým polom vzduchovej medzery. Tomuto uhlu hovoríme vnútorný zaťažovací uhol. Rovnakým spôsobom uhol medzi emf E_f a emf E_s alebo medzi zpriahnutým magnetickým tokom vinutia ψ_f a zpriahnutým magnetickým tokom statora ψ_s . Tomuto uhlu sa hovorí uhol zaťažovací.

Čím väčšie sú uhly, tým väčší je moment, ktorý môže synchronný stroj vyprodukovať. Tento moment môže narastať až dovtedy, do kým neprekročí bod zvratu [1]. Napätie U_s vytvára zpriahnutý tok v statore. Prúdy v stroji sa musia prispôbiť tak, aby vytvárali rovnaký zpriahnutý tok v statore. Pod týmto fázorovým diagramom tak môžeme rozumieť to, že stroj pracuje v motorovom režime a jeho zpriahnutý magnetický tok v statore je daný integrálom napätia a prúdu. Napätie a prúd musia byť prispôsobené k tomuto zpriahnutému magnetickému toku [3].

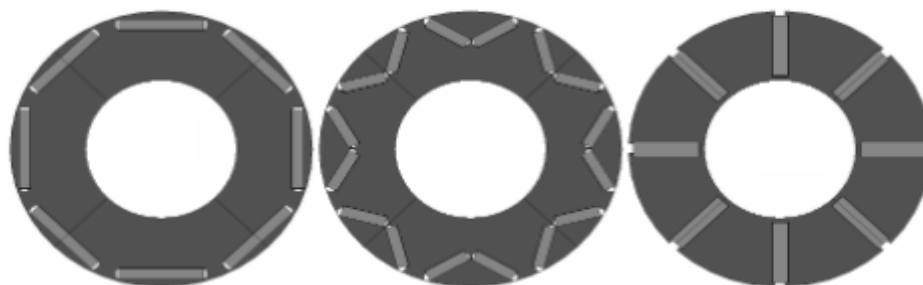


Obrázok č. 2.3: Fázorový diagram, motorový režim [1]

2.3 POROVNANIE DRUHOV IPM STROJA

2.3.1 Druhy rotorov používané pre IPM stroje

Stroj s vnútornými PM môžeme podľa usporiadania PM v rotore rozdeliť na 3 základné typy rotorov, a to na I-tvar (viď. obrázok č. 2.4 a)), V-tvar (viď. obrázok č. 2.4 b)) a Tok-koncentrujúci rotor (viď. obrázok č. 2.4 c)).



a)

I-tvar PM v rotore

b)

V-tvar PM v rotore

c)

Tok-koncentrujúci rotor

Obrázok č. 2.4: Druhy topológie rotora

Za predpokladu, že chceme využiť synchronný stroj s permanentnými magnetmi, napríklad ako pohon automobilu, tak vonkajší parameter stroja je pevne daný, a to z dôvodu kapacity priestoru v automobile. Priestor k úpravám sa ale nachádza aj v rotore stroja, kde môžeme upravovať napríklad počet pólových dvojíc alebo typ vinutia [6].

U stroja s vnorenými permanentnými magnetmi má počet pólových dvojíc vplyv na samotné rozmery rotora, a tak môže ovplyvňovať aj rozmery stroja, a to za predpokladu použitia analytického návrhu stroja. To znamená, že pomocou zvyšovania počtu pólov môžeme dosiahnuť zvýšenie generovanej sily motora a zároveň to má dopad aj na rozmery statorového jarma, pričom konce vinutia súčasne zaberajú menej priestoru. Nesmieme však zabúdať ani na skutočnosť, že s rastúcim počtom pólov nám klesá hrúbka magnetov a zároveň nám narastá hodnota magnetického rozptylu [6].

2.3.2 Porovnanie IPM stroja podľa druhu vinutia

V tejto časti práce porovnáme 2 typy vinutia, a to sústredné vinutie (SV) a rozložené vinutie (RV). Každé vinutie má svoje výhody, ale aj nevýhody. Sústredné vinutie znižuje rozmery koncov cievok a zlepšuje aktívnu dĺžku stroja. Hustota výkonu je u sústredného vinutia vyššia než u vinutia rozloženého. Ďalej sústredné vinutie zvyšuje koeficient plnenia medi, a to až do 70 %. Taktiež je lepšie prispôsobiteľné pre automatickú výrobu z dôvodu vodičov v tvare obdĺžniku a predtvarovaných závitov. Nevýhodou sústredného vinutia je aj skutočnosť, že straty v železe dosahujú značne vyšších hodnôt, obzvlášť straty spôsobené vírivými prúdmi.

Rozložené vinutie poskytuje lepší činiteľ vinutia než u stroja s použitím sústredného vinutia. Stroje s rozloženým vinutím potrebujú menší počet závitov, avšak ich konce vinutia zaberajú viac miesta, a z toho dôvodu vinutie dosahuje väčšieho objemu. Taktiež u rozloženého vinutia klesá činiteľ plnenia medi a z toho dôvodu rastú odporové straty.

V tabuľke č. 1 sú uvedené porovnania rôznych prevedení IPM stroja, ale aj porovnanie stroja s permanentnými magnetmi na povrchu rotora (SM-SSPM) za použitia sústredného vinutia.

	SM-SSPM p=4	I-SSPM p=4	VI-SSPM p=4	Tok-SSPM p=4
Parameter statora [mm]	270	270	270	270
Parameter rotora [mm]	75	75	80	85
Max. preťažiteľnosť	2	2	2	2
Max. moment [Nm]	398	387	386	316
Počet závitov	27	23	21	20
Hmotnosť magnetov [kg]	2.0	1.9	2.0	1.8
Max. účinnosť [%]	90.8	93.5	95.9	95.8

Tabuľka č. 1: Porovnanie strojov p=4, SV [6]

	SM-PMSM p=4	I-PMSM p=4	VI-PMSM p=4	Tok-PMSM p=4
Parameter statora [mm]	270	270	270	270
Parameter rotora [mm]	75	75	80	85
Max. preťažiteľnosť	2	2.5	3	2
Max. moment [Nm]	319	307	399	237
Počet závitov	34	29	27	29
Hmotnosť magnetov [kg]	1.4	1.3	1.4	1.3
Max. účinnosť [%]	91.8	95	95.5	94.8

Tabuľka č. 2: Porovnanie strojov p=4, RV [6]

V tabuľke číslo 2 je možné vidieť porovnanie IPM strojov medzi sebou, ale aj so strojom s PM na povrchu rotora. Všetky stroje majú rovnaký počet pólových dvojíc a sú navrhnuté na rovnaký počet otáčok $n = 2000 \text{ min}^{-1}$.

2.3.3 Porovnanie prevádzkových vlastností IMP strojov

U rotora s PM vo V-tvare a rotora v tvare koncentrujúcom tok, majú tieto druhy rotora veľkú hodnotu intenzity toku vo vzduchovej medzere a táto hodnota je rovnaká ako u remanentných intenzít toku v PM. Rozptyl magnetického toku je u I-tvaru PM rotora už od začiatku na nízkej hodnote [6]. Akýkoľvek stroj sa musí vysporiadať so spätnou elektromotorickou silou. Elektromotorická sila má tvar sínusovej vlny. Topológia V a Tok koncentrujúceho rotora vedie k vyššej amplitúde ako u ostatných typov rotorov. Vzhľadom k tomuto faktoru, tieto topológie majú vyššiu hodnotu intenzity toku vo vzduchovej medzere pri nulovej záťaži.

Pre dosiahnutie dynamického momentu v synchrónnom stroji musíme začať tým, že privedieme prúd na statorové vinutie, a tým pádom ho pribudíme. Ako už bolo vyššie uvedené, stroje s rotorom v tvare V a tok koncentrujúcom majú najlepší výkon. Je to spôsobené tým, že týmto rotorom dopomáha aj reluktančný moment. Taktiež si musíme uvedomiť, že iba IPM stroje môžu mať reluktančný moment, kvôli ich vyniknutým pólom [6].

2.3.4 Používané prevedenie strojov s vnútornými magnetmi

Vďaka tomu, že v dnešnej dobe majú stroje s permanentnými magnetmi vysokú spoľahlivosť, nízke náklady na údržbu a vysokú účinnosť, sú široko rozšírené vo výrobe elektrickej energie vo veterných elektrárňach, ale aj ako pohony v automobilovom priemysle.

Kvôli tomu, aby stroj dosiahol vysokú intenzitu momentu v generátore, musí tento stroj zvyčajne mať veľký priemer vzduchovej medzery a vysoký počet pólových dvojíc. Pre tieto priamo riadené generátory je najdôležitejšia výkonnosť. V pojme výkon stroja sú zahrnuté parametre ako intenzita momentu stroja, účinník, zvlnenie momentu, efektívnosť

a demagnetizačná charakteristika. Z uvedených dôvodov je veľmi dôležité vybrať ten správny typ rotora. IPM generátory majú vysokú hodnotu momentu v tok koncentrujúcom prevedení rotora a zároveň ochranu proti demagnetizácii. Na pamäti musíme mať ďalej aj počet pólov IPM stroja. Tento počet je určený limitáciou miesta v rotore [5].

U strojov s vnorenými PM je návrh parametrov stroja veľmi podobný stroju SPM. Táto podobnosť spočíva v tom, že majú podobný počet pólov, ako aj rozmery permanentných magnetov. U IPM strojov ale nastáva komplikovanejšia saturácia v železe, ktorú nemôžeme taktiež zanedbať [5].

3 ANALYTICKÝ NÁVRH STROJOV S IPM

3.1 Metodológia elektromagnetického návrhu

Návrh elektrického stroja väčšinou začína pri definovaní základných parametrov daného stroja. Týmito parametrami stroja sú: výkon P , počet otáčok n , nominálne napätie U , účinník $\cos\phi$, počet fáz m , požadovaná účinnosť η , požadované tangenciálne napätie $\sigma_{F_{tan}}$, preťažiteľnosť a maximálny moment pri nízkych otáčkach [7].

Pokiaľ je vysoká hodnota $\sigma_{F_{tan}}$, znamená to, že pôsobí veľké magnetické a elektrické zaťaženie na stroj. V dôsledku tejto záťaže by mal mať tento stroj magnety s veľkou remanenciou a vysokú hodnotu prúdu púšťaného do stroja, ktorý bude vytvárať vysokú prúdovú hustotu. V dôsledku vysokej prúdovej hustoty bude stroj potrebovať rovnako výkonné chladenie [7].

3.2 Elektromagnetický návrh

Ako prvou hodnotou sa v elektromagnetickom návrhu stroja budeme zaoberať veľkosťou rotora V_r , inak povedané jeho objemom. Objem rotora je daný rovnicou:

$$V_r = \frac{M_r}{2 * \sigma_{F_{tan}}} = \frac{60 * P}{4 * \pi * n * \sigma_{F_{tan}}} \quad (3.1)$$

Pri návrhu rotora sa uvažuje optimálna hrúbka rotora, ktorá sa označuje D_r . Hodnotu optimálnej hrúbky môžeme dostať podľa rovníc:

$$\chi = \frac{\pi}{4 * p} * \sqrt{p} \quad (3.2)$$

$$D_r = \sqrt[3]{\frac{4 * V_r}{\chi * \pi}} \quad (3.3)$$

Odchýlenie od ideálneho návrhu rotora nezmení drasticky vlastnosti stroja, hlavne u strojov s permanentnými magnetmi. Vďaka tomuto javu sa hrúbka rotora môže zvoliť ľubovoľne [7].

Potom čo je stanovená dĺžka stroja podľa druhu použitia, nastáva stanovenie dĺžky rotora l , podľa nasledovného vzorca:

$$l = \frac{4 * V_r}{\pi * D_r^2} \quad (3.4)$$

Takto vypočítaná dĺžka rotora je rovná dĺžke statora l_s . Kvôli rozptylovým poliam, ktoré sa vyskytujú blízko konca statora by mala byť dĺžka rotora navýšená, a to z dôvodu, že aj magnetický tok, ktorý sa vyskytuje na konci statora dopomáha k tvorbe krútiaceho momentu [7]. Podľa tejto úvahy sa dĺžka rotora vypočíta ako:

$$l' \approx l_s + 2 * \sigma \quad (3.4)$$

Vyššie uvedená rovnica bola vyjadrená pre indukčný stroj. V prípade stroja s permanentnými magnetmi a u strojov s veľkou vzduchovou medzerou nám táto rovnica nepostačuje. Návrh týchto strojov je náročnejší. Je to z dôvodu, že ak by mal stroj malý pomer dĺžky k hrúbke, tak by bol jav v koncoch vinutia viacnásobne väčší, a ďalej rozptyl indukcie v koncoch vinutia by bol v konečnom súčte vyšší u strojov s malým pomerom dĺžky k hrúbke [1].

Je náročné vziať v úvahu všetky parametre a koncové dôsledky, obzvlášť pokiaľ je vzduchová medzera veľká [7]. Pre stroje s PM s veľkou vzduchovou medzerou je rozptylový efekt na konci považovaný za veľmi malý a z toho plynie, že takýto stroj nepotrebuje o toľko väčšiu dĺžku rotora, a preto výsledná rovnica je určená:

$$l' \approx l_s + 0.5 * \sigma \quad (3.5)$$

Ako ďalší krok pri návrhu stroja by malo byť zvolenie veľkosti vzduchovej medzery. Veľkosti vzduchových medzier sú odporúčané v literatúre [6]. S ohľadom na toto odporúčanie je veľkosť vzduchovej medzery δ u synchronných strojov daná:

$$\delta \geq \gamma * \tau_p * \frac{A_a}{B_\delta} \quad (3.6)$$

Veľkosť vzduchovej medzery sa väčšinou drží na čo najnižšej hodnote, ktorá je možná s ohľadom na funkčnosť stroja, kvôli nákladom na materiál, z ktorého sú vyrobené permanentné magnety, ktoré nám vytvárajú požadovaný magnetický tok vo vzduchovej medzere. Pokiaľ sa zvolí príliš malá vzduchová medzera, tak sa straty v železe a straty vírivými prúdmi v PM mnohonásobne zväčšia [7]. Tieto straty by boli obzvlášť vysoké pokiaľ by bol stroj riadený pomocou frekvenčného meniča vo vysokých otáčkach.

Po dokončení návrhu vzduchovej medzery sa pokračuje návrhom vonkajšej hrúbky statora D_s . Vonkajšia hrúbka statora je daná ako:

$$D_s = D_r + 2 * \delta \quad (3.7)$$

Elektromagnetický návrh statora začína tým, že sa zvolí maximálna hodnota harmonickej intenzity toku v vzduchovej medzere $B_{\delta p}$. U strojov s PM je zvolená intenzita toku vo vzduchovej medzere v rozsahu od 0.8-1.1 T, a to z dôvodov nasýtenia železa a limitácie remanencie v permanentných magnetoch [7].

Pre zjednodušenie výroby sú zvolené PM v tvare obdĺžnika, ktoré sú použité pri výrobe rotora. Podľa konfigurácie IPM stroja je návrh intenzity toku vo vzduchovej medzere jednoduchší oproti SPM stroju, a to z dôvodu rozptylu toku z PM, ktoré sú umiestnené

v rotore. Ako zjednodušenie budeme považovať v tomto prípade, že intenzita toku z permanentných magnetov vo vzduchovej medzere má tvar obdĺžnika. Preto nasledujúca rovnica je vzťahnutá k obdĺžnikovému tvaru intenzity toku B_{max} vo vzduchovej medzere, k vytváraniu amplitúdy synchronnej sínusovej intenzity toku $B_{\delta p}$ [1]. Táto intenzita toku závisí na relatívne efektívnej hrúbke magnetu vo vzduchovej medzere α_δ . Z tejto časti plyní rovnica:

$$B_{max} = \frac{\pi * B_{\delta p}}{4 * \sin\left(\frac{\alpha_\delta * \pi}{2}\right)} \quad (3.8)$$

Hodnota relatívnej hrúbky magnetu α_δ je menšia ako skutočná hrúbka magnetu α_{PM} , a to z dôvodu rozptylu toku PM v železe, kvôli konštrukcii IPM stroja. Po tom, čo je stanovená maximálna intenzita toku, začína sa uvažovať o počte závitov N_{ph} . Počet závitov závisí na energii magnetického poľa stroja E_{PM} . Hodnota emf sa môže meniť v závislosti na menovitej hodnote napätia vo fáze U_{ph} a na požadovanom výkone a umiestnení daného stroja [6] a [12]. Keď zoberieme v úvahu tieto závislosti počet závitov sa vypočíta ako:

$$N_{ph} = \frac{\sqrt{2} * E_{PM}}{\omega * k_{wp} * \alpha_\delta * B_{max} * \tau_p * l'} \quad (3.9)$$

Zvolenou E_{PM} , spolu s vypočítanou synchronnou indukciou L_s , môžeme určiť moment ktorý je vytvorený, a to podľa rovnice pre stroje s vyniknutými pólmami:

$$M = \frac{p * m * U * E_{PM}}{\omega^2 * L_s} \quad (3.10)$$

Pokiaľ po dokončení návrhu synchronny stroj nemá požadované výsledky, ktoré boli určené na začiatku návrhu, potom by hodnoty E_{PM} a L_s mali byť zmenené a celý stroj by mal byť navrhnutý odznova [1].

Podľa vzorca 4.8 sme vypočítali počet závitov N_{ph} . Tento počet závitov sa musí rozložiť do vybraného rozloženia vinutia v Q_s drážkach. Počet vodičov v drážke z_{Q_s} v dvojitém vinutí by mal byť rovnomerne rozložený [7]. Podľa tejto úvahy sa počet vodičov v drážke získa ako:

$$z_{Q_s} = \frac{2 * a * m * N_{ph}}{Q_s} \quad (3.11)$$

Po získaní počtu vodičov v drážke, musí byť upravená hodnota počtu závitov tak aby zodpovedala vypočítanému počtu závitov:

$$N_{ph} = \frac{Q_s * z_{Q_s}}{2 * a * m} \quad (3.12)$$

Následne po vypočítaní vyššie uvedených hodnôt, sú hodnoty magnetickej indukcie určené pre zvyšné časti stroja, ako sú rotorové a statorové jarmo. Vysoké hodnoty magnetických indukcií nám budú zvyšovať hodnotu momentu a hustotu výkonu pre tento elektrický stroj. Pokiaľ sa stane, že hodnota magnetickej indukcie je príliš vysoká, potom časť stroja bude presýtená a rozptylová indukčnosť môže zvýšiť svoju veľkosť. Taktiež v dôsledku vysokej hodnoty magnetickej indukcie môže poklesnúť aj účinnosť stroja. Tento pokles efektivity je spôsobený nárastom strát v železe. Pre stroje s vysokými hodnotami momentu je hodnota intenzity toku vyvážená. To znamená, že železo sa práve dostalo do stavu saturácie a zároveň nie je presýtené. Z týchto úvah vyplýva, že výber intenzity toku musí byť vyvážený podľa požadovaných parametrov ako sú výkonnosť stroja, cena použitých materiálov, jeho hmotnosť a jeho efektivita [7], [10], [11].

Ako ďalší parameter stroja je magnetické napätie stroja. Tok ktorý vznikol vo vzduchovej medzere pomocou permanentných magnetov môže byť vypočítaný ako:

$$\phi_{\delta} = B_{max} * \tau_p * l * \alpha_{\delta} \quad (3.13)$$

Následne po stanovení veľkosti intenzity toku vo vzduchovej medzere si môžeme určiť veľkosť statorového jarma:

$$h_{ys} = \frac{\phi_{\delta}}{2 * k_{Fe} * l * B_{ys}} \quad (3.14)$$

Z vyššie uvedenej rovnice sa hodnota nemôže vziať v úvahu, a to z mechanických dôvodov, pretože by bolo statorové jarmo príliš úzke pre náš zvolený stroj. Možnosťou je zvýšiť výslednú hodnotu, tak aby sme zvýšili odolnosť proti mechanickému namáhaniu.

Keďže sme navýšili veľkosť statorového jarma, musíme vypočítať novú hodnotu intenzity magnetického toku:

$$B_{ys,n} = \frac{\phi_{\delta}}{2 * k_{Fe} * l * h_{ys,n}} \quad (3.15)$$

Výpočet magnetického napätia v jarme stroja je veľmi komplikovaný, pretože sa intenzita toku v jarme stroja neustále mení s časom. Z tohto dôvodu musíme stanoviť priemernú hodnotu magnetického napätia pre náš stroj [7]:

$$U_{m,ys} = H_{ys} * \tau_{ys} \quad (3.16)$$

Po tom, čo sme stanovili parametre pre stator stroja môžeme stanoviť parametre rotora. Hrúbka železa by mala byť čo najmenšia, tak aby sme docielili pokles rozptylu magnetického toku z PM. Zároveň ale nesmieme zabúdať na mechanickú pevnosť, tak aby nám vydržal nápor odstredivej a trecej sily. Zároveň do mechanickej pevnosti musíme brať

v úvahu aj to, že výrobné podmienky nie sú dokonalé a majú stanovené určité tolerancie pri výrobe komponentov [7].

Budeme brať v úvahu skutočnosť, že železo je úplne nasýtené, v rozsahu $B_{sat} \approx 2,1 - 2,5 T$. Táto hodnota sa môže meniť v závislosti na použítom materiály [1]. Vďaka tomu môžeme vypočítať straty toku v stroji ako:

$$\phi_{leak,br} = 2 * B_{sat} * h_{br} * l \quad (3.17)$$

Následne ako sme stanovili rozptyl magnetického toku v železe, môžeme stanoviť celkový magnetický tok vytvorený pomocou permanentných magnetov. Tato hodnota sa rovná súčtu magnetického toku vo vzduchovej medzere a úniku toku v železe:

$$\phi_{PM} = \phi_{leak,br} + \phi_{\delta} \quad (3.18)$$

Rozptyl magnetického toku v permanentných magnetoch v strojoch závisí na dvoch podmienkach, z ktorých jednou je geometria a druhá nasýtenie. Pre stroje sa pri úvahe o oboch podmienkach môže celkový magnetický tok meniť v rozsahu 5-20 % [7]. Pokiaľ zahrnieme tento predpoklad do výpočtu, tak sa vzorec pre výpočet celkového magnetického toku sa vypočíta ako:

$$\phi'_{PM} = \phi_{leak,br} + (1,05 - 1,2) * \phi_{\delta} \quad (3.19)$$

Ako bolo už vyššie v tejto kapitole uvedené, tak aj celková hodnota magnetického toku PM bola spresnená. Následne tak môžeme vypočítať veľkosť rotorového jarma:

$$h_{yr} = \frac{\phi'_{PM}}{2 * k_{Fe} * l * B_{yr}} \quad (3.20)$$

Podobne ako aj u statora stroja sa ďalej vypočíta veľkosť magnetického napätia, avšak s tým rozdielom, že musíme uvažovať aj to, že sa intenzita poľa nemení lineárne. Preto do vzťahu pre výpočet magnetického napätia v rotore stroja musíme zahrnúť koeficient c , ktorý nám túto nelinearitu v stroji vyjadří [7].

$$U_{m,yr} = c * H_{yr} * \tau_{yr} \quad (3.21)$$

Na záver návrhu rotora u IPM stroja sa navrhujú permanentné magnety. Tím sú myslené parametre, ako výška a šírka magnetov, potrebný magnetický tok, a pôsobenie magnetov do vzduchovej medzery. Skutočný zásah do vzduchovej medzery sa získa ako:

$$\alpha_{PM} = \alpha_{\delta} * \frac{\phi'_{PM}}{\phi_{\delta}} \quad (3.22)$$

Po vypočítaní hodnoty α_{PM} , si môžeme dopočítať konečnú hrúbku permanentný magnetov:

$$w_{PM} = (D_r - 4 * h_{br}) * \sin\left(\frac{\alpha_{PM} * \pi}{2 * p}\right) \quad (3.23)$$

Z tohto výpočtu nám môže vyjsť aj taká hodnota, ktorá bude príliš veľká a nezmesť sa do vyhradeného miesta v rotore. V takom prípade by mala byť intenzita toku permanentných magnetov navýšená, tak aby bolo možné PM zmenšiť. Po tom čo však navýšime intenzitu toku PM, nesmieme zabúdať, že nám bude rásť aj cena za materiál.

Požadovaná intenzita toku v PM môže byť vyjadrená :

$$B_{PM} = \frac{\phi'_{PM}}{w_{PM} * l} \quad (3.24)$$

Na záver návrhu IPM rotora sa musí stanoviť výška permanentných magnetov. Táto výška je závislá na celkovej veľkosti napätia obvodu.

$$h_{PM} = \frac{U_{m,tot}}{H_c} \quad (3.25)$$

Po dosiahnutí výšky PM sú všetky hlavné komponenty stroja vypočítané a upravené tak aby splnili veľkosť stroja. Tento návrh stroja je považovaný za prvú časť a malo by byť overené, či splňuje požadované parametre. Ak nastane zhoda s požadovanými parametrami, tak sa môže prejsť na použitie simulácie. Pokiaľ sa návrh nezhoduje s požadovanými parametrami, tak sa musia určité parametre stroja zmeniť a stroj musí byť prepočítaný podľa nových parametrov.

4 NÁVRH STROJA

Na začiatku elektromagnetického návrhu stroja boli určené požadované parametre, ktoré sú uvedené v tabuľke č. 3 a usporiadanie permanentných magnetov. Požadované usporiadanie PM je v tvare I, ako je možné vidieť na obrázku č. 2.1 (na ľavej strane).

Výkon motora, P	1500 [W]
Počet otáčok, n	1500 [ot/min]
Tangenciálne napätie, σ_{tang}	21000 [Pa]
Počet fáz, m	3 [-]
Fázové napätie, U	230 [V]
Počet fázových dvojíc, p	2 [-]
Frekvencia, f	50 [Hz]
Požadovaný moment, M	9.5 [Nm]

Tabuľka č. 3: Požadované hodnoty IPM stroja

Ďalej je požadované prevedenie stroja s permanentnými magnetmi, ktoré sú vnorené v rotore stroja. Tento synchronný stroj sa predpokladá za plne uzavretý stroj. To znamená, že nemá žiadne prídavné chladenie vo forme chladiaceho ventilátora. Keďže sa jedná o prevedenie synchronného stroja s vnorenými permanentnými magnetmi, pre tento stroj bol zvolený typ magnetu 33UH. Tento druh magnetu má hodnotu hustoty remanentného toku 1.175 T a hodnotu koercivity 891.3 kA/m. Uvažovaný plech pre použitie v statore a rotore je M330-35A.

Jedná sa o servomotor, ktorý má izoláciu triedy H, čo znamená, že jeho povolená teplota je do 180°C. Zároveň teplota permanentných magnetov bola zvolená na hodnotu 150°C. Veľkosť teploty permanentných magnetov sa iba odhaduje, presná teplota by musela byť overená.

Pri návrhu synchronného stroja s vnorenými permanentnými magnetmi je vhodné si uvedomiť, že z dôvodu uloženia permanentný magnetov v rotore, sa tieto PM ťažšie demagnetizujú, a to v porovnaní s usporiadaním PM na povrchu rotora.

Hodnota tangenciálneho napätia je uvažovaná ako zadaná. Jeho hodnota bola určená z literatúry [1]. Určená hodnota tangenciálneho napätia je uvedená ako hodnota minimálna pre tento typ stroja. Pre porovnanie uvádzaná priemerná hodnota v literatúre [1] tangenciálneho napätia pre synchronný stroj s vnorenými permanentnými magnetmi dosahuje hodnoty 33500 Pa.

Pri návrhu IPM stroja v počítačovom prostredí Matlab boli pri vytváraní programu použité aj úpravy z literatúr [8], [9].

4.1 Návrh stroja v Matlabe

Požadované parametre boli zadané do počítačového prostredia Matlab, v ktorom sú spracovávané podľa rovníc, ktoré sú uvedené v kapitole 3.2.

Všetky hodnoty parametrov, ktoré sú používané, ale nie sú zadané ako požadované parametre, sú získané z odbornej literatúry, ktorá je uvedená na konci tejto práce.

Ukážka z časti kódu je uvedená v tejto kapitole. Z dôvodu prehľadnosti sú v kóde ponechané aj poznámky ktoré boli využité pri vytváraní programu. Pri výpočte IPM stroja v programe Matlab sa brala do úvahy aj medzera medzi magnetom a plechom rotora, ktorá je určená pre nanosenie vrstvy lepidla v programe - uvedená ako "hglue" a jej veľkosť sa rovná 0.2 mm.

Pri návrhu výšky permanentného magnetu v tomto matematickom prostredí sa vychádza z počiatočného odhadu výšky PM. Pre navrhovaný synchronný stroj s vnorenými permanentnými magnetmi bola určená počiatočná hodnota 1 mm. Počiatočný odhad sa následne pomocou magnetických napätí prepočíta a dosiahneme približnú veľkosť PM. Následne sa musí overiť, či navrhnuté PM dokážu splniť požadované parametre.

Hodnoty, ktoré sú uvedené v tabuľke č. 4 boli vypočítané v matematickom prostredí Matlabu.

Vnútorý priemer statora D_s	83.4 [mm]
Vonkajší priemer statora D_{SE}	145.7 [mm]
Vonkajší priemer rotora D_r	80.5 [mm]
Vnútorý priemer rotora D_{ri}	38.7 [mm]
Celková dĺžka stroja l	45.4 [mm]
Počet statorových drážok Q_s	36 [-]
Počet vodičov pre drážku zQ	102 [-]
Veľkosť vzduchovej medzery	1.45 [mm]
Výška PM	4.7 [mm]
Šírka PM	43.8 [mm]
Počet paralelných vetiev a	1 [-]
Počet závitov statora na fázu N_s	612 [-]
Krok vinutia W	5/6 [-]

Tabuľka č. 4: Vypočítané hodnoty v Matlabe

Vypočítané hodnoty, ktoré sa dosiahli, sú využité pri začiatku vytvárania modelu synchronného stroja s vnorenými permanentnými magnetmi v programe ANSYS Maxwell. Hodnoty, ktoré sa dosiahli nemusia byť konečné, ich hodnoty sa môžu meniť, tak aby sa dosiahlo požadovaných parametrov stroja.

```
% veľkosť rotora
Vr=M/(2*Otang); %Objem rotora
X=(pi*sqrt(p))/(4*p);
Dr=((4*Vr)/(pi*X))^(1/3);
Dr=(Dr*100)/100;
lr=X*Dr;%dĺžka rotoru
```

Obrázok č. 4.1: Počiatočný výpočet rotora stroja

Na obrázku číslo 4.1 je možné vidieť počiatočný návrh rotora stroja s požadovanými parametrami. Na obrázku je uvedený výpočet objemu rotora a výpočet vonkajšieho priemeru rotora.

```

while Scusk<Scus
    h5=h5+0.0001;
    b4c=b4+((2*pi*h3)/Qs)-2*h6;
    b5c=b4c+((2*pi*h5)/Qs);
    Scusk=((b4c+b5c)/2)*h5+(pi/8)*(b5c^2);
end

```

Obrázok č. 4.2: Dovočítanie rozmeru drážky

Ako je možné vidieť na obrázku číslo 4.2, dovočítava sa hodnota výšky drážky s overením tak, aby plocha medzi nebola väčšia ako drážka samotná.

```

hPM=0.001;
hPMn=hPM;
while hPMn == hPM % vyska PM magnetu
    Dyr=Dr-2*hPMn-hyr;
    Tauyr=(pi*Dyr)/(2*p);
    Umyr=cr*Hmaxr*Tauyr;
    UmPM=(Hc/Br)*Bmax*hPM;
    hPMn=(Ume+Umds+Umys+Umyr+UmPM)/Hc;
end

```

Obrázok č. 4.3: Výpočet výšky PM

Na obrázku číslo 4.3 je možné vidieť výpočet výšky permanentného magnetu. Ako už bolo vyššie uvedené, počiatočný odhad výšky permanentného magnetu bol 1mm. Následne sa výpočet uskutočňuje po dobu pokiaľ sa odhadovaná výška PM a nová výška PM líšia.

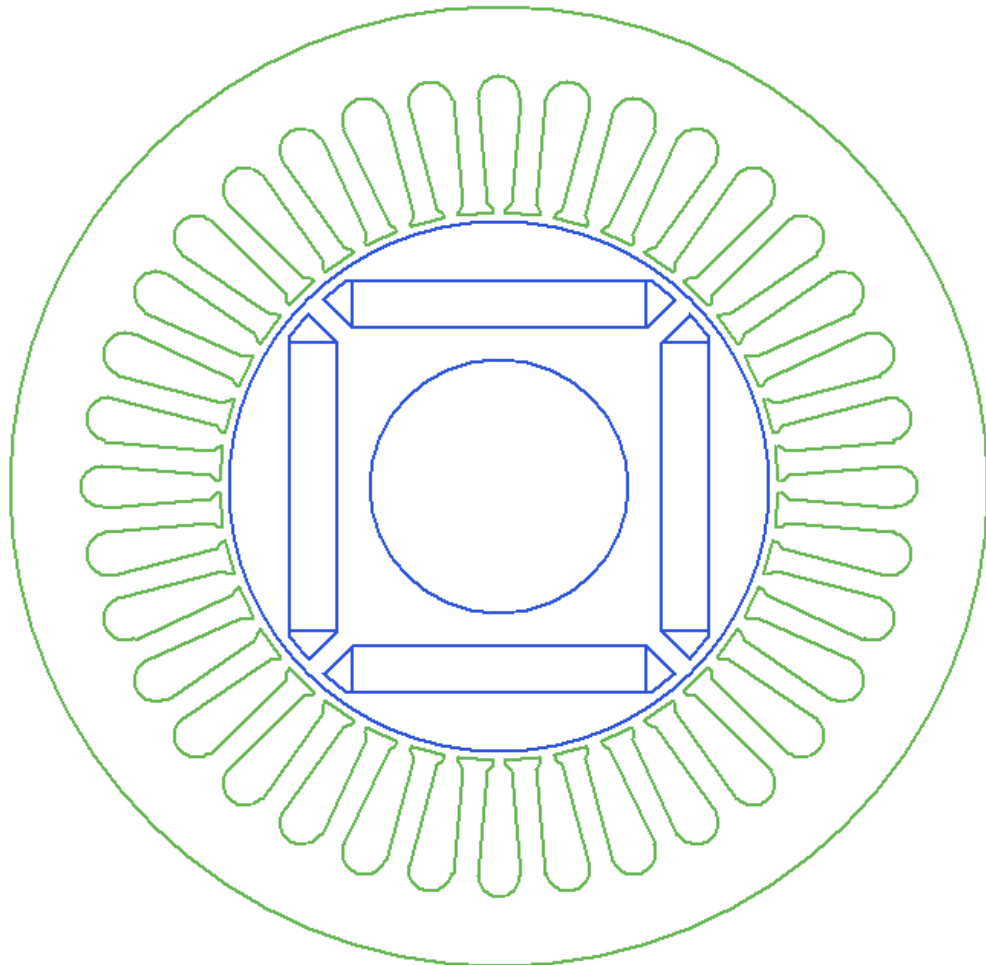
5 OVERENIE PARAMETROV NAVRHNUTÉHO STROJA

5.1 Overenie v RMXprt

Ansys RMXprt je program, ktorý využíva analytické výpočty pri návrhu točivých elektrických strojov. RMXprt obsahuje predpripravené šablóny, pomocou ktorých sa navrhovaný stroj pripraví k analytickému výpočtu. Hlavnou výhodou RMXprt je prepojenie s Ansys Maxwell.

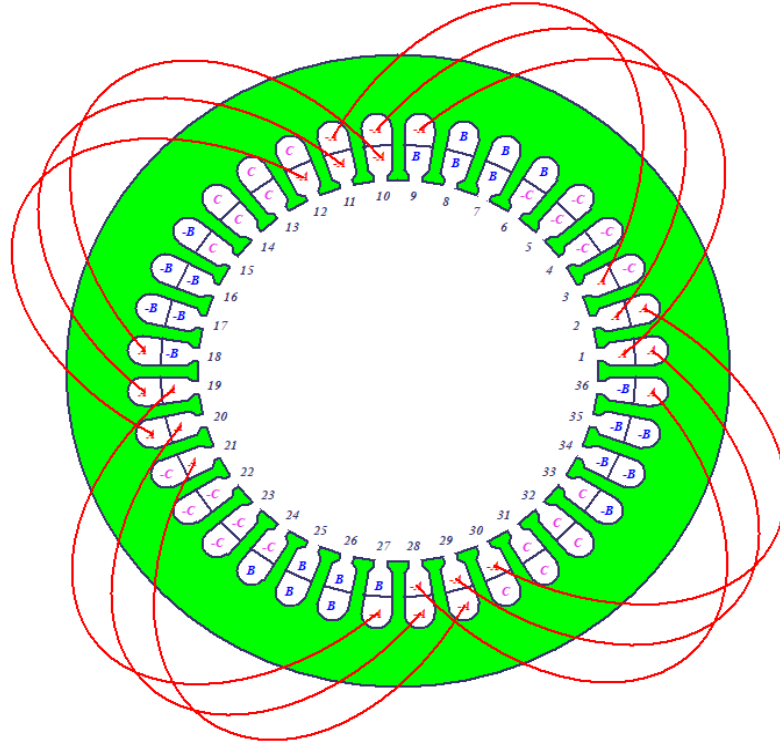
Pri overovaní navrhovaného stroja sa do vopred pripravenej šablóny zadali vypočítané parametre, ako vonkajšia veľkosť statora a rotora, rozmery permanentných magnetov, počet otáčok a ďalšie vypočítané hodnoty. Následne sa vypočítajú hodnoty, ako sú napríklad maximálna hodnota indukovaného napätia vo fáze, fázová hodnota prúdu, magnetická indukcia vo vzduchovej medzere, účinnosť stroja a ďalšie. Parametre, ktoré boli vypočítané a podľa ktorých sa overoval stroj sú uvedené v tabuľkách číslo 5 a 6.

Geometriu stroja je možné vidieť na obrázku číslo 5.1. Ako je možné vidieť, tak v geometrii stroja je uvažovaný dodatočný priestor pre PM, avšak v RMXprt sa neuvažuje dodatočná medzera nad PM, ktorá je určená pre vrstvu lepidla, ktorá sa používa k upevneniu PM k rotoru. V RMXprt sa uvažuje vinutie stroja a jeho prevedenie. Navrhnuté prevedenie vinutia v statore je možné vidieť na obrázku číslo 5.2.



Obrázok č. 5.1: Geometria stroja RMXprt

Na obrázku číslo 5.2 je znázornené vinutie statora v IMP stroji. Taktiež sú v ňom naznačené jednotlivé fázy stroja. Fáza U je vyznačená pod písmenom A, fáza V písmenom B, a fáza W písmenom C. Zároveň je vidieť, že vinutie je dvojrstevné s krokom 5/6. V geometrii stroja sa nachádza 36 drážok, jednotlivé drážky sú očíslované.



Obrázok č. 5.2: Vinutie stroja a zapojenie jednej fázy

V tabuľke č. 5 je možné vidieť dosiahnuté hodnoty pomocou analytického výpočtu v RMXprt pre navrhovaný stroj v zaťaženom stave.

Amplitúda združeného indukovaného napätia	569.4 V
Efektívna fázová hodnota indukovaného napätia	232.7 V
Efektívna hodnota prúdu vo fáze	1.47 A
Prúdová hustota	3.75 A/mm ²
Straty trením a ventilačné straty	20.00 W
Straty v železe	8.05 W
Straty vo vinutí	69.56 W
Celkové straty	97.61 W
Účinnosť	91.10 %
Synchronne otáčky	1500 min ⁻¹
Moment stroja	6.36 Nm
Prúdový uhol	26.53°
Maximálny výkon stroja	3880.06 W

Tabuľka č. 5: Vypočítane hodnoty stroja pri plnom zaťažení

Magnetická indukcia v zube statora	1.720 T
Magnetická indukcia v statorovom jarme	1.720 T
Magnetická indukcia v rotorovom jarme	0.957 T
Magnetická indukcia vo vzduchovej medzere	0.627 T
Magnetická indukcia permanentných magnetov	0.928 T

Tabuľka č. 6: Hodnoty magnetických indukcií v stave naprázdno

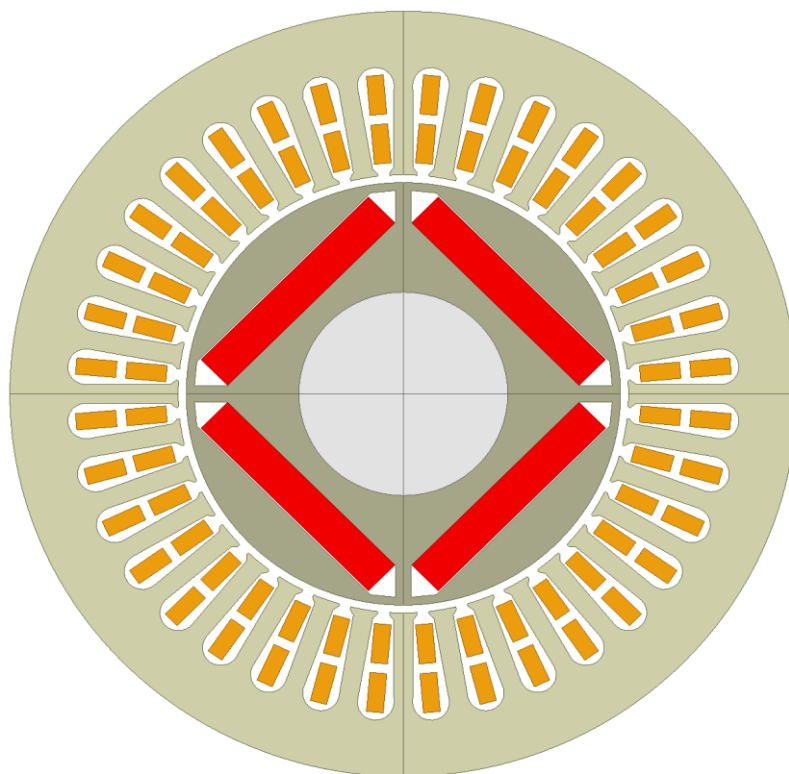
Ako je možné vidieť, v tabuľke č. 6 sú uvedené vypočítané hodnoty magnetických indukcií v rôznych častiach stroja. Tieto hodnoty sa nezhodujú s hodnotami vypočítanými v počítačovom prostredí Matlab. Ako príklad môžeme zobrať hodnotu magnetickej indukcie v zube statora. V RMXprt vyšla hodnota magnetickej indukcie v zube 1.720 T, ale v Matlabe uvažujeme hodnotu 1.7 T.

Hodnota odporu je 10.65 Ω , pri zvolenej teplote 150 °C permanentných magnetov. Pokiaľ by sa uvažovala rozdielna teplota PM, výpočet v RMXprt by sa musel zopakovať z toho dôvodu, že odpor je na teplote závislý, a teda pri jeho zmene by sa zmenili aj celkové straty a účinnosť stroja. Pri návrhu IPM stroja dosahoval činiteľ vinutia statora hodnotu 0.945.

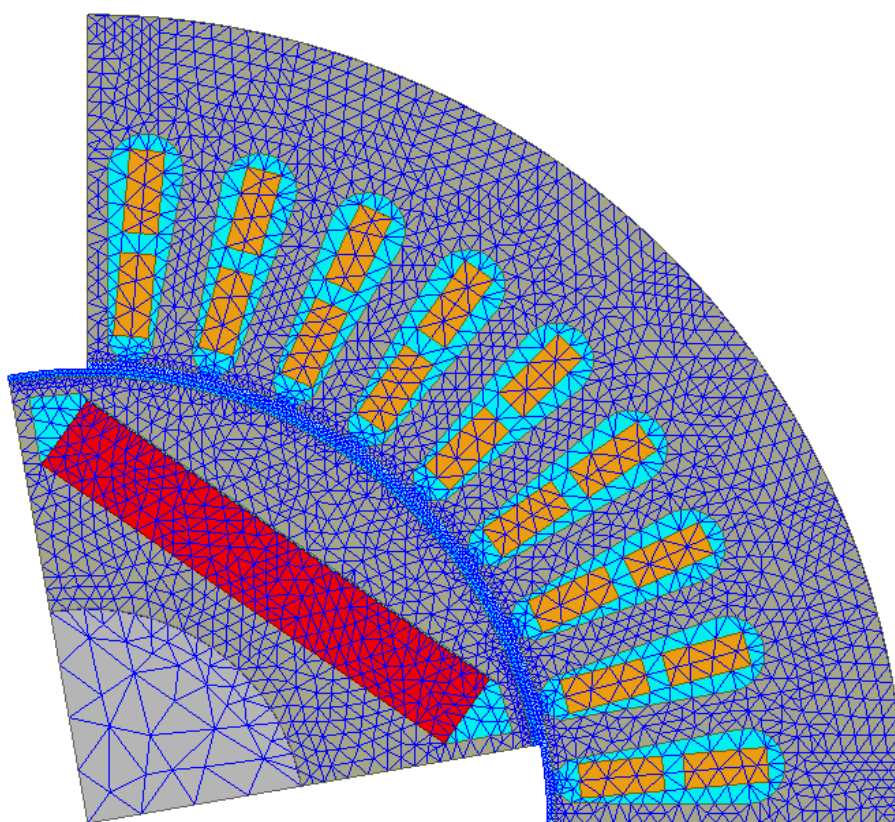
Hodnoty z Matlabu a RMXprt nie sú zhodné z dôvodu úprav v RMXprt. Spomínané úpravy boli uskutočnené tak, aby navrhovaný stroj dosahoval požadovaných parametrov. Najvýznamnejší rozdiel medzi prostredím Matlab a RMXprt je ten, že veľkosť permanentného magnetu (jeho výška) je v RMXprt takmer dvojnásobná. Zároveň je rozdiel v počte aktívnych vodičov. Rozdiel aktívnych vodičov v Matlabe a RMXprt dosahuje hodnoty 16 vodičov. Tieto fakty môžu byť spôsobené použitím analytického výpočtu v Matlabe pri využití vzorcov z literatúry [7], ako aj zaokrúhľovaním v jednotlivých krokoch v programe. Možnosť spresnenia výpočtu v Matlabe je uvedená v závere tejto práce.

5.2 Ansys Maxwell parametre

Stroj, ktorý je navrhovaný je osovo symetrický, to znamená, že pre výpočet synchronného stroja pri zaťažení a pri stave naprázdno stačí vymodelovať len štvrtinu stroja. Celý model stroja je možné vidieť na obrázku č. 5.3. Keď je stroj vymodelovaný, musí sa vytvoriť takzvaná konečno-prvková sieť v programe Ansys Maxwell nazývaná "Mesh". Pomocou tejto konečno-prvkovej siete môžeme nastaviť a spresniť výpočet. Pokiaľ budeme zjemňovať konečno-prvkovú sieť, musíme mať na pamäti, že s jemnejšou sieťou sa predlžuje doba výpočtu a taktiež rastie chyba spôsobená zaokrúhľovaním. Taktiež nesmieme zabudnúť, že pri výrobe strojov sú povolené odchýlky od požadovaných hodnôt. Zo všetkých týchto dôvodov je potrebné zvážiť zjemnenie konečno-prvkovej siete. Pre výpočet vyššie navrhnutého stroja sa konečno-prvková sieť zhusťila oproti pôvodnému nastaveniu v programe len vo vzduchovej medzere pre spresnenie výpočtu (viď. obrázok č. 5.5).

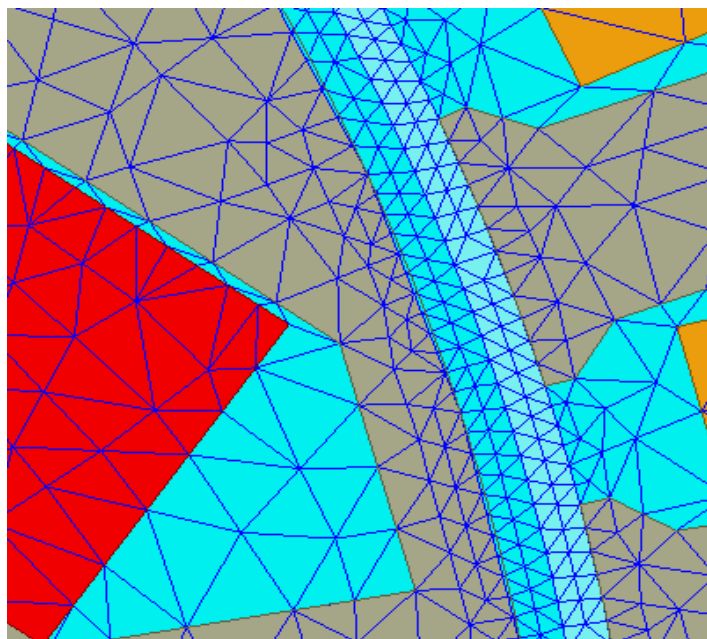


Obrázok č. 5.3: Celý model navrhovaného IPM stroja



Obrázok č. 5.4: Konečno-prvková sieť navrhovaného IPM stroja

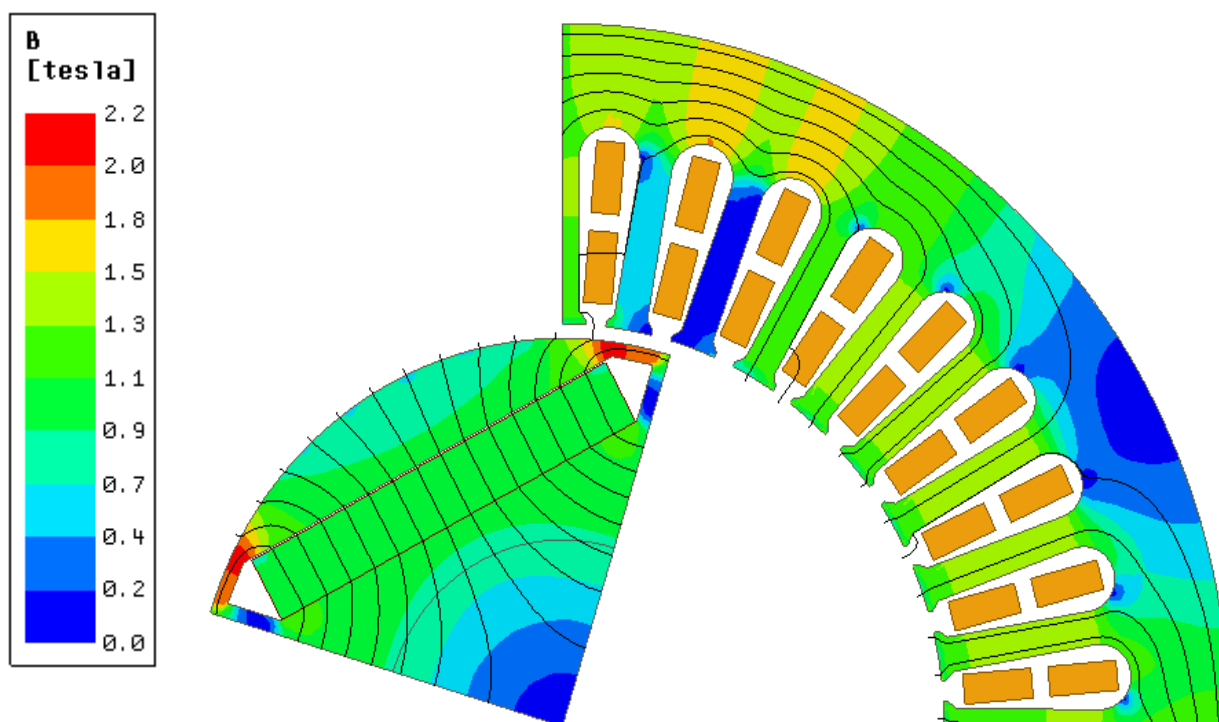
Na obrázku číslo 5.4 je možné vidieť celú konečno-prvkovú sieť pre jednu štvrtinu synchronného stroja s vnorenými permanentnými magnetmi.



Obrázok č. 5.5: Detail vzduchovej medzery

Ako je možné vidieť na obrázku č. 5.5, tak naprieč vzduchovej medzery je 5 výpočtových bodov. Tieto body spresňujú výpočet, ale zároveň predlžujú výpočtový čas.

Maximálna hodnota zpriahnutého magnetického toku (amplitúda) dosiahla hodnoty 1.07 Wb.

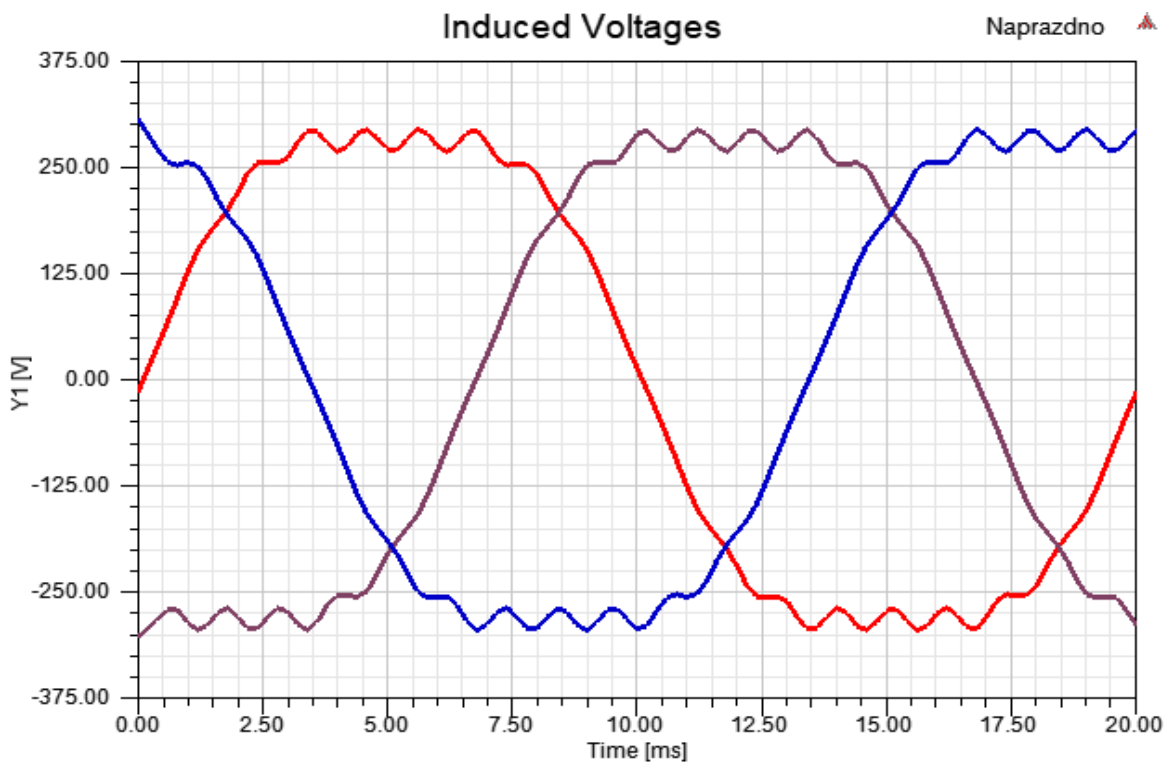


Obrázok č.5.6: Magnetická indukcia a indukčný tok v stave naprázdno

Ako je možné vidieť na obrázku č. 5.6, najväčšia magnetická indukcia sa nachádza v mostíku povrchu rotora. Hodnoty, ktoré dosahuje magnetická indukcia v rôznych miestach stroja sú uvedené v tabuľke č. 7.

Maximálna magnetická indukcia v jarme statora	1.68 T
Maximálna magnetická indukcia v zube statora	1.35 T
Maximálna magnetická indukcia v hlave zubu statora	1.1 T
Maximálna magnetická indukcia v mostíku povrchu rotora	2.28 T
Maximálna magnetická indukcia v jarme rotora	1.2 T

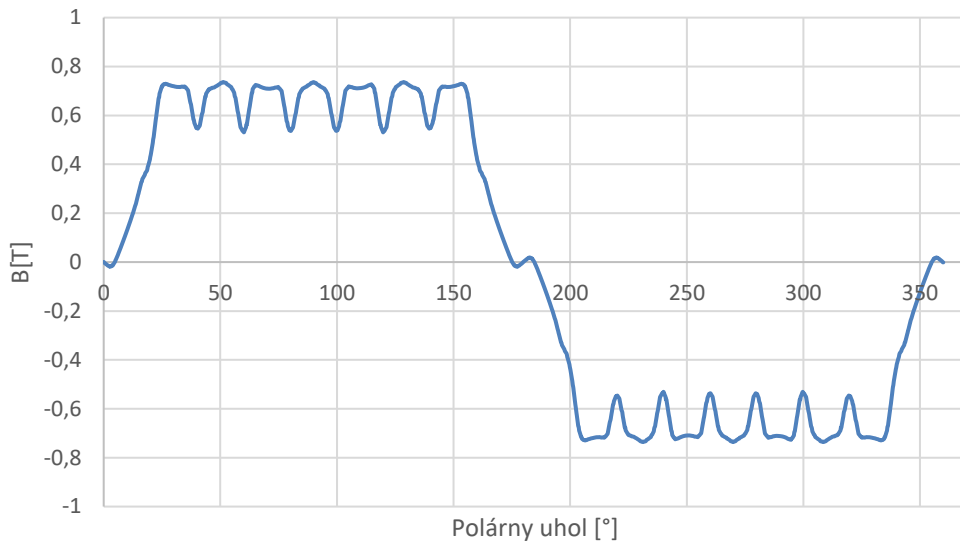
Tabuľka č. 7: Namerané hodnoty indukcie v stave naprázdno



Obrázok č. 5.7: Indukované napätie v troch fázach

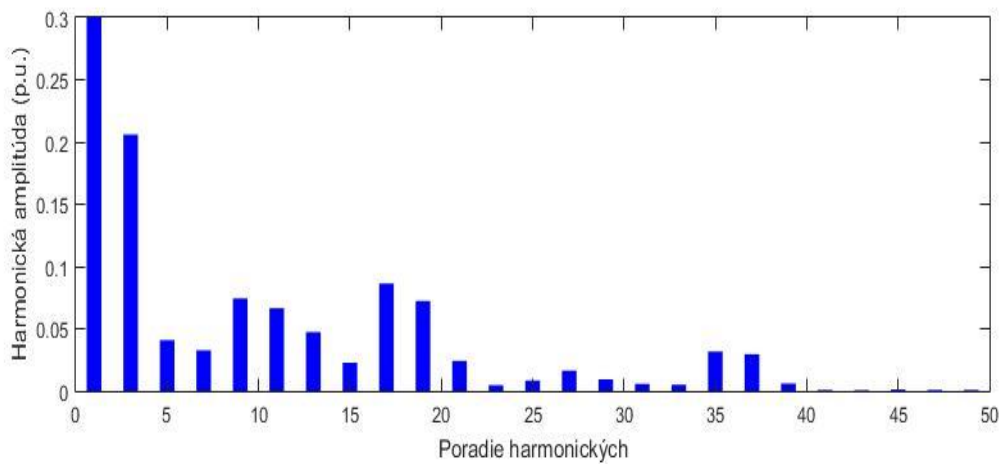
Ako je možné vidieť na obrázku č. 5.7, indukované napätie v prvej fáze dosahovalo efektívnu hodnotu 229.85 V, v druhej fáze dosahovalo indukované napätie efektívnu hodnotu 229.91 V a v tretej fáze 229.92 V. Indukované napätie pre synchronný stroj s vnorenými permanentnými magnetmi v stave naprázdno, by malo byť 230 V fázového napätia. Ako je možné vidieť na obrázku č. 5.7 vypočítane fázové napätie pre navrhovaný IPM stroj je v priemere 229.89 V. Odchýlka od hodnoty 230 V môže byť spôsobená zaokrúhľovaním hodnoty v bodoch výpočtovej siete, a teda nastala odchýlka o veľkosti

0.05 %. Tato odchýlka je dostatočne malá, aby sa dalo povedať, že je zanedbateľná a výsledok sa pokladal za zhodný.



Obrázok č. 5.8: Normálová zložka magnetickej indukcie uprostred vzduchovej medzery

Z vyššie uvedenej magnetickej indukcie, ktorá sa nachádza uprostred vzduchovej medzery (obrázok č. 5.8), sa dajú zistiť pomocou Fourierovej transformácie, hodnoty harmonických amplitúd a ich percentuálne zastúpenie k prvej harmonickej.

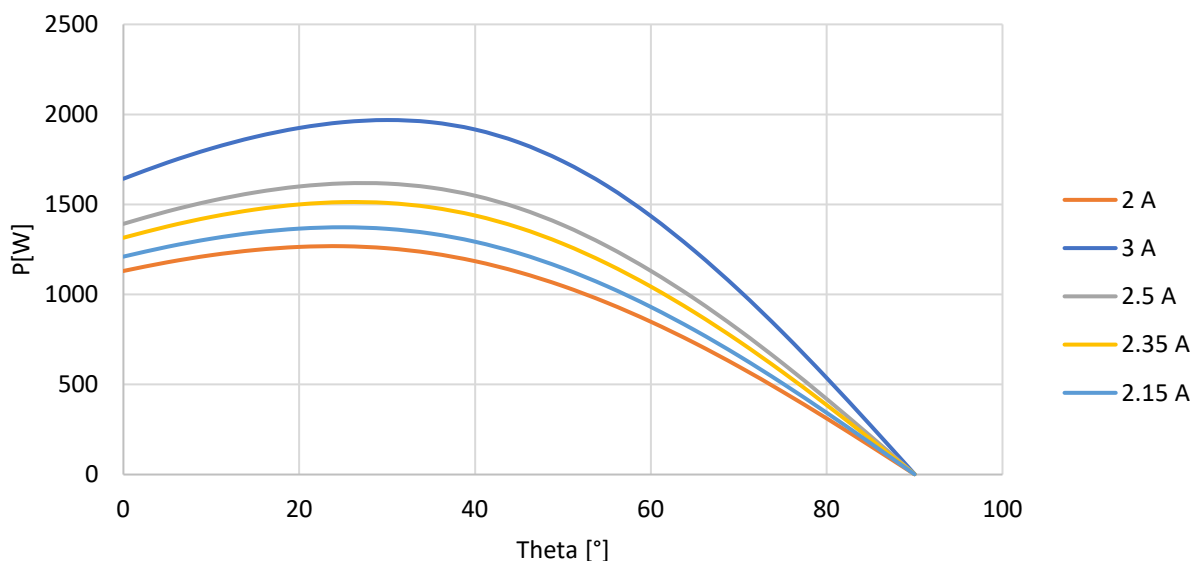


Obrázok č.5.9: Normalizovaný harmonický obsah normálovej zložky magnetickej indukcie uprostred vzduchovej medzery

Ako je možné vidieť na obrázku č. 5.9, y osa je prepočítaná do pomerných jednotiek, táto osa je vztiahnutá k prvej harmonickej, ktorá predstavuje 100 % v obrázku č. 5.9, vyjadrenej ako 1. Ostatné harmonické sú percentuálnym vyjadrením prvej harmonickej. Zároveň je y osa priblížená pre lepšie odčítanie hodnôt.

Najvyššie harmonické sú 3, 7, 9, 17 a 19. Prvá harmonická dosahuje hodnoty 0,804 T. Harmonické čísla 17 a 19 sa nazývajú drážkové harmonické statora prvého radu a harmonické čísla 35 a 37 sú drážkové harmonické druhého radu. Rada harmonických 3, 5, 7, 9 až po 17 harmonických, sú harmonické, ktoré sú spôsobené z dôvodu saturácie a zároveň kvôli obdĺžnikovému tvaru magnetickej indukcie V_0 vyššie uvedenom prípade sa viac prejaví pôsobenie obdĺžnikového tvaru vzduchovej medzery.

Pri návrhu synchronného stroja s permanentnými magnetmi v zaťaženom stave, musíme určiť zaťažovací prúd a uhol prúdu, tak aby sa dosiahlo požadovaného výkonu, v tomto prípade 1500 W. Tieto hodnoty boli vypočítané v prostredí Ansys Maxwell za použitia pridruženej aplikácie "optimalization". V nastavení tejto aplikácie sa upraví rozsah požadovaného prúdu a uhlu natočenia. Pri návrhu tohoto IPM stroja bol zvolený rozsah prúdu od 1 A do 3 A s krokom 0.1 A. Tento stroj je napájaný z prúdového zdroja. Po dokončení výpočtov je potreba správne zvoliť nastavenie pre ďalšie výpočty. Toho dosiahneme tým, že vykreslíme graf závislosti momentu na prúde. Na základe spomínaného grafu, ktorý je možné vidieť na obrázku č. 5.4, vyberieme najvhodnejšiu krivku, ktorej vrchol, maximálna hodnota dosahuje 1500 W.

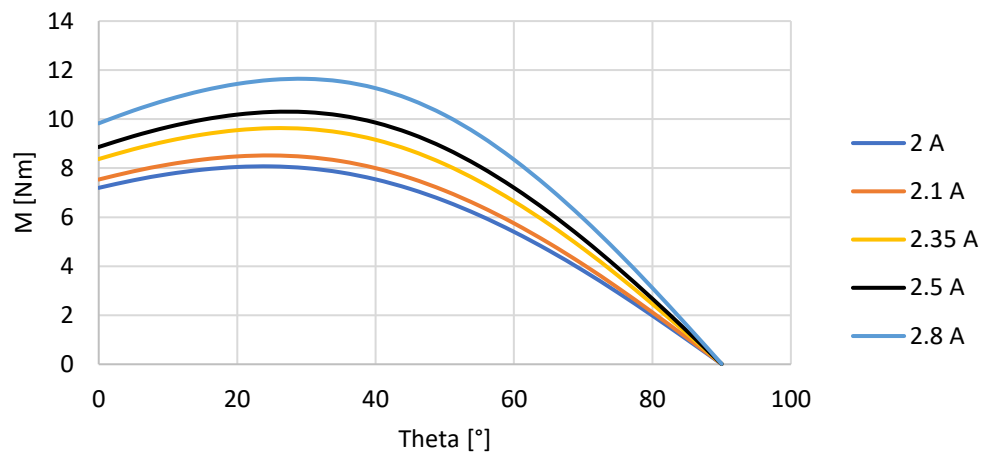


Obrázok č. 5.10: Závislosť výkonu na uhle natočenia

Pre IPM stroj, ktorý má požadovaný výkon 1500 W je najvhodnejšia krivka 2.347 A, pri uhle natočenia 25°. Na obrázku č. 5.10 je vybraná krivka vyznačená žltou farbou. Táto krivka bola zvolená z toho dôvodu, že jej hodnota sa najviac blíži k požadovaným 1500 W. Zvolená krivka presahuje hodnotu výkonu 1500 W. Požadovaného výkonu by sa dalo dosiahnuť aj pomocou iných kriviek, ale stroj by už nepracoval v maximálnom bode využitia. Ďalej sú na obrázku č. 5.10 vidieť ďalšie krivky, ktoré boli vypočítané pri návrhu stroja. K porovnaniu so zvolenou krivkou (žltá krivka) si môžeme zobrať krivku 2.5 A. Pri tomto nastavení prúdu sa požadovaného výkonu dosiahne už pri 10° natočenia. Vo

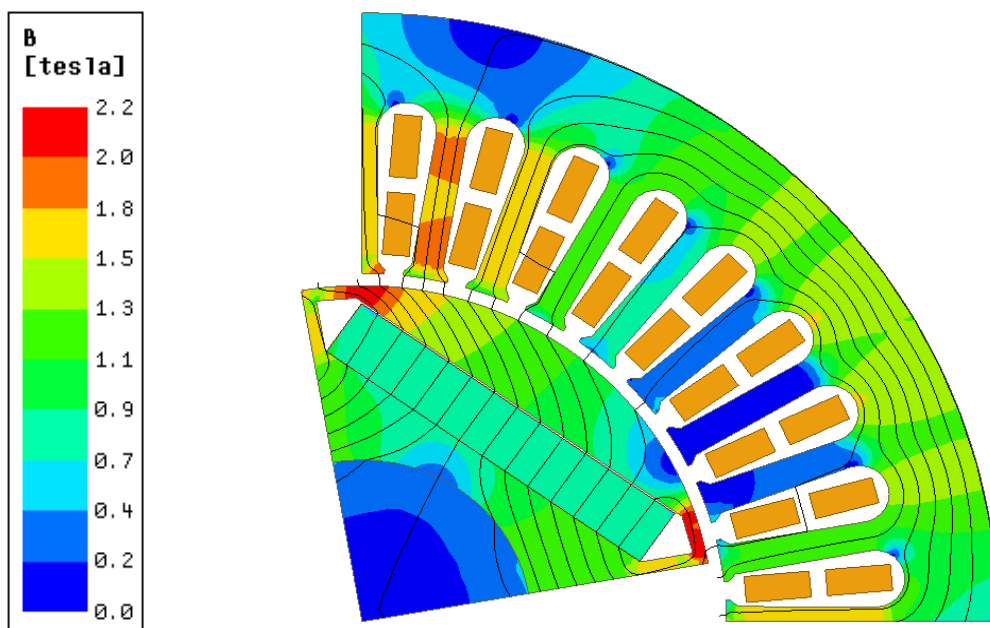
vybranom bode (rovnaké umiestnenie ako s vybranou krivkou) dosahuje výkonu 1617 W pri natočení 25°.

Ako je možné vidieť na obrázku č. 5.11, tak moment ktorý vytvorí synchronný stroj s vnorenými permanentnými magnetmi v menovitom bode, dosahuje hodnotu 9.62 Nm pri použití uhlu prúdu 25° a veľkosti prúdu 2.35 A. Táto krivka je vyznačená žltou farbou. K porovnaniu si môžeme zobrať napríklad krivku pre 2.1 A. Táto krivka je vyznačená oranžovou farbou a moment V vo vybranom bode (rovnaké umiestnenie ako s vybranou krivkou) dosahuje hodnoty 8.52 Nm.



Obrázok č. 5.11: Závislosť momentu na uhle natočenia

IPM stroj v zaťaženom stave dosahuje hodnotu momentu 9.62 Nm a hodnotu výkonu 1511.44 W. Pri využití stroja v menovitom bode dosahuje zvlnenie momentu hodnoty 1.108 mNm.



Obrázok č. 5.12: Magnetická indukcia a indukčný tok v zaťaženom stave

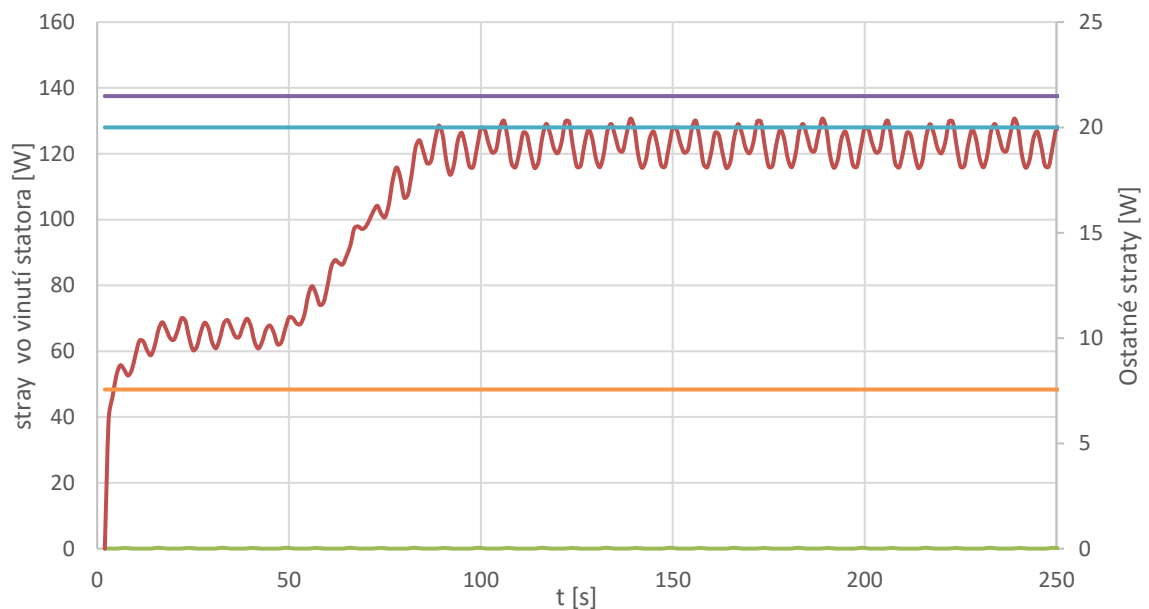
Ako je možné vidieť na obrázku č. 5.12, najväčšia magnetická indukcia sa nachádza na rozhraní vzduchovej medzery a dodatočného priestoru pre permanentný magnet. Hodnoty ktoré dosahuje magnetická indukcia v rôznych miestach stroja sú uvedené v tabuľke č. 8.

Maximálna magnetická indukcia v jarme statora	1.47 T
Maximálna magnetická indukcia v zube statora	1.76 T
Maximálna magnetická indukcia v hlave zubu statora	1.88 T
Maximálna magnetická indukcia v mostíku povrchu rotora	2.36 T
Maximálna magnetická indukcia v jarme rotora	0.99 T

Tabuľka č. 8: Namerané hodnoty indukcie v zaťaženom stave

Straty v zaťaženom stave môžeme vidieť na obrázku č. 5.13. Pri vykresľovaní tepelných strát nesmieme zabudnúť dať prepočítať veľkosť odporu, ktorý je závislý na teplote. Pri návrhu tohto stroja sa odpor zmenil z 7.1 Ω pri teplote 20 $^{\circ}\text{C}$ na 10.65 Ω pri teplote 150 $^{\circ}\text{C}$.

Pri návrhu stroja v zaťaženom stave v prostredí Ansys Maxwell, nesmieme zabudnúť zmeniť teplotu magnetov, ktorá nám ovplyvňuje parametre magnetu a tým pádom aj magnetického toku a magnetickej indukcie. V tomto prípade sa teplota magnetov zvýši z 20 $^{\circ}\text{C}$ na 150 $^{\circ}\text{C}$.



Obrázok č. 5.13: Prehľad strát v čase

Na Obrázku č. 5.13 sú vyznačené jednotlivé straty stroja v závislosti na čase. Jednotlivé straty sú od seba farebne vyznačené (straty vo vinutí statora žltá, straty železe oranžová,

ventilačné straty modrá, straty v magnetoch zelená). Ako ostatné straty rozumieme straty ventilačné, v železe a straty v magnetoch.

Straty vo vinutí statora	137.51 W
Straty v železe	18.399 W
Extra straty	7.556 W
Ventilačné straty	20.000 W
Straty v permanentných magnetoch	0.075 W

Tabuľka č. 9: Straty v zat'aženom stave

Ako je možné vidieť z tabuľky č. 9, hodnota strát v statore dosahuje hodnoty 137.51 W. V porovnaní so stratami v železe sú pomerne veľké. Straty v železe dosahujú hodnotu približne 18.4 W. Pri stratách, ktoré sú uvedené v tabuľke č. 9 navrhovaný synchronný stroj s vnorenými permanentnými magnetmi dosahoval hodnotu účinnosti 89.2 %. Pri takomto rozložení strát by bolo vhodné pri ďalšom návrhu stroja zlepšiť pomer strát v statore a železe statora.

Pri zostrojení fázorového diagramu vychádzame z hodnôt, ktoré boli prepočítané do d a q osy. Prepočítané hodnoty do d a q osy je možné vidieť v tabuľke č. 10.

Pre prepočet do d a q osy boli využité tieto vzorce:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = C^T \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

V rovnici (5.1) uvedené písmeno C. C je transformačná matica, ktorá bola použitá v transponovanom tvare.

$$C = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \cos(\theta - \frac{2}{3}\pi) & -\sin(\theta - \frac{2}{3}\pi) \\ \cos(\theta + \frac{2}{3}\pi) & -\sin(\theta + \frac{2}{3}\pi) \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

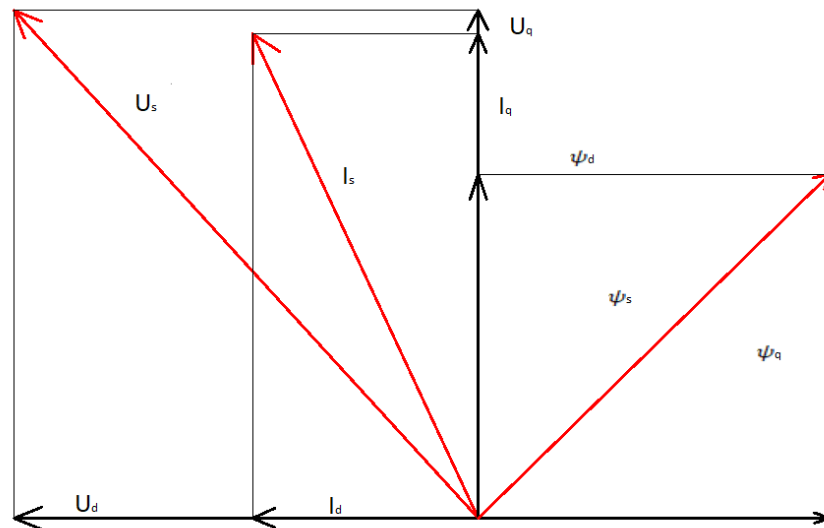
Kde θ je uhol vyjadrený v elektrických stupňoch.

$$\begin{bmatrix} L_d \\ L_q \end{bmatrix} = C^T * L_{abc} * C \quad (5.3)$$

$$L_{abc} = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

Prúd v ose d	I_d	-1.405 A
Prúd v ose q	I_q	3.012 A
Spriahnutý magnetický tok v ose d	ψ_d	0.732 Wb
Spriahnutý magnetický tok v ose q	ψ_q	0.713 Wb
Indukované napätie v ose d	U_d	-216.732 V
Indukované napätie v ose q	U_q	236.879 V
Indukčnosť v ose d	L_d	82.5657 mH
Indukčnosť v ose q	L_q	189.179 mh

Tabuľka č. 10: Prepočítané hodnoty do d a q osy



Obrázok č. 5.14: Fázorový diagram navrhovaného stroja

Pri konštrukcii fázorového diagramu boli hodnoty napätia a zpriahnutého magnetického toku prepočítané v pomeroch (napätie 15:1, zpriahnutý magnetický tok 1:15 a prúd 1:5).

V tabuľke č. 11 na nachádzajú výsledky z programu Ansys Maxwell v zaťaženom stave. Táto tabuľka slúži k zhrnutiu výsledkov v zaťaženom stave.

Výkon stroja	1511.442 W
Moment stroja	9.622 Nm
Účinnosť stroja	89.2 %
Účinník stroja	0.949
Prúd v stroji	2.347 A
Normalizovaná zložka magnetickej indukcie uprostred vzduchovej medzery	0.804 T
Priemerná hodnota indukovaného napätia vo fáze	229.89 V

Tabuľka č. 11: Výsledky v zaťaženom stave

Ako je možné vidieť v tabuľke č. 6, tak navrhnutý motor dosahuje výkonu 1511.442 W, pričom požadovaný výkon stroja je 1500 W. To znamená, že stroj splňuje požiadavky na potrebný výkon. Zároveň splňuje potrebný moment stroja, ktorý je u navrhnutého stroja vyšší o 0.122 Nm. Navrhnutý stroj v zaťaženom stave pri dodržaní požadovaných parametrov dosahuje účinnosť 89.2 %.

Po dokončení výpočtov a simulácií môžeme porovnať výsledky z overenia a počiatočného návrhu v RMXprt, Ansys Maxwell a Matlabe. Na začiatok porovnáme výsledky magnetických indukcií v stave stroja naprázdno. Magnetická indukcia v statorovom jarme dosahovala hodnoty 1.720 T v programe RMXprt, v Ansys Maxwell sa dosiahlo hodnoty 1.68T a v programe Matlab bola uvažovaná hodnota 1.7 T. Ďalej magnetická indukcia v zube statora je v programoch Matlab a RMXprt rovnaká, a to z toho dôvodu, že zub sa uvažuje ako časť jarma statora, avšak v Ansys Maxwell bola hodnota magnetickej indukcie v zube 1.35 T a v hlave zubu dosahuje magnetická indukcia hodnotu 1.1 T. Magnetická indukcia v rotore dosahovala hodnôt 1.2 T, v Ansys Maxwell 0.957 T a v RMXprt a v Matlabe bola hodnota uvažovaná 1.5 T. Ako je možné vidieť, tak sa hodnoty indukcií nezhodujú. Najpresnejší výpočet nám poskytuje program Ansys Maxwell, a to z dôvodu používania konečno-prvkovej metódy.

Ďalej môžeme porovnať výsledky uhlu prúdu. V programe RMXprt dosahovala hodnota uhlu 26.53°, táto hodnota sa od výsledku v programe Ansys Maxwell líši iba o 1.53°. Tento rozdiel je takmer zanedbateľný a výsledok sa dá považovať za zhodný.

6 ZÁVER

Táto bakalárska práca sa zaoberala návrhom synchronného stroja s vnorenými permanentnými magnetmi. Tento typ stroja bol zvolený z toho dôvodu, že v súčasnej dobe sú synchronne stroje na vzostupe, a to najmä vďaka automobilovému, ale aj širšiemu elektroenergetickému priemyslu.

V úvode teoretickej časti tejto bakalárskej práce sa pojednáva o synchronných strojoch s permanentnými magnetmi ako celku z teoretického hľadiska. Práca sa zaoberá ich princípom fungovania, ale aj popisáním synchronného stroja v ustálenom stave za využitia náhradnej schémy stroja. Zároveň sú u synchronného stroja s vnorenými permanentnými magnetmi popísané druhy rotora a ich porovnanie medzi sebou, ale aj so strojom s permanentnými magnetmi na povrchu rotora. Teoretická časť sa ďalej zaoberá metodológiou elektromagnetického návrhu stroja, ako aj samotným elektromagnetickým návrhom stroja s vnorenými permanentnými magnetmi.

Praktická časť sa dá potom rozdeliť do dvoch separátnych častí. Prvá časť predstavuje samotný návrh stroja s požadovanými parametrami v počítačovom prostredí Matlab. Druhá potom overenie navrhnutého stroja a jeho doladenie k požadovaným parametrom.

V počítačovom prostredí Matlab bol vytvorený skript pre elektromagnetický návrh stroja, ktorý ako vstup používa požadované parametre stroja. Všetky hodnoty však nie sú dané ako požadované parametre. Časť hodnôt musela byť vyhľadaná v odbornej literatúre pre požadované prevedenie synchronného stroja s vnorenými permanentnými magnetmi, ako napríklad tangenciálne napätie, ktorého hodnota bola určená na 21 kPa alebo magnetická indukcia v zube 1.7 T.

Po spracovaní požadovaných parametrov a dohľadání potrebných hodnôt sa následne dostaneme k navrhnutému stroju, kedy po získaní výsledkov a teda dosiahnutí prvotného návrhu stroja, môžeme prejsť k jeho overeniu či splňuje požadované parametre.

Ako prvý postup k overeniu navrhnutého stroja sa použil program RMXprt, ktorý využíva analytického výpočtu pre dosiahnutie požadovaných parametrov stroja. Ako vstupné parametre pre RMXprt boli použité vypočítané hodnoty zo skriptu v Matlabe. Po prvotnom výpočte v RMXprt sa zistilo, že navrhnutý stroj úplne nesplňuje požadované parametre. V dôsledku toho bolo potrebné navrhnutý stroj doladiť, a to tak že sa zväčšil počet vodičov v drážke a zároveň boli navýšené rozmery permanentných magnetov v rotore. Tieto nepresnosti mohli byť spôsobené použitými vzorcami a preto by bolo lepšie použiť metódu konečných prvkov. Pokiaľ by sme chceli dosiahnuť lepších výsledkov z programu Matlab, tak by bolo možné napríklad použiť viac bodov v B-H krivke, upresniť použité vzorce alebo pri výpočte výšky permanentných magnetov použiť viac krokov aproximácie a zvýšiť hodnotu počiatočného odhadu.

Následne po úpravách stroja tak aby splňoval požadované parametre, môžeme prejsť k overeniu stroja v programe Ansys Maxwell. Program Ansys Maxwell používa konečno-prvkovú sieť k dosiahnutiu výsledkov navrhnutého synchronného stroja. Pri overovaní stroja v Ansys Maxwell sa vymodelovala štvrtina stroja, a to z dôvodu, že je stroj osovo symetrický. Po vymodelovaní stroja a nastavení sa nechala vygenerovať konečno-prvková

sieť s malou úpravou, ktorá spočívala v zjemnení konečno prvkovej siete vo vzduchovej medzere, tak aby naprieč vzduchovou medzerou bolo aspoň 5 výpočtových bodov.

Následne bol stroj otestovaný v stave naprázdno a v zaťaženom stave. V zaťaženom stave dosahoval navrhnutý stroj celkové straty vo výške 183.5 W. Podľa rozdelenia mali straty v železe hodnotu 18.4 W a straty v statore 137.51 W. Pre navrhovaný stroj by bolo vhodnejšie keby mal vyváženejší pomer medzi stratami v železe a stratami v statore. Toho by sa dosiahlo zväčšením drážok a zmenšením statorového jarma. Avšak aj pri dosiahnutom pomere strát dosahoval stroj účinnosť 89.2 %.

Po overení v programe Ansys Maxwell sa dá teda tvrdiť, že navrhnutý stroj spĺňa požadované parametre, a je tak správne elektromagneticky navrhnutý.

7 LITERATÚRA

- [1] PYRHONEN, Juha., Tapani JOKINEN a Valeria HRABOVCOVÁ. Design of rotating electrical machines. Second edition. Chichester, West Sussex, United Kingdom: Wiley, 2014. ISBN 978-1-118-58157-5.
- [2] HRABOVCOVÁ Valéria, Ladislav JANOUŠEK, Pavol RAFAJDUS a Miroslav LIČKO. MODERNÉ ELEKTRICKÉ STROJE. Žilina: Žilinská univerzita, 2001. ISBN 80-7100-809-5.
- [3] J. Pyrhönen, T. Jokinen, and V. Hrabovcova, Design of Rotating Electrical Machines. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2008.
- [4] PYRHÖNEN, Juha, Valeria HRABOVCOVÁ a Scott SEMKEN. *Electrical machine drives control: an introduction*. Chichester, West Sussex, United Kingdom: Wiley, 2016. ISBN 978-1-119-26045-5.
- [5] CHEN, Hong, Ronghai QU, Jian LI a Bo ZHAO. Comparison of Interior and Surface Permanent Magnet Machines with Fractional Slot Concentrated Windings for Direct-Drive Wind Generators. *International Conference on Electrical Machines and Systems*. 2014, 17(1), 6.
- [6] FINKEN, Thomas, Marco HOMBITZER a Kay HAMEYER. Study and Comparison of several Permanent-Magnet excited Rotor Types regarding their Applicability in Electric Vehicles. -. 2012, 7.
- [7] PONOMAREV, Pavel. *TOOTH-COIL PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MACHINE DESIGN FOR SPECIAL APPLICATIONS*. Lappeenranta, Finland, 2013. Doctor of Science. University of Technology.
- [8] PYRHÖNEN, Juha, Tapani JOKINEN a Valéria HRABOVCOVÁ. Three-phase permanent magnet motor with rotor surface magnets, a two-layer integral slot winding and open-circuit cooling. *Design of Rotating Electrical Machines*. 2014, 29.
- [9] PYRHÖNEN, Juha, Tapani JOKINEN a Valéria HRABOVCOVÁ. Three-phase squirrel cage motor with a two-layer integral slot winding and totally enclosed fan cooling. *Design of Rotating Electrical Machines*. 2014, 35.
- [10] FITZGERALD, A.E., Charles KINGSLEY, JR a STEPHEN D. UMANS. Electric machinery. 7th ed. New York: McGraw-Hill Higher Education, 2013. ISBN 0073380466.

- [11] HENDERSHOT, J. R. a T. J. E. MILLER. Design of brushless permanent-magnet machines. Venice, Florida: Motor Design Books, c2010. ISBN 9780984068708.
- [12] GIERAS, Jacek F. Permanent magnet motor technology: design and applications. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, c2010. ISBN 9781420064407.

PRÍLOHY

```

%% Pociatocne hodnoty
P= 1500; %vykon [W]
n= 1500; %otacky [ot/min]
Otang= 21000; %tang napatie [Pa]
m= 3; %počet fazy
U= 400/sqrt(3); %fazove napatie [V] % 400/sqrt(3)
f= 50; %frekvencia [Hz]
p= 2; %pocet polovych dvojic
w=2*pi*f; %uhlova r
uci= 0.95; %ucinnost
cosFi= 1; % ucinnik
nn=1500;
M=P/(2*pi*(nn/60)); %moment
alfaFi=2/pi;%saturacny faktor
kfe=0.97; %cinitel plneni zeleza
mi0=4*pi*10^-7;%permeabilita vakua
alfaPM=0.8;

y=7e-7;%3E-7

q=3; %pocet statorovych drazok na pol a fazu

%N 33UH Arnold Magnetics
Hc=891e3;
Br=1.175;

%BH curve
B      =[0.0; 0.1; 0.2; 0.3; 0.4; 0.5; 0.6; 0.7; 0.8; 0.9; 1; 1.1; 1.2; 1.3; 1.4;
1.5; 1.6; 1.7; 1.8];
H      =[0.0; 27.7; 36.4; 42.4; 47.8; 52.9; 58.3; 64.1; 71.0; 79.7; 91.8; 110; 140;
205; 399; 1097; 2925; 6118; 10828];

%Coefficient DesignConstant.C vs maximum flux density of the stator or rotor yoke
By=[0.0; 0.1; 0.2; 0.3; 0.4; 0.5; 0.6; 0.7; 0.8; 0.9; 1; 1.1; 1.2; 1.3; 1.4; 1.5; 1.6;
1.7; 1.8; 1.9];
c=[0.72; 0.72; 0.72; 0.72; 0.72; 0.72; 0.71; 0.70; 0.67; 0.63; 0.57; 0.48; 0.40; 0.33;
0.26; 0.20; 0.17; 0.16; 0.15; 0.14];

%%
%%Vypocty

% velkost rotora
Vr=M/(2*Otang); %Objem rotora
X=(pi*sqrt(p))/(4*p);
Dr=((4*Vr)/(pi*X))^(1/3);
Dr=(Dr*100)/100;
lr=X*Dr;%dlzka rotoru

%%
%%Vzduchova medzera hustota toku a linearna hustota toku
Bpeak=0.95; % T

```

```

Bmax=((2*Bpeak)/(pi))*(cos(25)-cos(155));
A=(Otang*sqrt(2))/(Bpeak*cosFi);

%%
%vzduchova medzera
Qs=2*p*m*q; %statorove drazky
TauP=(pi*Dr)/(2*p);

Delta=y*TauP*(A/Bpeak);

Ds=Dr+2*Delta;

nv=0; bve=0; bv=0;

l=lr-nv*bve+0.5*Delta; %% velkost jadra bez chladiacich ciest %

%%
%statorove a rotorove vinutie
W=5/6; % winding pitch
Tauus=(pi*Ds)/Qs;%stator slot pitch/vzdialenost stredov os drazok

%%
%%Pocet zavitev vo fazovom vinuti
Em=U;%napatova indukcia vzduchovej medzery
kw=((p*m)*2*sin(W*(pi/2))*sin(pi/(m*2)))/(Qs*sin(pi*(p/Qs))); %faktor vinutia
Ns=(sqrt(2)*Em)/(w*kw*0.9*alfaPM*Bmax*TauP*lr);%pocet zavitev

a=1;
zQ=2*a*m*(Ns/Qs); %pocet vodivcov
ZQ=floor(zQ);
N=(Qs*ZQ)/(2*a*m); %pocet zavitev vo fazy

%%
%%Novy Bpeak
Bmax=(zQ/ZQ)*Bmax;

%%
%%statorove drazoky
Bdapps=1.7;% [T]
bds=(lr*Tauus*Bmax)/(kfe*(1-nv*bv)*Bdapps);

Is=P/(m*uci*U*cosFi);%statorovy prud
Js=4.5*(10^6);%statorova hustota prudu [A/mm2]
Scs=Is/(a*Js);%priestor 1 statoroveho vodica v drazke
kcus=0.63;
Scus=(ZQ*Scs)/kcus;

b1=0.003;
h1=0.001;
h2=0.002;
h3=0.0005;
h5=0.0004;%musi pasovat na Scus

```



```

h6=0.0005;
hh=0.0005;

b4=((pi*(Ds+2*(h1+h2)))/Qs)-bds;
b4c=b4+((2*pi*h3)/Qs)-2*h6;%b4c musi byt mensie nez b4
b5c=b4c+((2*pi*h5)/Qs);%b5c musi byt vacsie nez b4
Scusk=((b4c+b5c)/2)*h5+(pi/8)*(b5c^2);%Scusk musi byt vacsie nez Scus

while Scusk<Scus
    h5=h5+0.0001;
    b4c=b4+((2*pi*h3)/Qs)-2*h6;%b4c musi byt mensie nez b4
    b5c=b4c+((2*pi*h5)/Qs);
    Scusk=((b4c+b5c)/2)*h5+(pi/8)*(b5c^2);

end
b5=b5c+2*h6;
h4=h5+(b5c/2);
Sslot=b1*h1+h2*((b4/2)+(b1/2))+h3*(b4+((pi*h3)/Qs))+((b4+b5)/2)*h5+(pi/8)*(b5^2);

%%
%%over the tooth
Hd=interp1(B,H,Bdapps,'pchip');
htot=h4+h3+h2+h1+h6;
Umds=Hd*(h3+h5);

%%
%%Statorove a rotorove jarmo
kappa=(atan(b1/(2*Delta))-((2*Delta)/b1)*log(sqrt(1+(b1/(2*Delta))^2)))*(2/pi);% kappa
pre stator
kcls=Tauus/(Tauus-kappa*b1);%karterov cinitel pre stator

hbr=0.0015;% thickness of iron bridges lepsie udat niaku hodnotu mm
lbr=2*hbr;
lsat=2*lbr;
kappaR=(atan(lsat/(2*Delta))-((2*Delta)/lsat)*log(sqrt(1+(lsat/(2*Delta))^2)))*(2/pi);%
kappa pre rotor

kclr=Tauus/(Tauus-kappaR*lsat);

DeltaE=kclr*kcls*Delta;

hglue=0.0002;

Ume=(Bmax/mi0)*(DeltaE+hglue);

Bsat=2.3;% T

Im=(alfaPM*Bmax*Taup*lr);%znemsene alfaPM

Bys=1.4;Hymaxs=interp1(B,H,Bys,'pchip');cs=interp1(By,c,Bys,'pchip');
Byr=1.5;Hymaxr=interp1(B,H,Byr,'pchip');cr=interp1(By,c,Byr,'pchip');

hys=Im/(2*kfe*(lr-nv*bv)*Bys);

```

```

Dys=Ds+2*(h1+h2+h3+h4+h6);% priemerny parameter statoroveho jarma
Tauys=(pi*(Dys+2*htot+hys))/(2*p);
Umys=Hymaxs*Tauys;

Im=(alfaPM*Bmax*Taup*1)*1.1+(2*Bsat*hbr*lr);
wPM=(Dr-4*hbr)*sin((alfaPM*pi)/(2*p)); % delka magnetu

hyr=(Im)/(2*kfe*(lr-nv*bv)*Byr);
hPM=0.001;
hPMn=hPM;

while hPMn == hPM % vyska PM magnetu
Dyr=Dr-2*hPMn-hyr;
Tauyr=(pi*Dyr)/(2*p);
Umyr=cr*Hymaxr*Tauyr;
UmPM=(Hc/Br)*Bmax*hPM;
hPMn=(Ume+Umds+Umys+Umyr+UmPM)/Hc;
end

BPM=Im/(wPM*lr);
Dri=Dyr-hyr;%inner rotor diameter
Dse=Dys+hys;%outter stator diameter

%%
% % Printing results
clc %Command window cleaning
str = sprintf('IPM stroj parametry: %10.0fW\n', P );
disp(str);
str = sprintf(...
'Qs %10.0f zQ %10.0f l %10.3f mm',Qs,zQ,l*1000);
disp(str);
str = sprintf(...
'Dse %10.3f mm Ds %10.3f mm Dr %10.3f mm Delta %10.3f
mm\n',Dse*1000,Ds*1000,Dr*1000,Delta*1000);
disp(str);
str = sprintf (...
'Statorova drazka navrh');
disp(str);
str = sprintf(...
'h5s %10.3f mm b4s %10.3f mm b5s %10.3f mm htot %10.3f
mm\n',h5*1000,b4c*1000,b5c*1000,htot*1000);
disp(str);
str = sprintf (...
'Rotorovy navrh');
disp(str);
str = sprintf(...
'hbr %10.3f mm lbr %10.3f mm\n',hbr*1000,lbr*1000);
disp(str);
str = sprintf (...
'Permanentni magnety');
disp(str);
str = sprintf(...
'hPM %10.3f mm wPM %10.3f mm\n',hPMn*1000,wPM*1000);
disp(str);

```