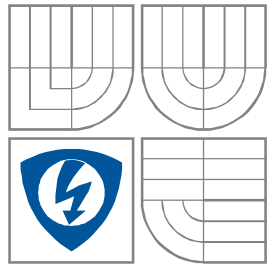


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A
KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY
A ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC
ENGINEERING

ANALÝZA SOUSTŘEDĚNÝCH VINUTÍ SYNCHRONNÍCH MOTORŮ S PERMANENTNÍMI MAGNETY

ANALYSIS OF CONCENTRATED WINDINGS OF PMSM

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

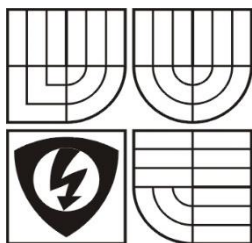
LUKÁŠ MENOŠEK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ONDŘEJ VÍTEK, Ph.D.

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Student: Menoušek Lukáš

ID: 140249

Ročník: 3

Akademický rok: 2013/14

NÁZEV TÉMATU:

Analýza soustředěných vinutí synchronních motorů s permanentními magnety

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Seznamte se s konstrukcí, principem funkce synchronních motorů s permanentními magnety. Na základě literatury vytvořte přehled realizovaných a publikovaných řešení těchto motorů se soustředěným vinutím, porovnejte vzájemně jejich přednosti a nedostatky.
2. Provedte analýzu vlastností jednotlivých vybraných typů soustředěných vinutí z pohledu vzniku prostorových harmonických magnetického pole. Vytvořte model zadaného motoru s různými typy soustředěných vinutí v programu FEMM a srovnajte výsledky.
3. Vypočtete parametry zadaného motoru v programu RMxprt, upravte magnetický obvod pro různé typy soustředěných vinutí a srovnajte jednotlivé varianty.
4. Vytvořte model zadaného motoru s vybranými typy soustředěných vinutí v programu Maxwell. Analyzujte vliv prostorových harmonických magnetického pole na ztráty v permanentních magnetech

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle doporučení vedoucího

Termín zadání: 27.9.2013

Termín odevzdání: 2.6.2014

Vedoucí projektu: Ing. Ondřej Vítek

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor semestrální práce nesmí při vytváření semestrální 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 § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá konstrukcí, principem funkce synchronních strojů s permanentními magnety a analýzou jejich vlastností. V rámci práce je provedeno seznámení se s materiály permanentních magnetů a jejich uspořádání, dále pak konstrukcí motoru, kde jsou rozebrány typy vinutí, konfigurace stroje, typy motorů s permanentními magnety a přehled realizovaných řešení. V další části této práce je provedena analýza vlastností vybraných typů soustředěných vinutí se zaměřením na vznik jejich prostorových harmonických. Tyto data jsou pak srovnána s modelem motoru v programu FEMM. Dále je provedeno srovnání výpočtů těchto typů motorů a jejich simulací v programu RMxpert.

Klíčová slova

Synchronní stroje s permanentními magnety, permanentní magnety, materiály permanentních magnetů, konstrukce motoru, typy motorů s permanentními magnety, PMSM, stator, rotor, vinutí, analýza prostorových harmonických, FEMM, Ansoft RMxpert

Abstract

This thesis deals with the design, principles of permanent magnet synchronous machines and an analysis of their properties. As part of the work is done familiarization with the materials of permanent magnets and their arrangement, as well as construction of the engine where they are discussed types of winding machine configuration, types of motors with permanent magnets and the list of implemented solutions. In the next section of this paper is an analysis of the properties of selected types of concentrated winding with a focus on the emergence of harmonics. These data are compared with the model of the engine in the FEMM. Furthermore, a comparison of the calculations of these types of engines and their simulation in RMxpert.

Keywords

Permanent magnet synchronous machines with, permanent magnets, permanent magnet materials, engine design, types of permanent magnet motors, PMSM, stator, rotor, coil, analysis of harmonics, FEMM, Ansoft RMxpert

Bibliografická citace

MENOUŠEK, L. *Analýza soustředěných vinutí synchronních motorů s permanentními magnety*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 61 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Ondřej Vitek, Ph.D..

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Analýza soustředěných vinutí synchronních motorů s permanentními magnety jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrální 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 § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

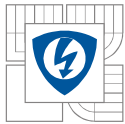
Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Ondřeji Vítkovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé semestrální práce.

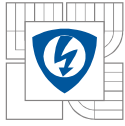
V Brně dne

Podpis autora

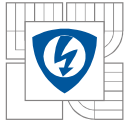


OBSAH

OBSAH	7
SEZNAM OBRÁZKŮ	9
SEZNAM TABULEK	12
ÚVOD	17
1 PERMANENTNÍ MAGNETY	18
1.1 USPOŘÁDÁNÍ PERMANENTNÍCH MAGNETŮ	18
1.2 MATERIÁLY PERMANENTNÍCH MAGNETŮ:	19
1.2.1 ALNIKO	19
1.2.2 FERITOVÉ MAGNETY	19
1.2.3 MAGNETY ZE VZÁCNÝM ZEMIN	20
1.3 MAGNETIZACE PERMANENTNÍCH MAGNETŮ	21
2 KONSTRUKCE MOTORU	21
2.1 STATOR	21
2.2 TYPY VINUTÍ	22
2.3 MOTORY S PERMANENTNÍMI MAGNETY	23
2.3.1 STEJNOSMĚRNÉ KOMUTÁTOROVÉ MOTORY	24
2.3.2 BEZKARTÁČOVÉ MOTORY	24
2.3.3 KROKOVÝ MOTOR.....	26
2.4 KONFIGURACE STROJE	26
2.4.1 MOTOR S RADIÁLNÍM POLEM.....	27
2.4.2 MOTOR S AXIÁLNÍM POLEM.....	27
3 TYPY PMSM	28
3.1 SURFACE MOUNTED PMSM (S MAGNETY NA POVRCHU)	28
3.2 SURFACE-INSET PMSM (SE ZAPUŠTĚNÝMI MAGNETY)	29
3.3 INTERIOR PMSM (S VNOŘENÝMI MAGNETY)	30
3.4 LINE-START PMSM	30
3.5 HYBRIDNÍ PMSM STROJE	31

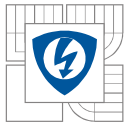


3.5.1 FLUX REVERSAL PMSM.....	31
3.5.2 FLUX SWITCHING MACHINE.....	32
3.5.3 DOUBLY SALIENT PM MACHINE.....	33
4 ANALÝZA PROSTOROVÝCH HARMONICKÝCH MAGNETICKÉHO POLE U SOUSTŘEDĚNÉHO VINUTÍ	33
4.1 $Q_s/2P = 12/10$	33
4.2 $Q_s/2P = 18/16$	34
5 MODEL MOTORU V PROGRAMU FEMM.....	36
5.1 $Q_s/2P = 12/10$ S JEDNOVRSTVÝM VINUTÍM	36
5.2 $Q_s/2P = 12/10$ S DVOUVRSTVÝM VINUTÍM.....	38
6 NÁVRH PMSM MOTORU $Q_s/2P = 18/16$	40
6.1 NÁVRH STATOROVÉHO PLECHU.....	41
6.1.1 VÝPOČET VNITŘNÍHO MOMENTU STROJE.....	42
6.1.2 VÝPOČET PROUDU VE VODIČI.....	42
6.1.3 VÝPOČET ZTRÁT VE VINUTÍ STATORU	43
6.1.4 NÁVRH VÝŠKY MAGNETU.....	44
6.1.5 OVĚŘENÍ DIMENZOVÁNÍ MAGNETU PROTI TRVALÉ DEMAGNETIZACI PŘI MAXIMÁLNÍM PROUDOVÉM PŘETÍŽENÍ.....	46
6.1.6 NÁVRH POČTU ZÁVITŮ STATOROVÝCH CÍVEK.....	47
6.1.7 NÁVRH VÝŠKY JHA ROTORU	48
6.2 OVĚŘENÍ NAVRŽENÉHO MODELU V PROGRAMU FEMM	48
6.2.1 ÚPRAVA STATOROVÉHO PLECHU	49
6.2.2 OVĚŘENÍ UPRAVENÉHO MODELU V PROGRAMU FEMM	51
7 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ NÁVRHU MOTORU $Q_s/2p=12/10$ S NÁVRHEM MOTORU $Q_s/2p=18/16$.....	54
ZÁVĚR.....	58
LITERATURA	60

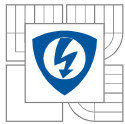


SEZNAM OBRÁZKŮ

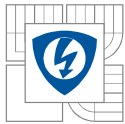
<i>Obrázek 1</i> Obdelníkový, radiální a bochníkový tvar permanentních magnetů.....	18
<i>Obrázek 2</i> Stator BLDC stroje s vinutím [10].....	22
<i>Obrázek 3</i> Rozložené vinutí statoru [11].....	22
<i>Obrázek 4</i> Soustředěné vinutí statoru [12]	23
<i>Obrázek 5</i> Příklad konstrukce BLDC motoru [13]	25
<i>Obrázek 6</i> Příklad konstrukce krokového motoru [14].....	26
<i>Obrázek 7</i> Porovnání radiálního a axiálního pole [15].....	27
<i>Obrázek 8</i> Surface mounted PMSM [1]	28
<i>Obrázek 9</i> Surface-Inset PMSM [1].....	29
<i>Obrázek 10</i> Interior PMSM [1].....	30
<i>Obrázek 11</i> Flux reversal PMSM[1].....	31
<i>Obrázek 12</i> Flux Switching Machine [1]	32
<i>Obrázek 13</i> $Q_s/2p = 12/10$ Schéma motoru [4]	33
<i>Obrázek 14</i> $Q_s/2p = 12/10$ průběh harmonických pro jednovrstvého vinutí [9]	34
<i>Obrázek 15</i> $Q_s/2p = 12/10$ průběh harmonických pro dvouvrstvé vinutí [9]	34
<i>Obrázek 16</i> $Q_s/2p = 18/16$ Schéma motoru [4]	34
<i>Obrázek 17</i> $Q_s/2p = 18/16$ průběh harmonických pro jednovrstvé vinutí [17].....	35
<i>Obrázek 18</i> $Q_s/2p = 18/16$ průběh harmonických pro dvouvrstvé vinutí [17]	35
<i>Obrázek 19</i> Průběh normálové složky mag. indukce ve středu vzduchové mezery pro M400-50A lineární	36
<i>Obrázek 20</i> Průběh normálové složky mag. indukce ve středu vzduchové mezery pro M400-50A nelineární.....	36
<i>Obrázek 21</i> $Q_s/2p = 12/10$ průběh harmonických u jednovrstvého vinutí s lineární charakteristikou	37



Obrázek 22 $Q_s/2p = 12/10$ průběh harmonických u jednovrstvého vinutí s nelineární charakteristikou.....	37
Obrázek 23 $Q_s/2p = 12/10$ průběh harmonických u jednovrstvého vinutí s lineární charakteristikou	37
Obrázek 24 $Q_s/2p = 12/10$ průběh harmonických u jednovrstvého vinutí s nelineární charakteristikou.....	37
Obrázek 25 Průběh normálové složky mag. indukce ve středu vzduchové mezery pro M400-50A lineární	38
Obrázek 26 Průběh normálové složky mag. indukce ve středu vzduchové mezery pro M400-50A nelineární.....	38
Obrázek 27 $Q_s/2p = 12/10$ průběh harmonických u dvouvrstvého vinutí s lineární charakteristikou	38
Obrázek 28 $Q_s/2p = 12/10$ průběh harmonických u dvouvrstvého vinutí s nelineární charakteristikou.....	39
Obrázek 29 $Q_s/2p = 12/10$ průběh harmonických u dvouvrstvého vinutí s lineární charakteristikou	39
Obrázek 30 $Q_s/2p = 12/10$ průběh harmonických u dvouvrstvého vinutí s nelineární charakteristikou.....	39
Obrázek 31 Navržený statorový plech.....	41
Obrázek 32 Drážka statorového plechu	41
Obrázek 33 Magnetická indukce ve vzduchové mezeře.....	48
Obrázek 34 Magnetická indukce v zubu statorového svazku	49
Obrázek 35 Upravený statorový plech	49
Obrázek 36 Upravená drážka statorového plechu	50
Obrázek 37 Magnetická indukce ve vzduchové mezeře po úpravě zubu	51
Obrázek 38 Magnetická indukce v zubu statorového svazku po úpravě zubu.....	51

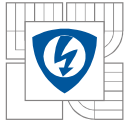


<i>Obrázek 39 Průběh normálové složky mag. indukce ve středu vzduchové mezery pro M235-35A lineární</i>	<i>52</i>
<i>Obrázek 40 Průběh normálové složky mag. indukce ve středu vzduchové mezery pro M235-35A nelineární.....</i>	<i>52</i>
<i>Obrázek 41 $Q_s/2p = 18/16$ průběh harmonických u dvouvrstvého vinutí s lineární charakteristikou</i>	<i>53</i>
<i>Obrázek 42 $Q_s/2p = 18/16$ průběh harmonických u dvouvrstvého vinutí s nelineární charakteristikou.....</i>	<i>53</i>
<i>Obrázek 43 Rozměry drážky pro návrh modelu motoru 12/10</i>	<i>54</i>
<i>Obrázek 44 Demagnetizační charakteristika N35UH [19].....</i>	<i>56</i>
<i>Obrázek 45 Drážka statorového plechu statoru 18/16.....</i>	<i>56</i>



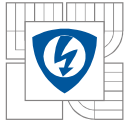
SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1 Zadané parametry motoru.....</i>	<i>40</i>
<i>Tabulka 2 Převzaté parametry stroje</i>	<i>40</i>
<i>Tabulka 3 Rozměry obou typů motoru</i>	<i>54</i>
<i>Tabulka 4 Vstupní parametry pro návrh motorů.....</i>	<i>55</i>
<i>Tabulka 5 Vlastnosti magnetického materiálu N35UH při 20°C.....</i>	<i>55</i>
<i>Tabulka 6 Porovnání vypočtených a namodelovaných parametrů motorů 12/10 a 18/16</i>	<i>57</i>

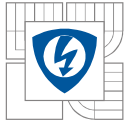


Seznam symbolů a zkratk

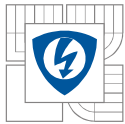
$2p$	počet pólů
B	magnetická indukce
b_{ds1}	šířka drážky
BH_{max}	maximální energetický součin
B_{jr}	magnetická indukce v rotorovém jhu
B_{jST}	magnetická indukce ve statorovém zubu
B_r	remanentní indukce
BLDC	bezkartáčové stejnosměrné motory
B_m	indukce permanentního magnetu
B_r	remanentní indukce
b_{zs}	šířka zubu
B_δ	magnetická indukce ve vzduchové mezeře
$B_{\delta m}$	magnetická indukce pod statorovým zubem
DC	stejnosměrný
D_{dso}	vnější drážkový průměr
D_{js}	přídavný průměr
D_r	průměr rotoru
D_{ro}	průměr jha rotoru
D_{si}	vnitřní průměr statoru
D_{so}	vnější průměr statoru
D_v	maximální průměr vodiče
EMF	indukované napětí
H_c	koercivní síla
h_{ds}	hloubka statorové drážky



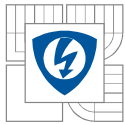
h_{jr}	výška rotorového jha
H_{max}	koercivní síla pro demagnetizaci
H_{PM}	koercivní síla permanentního magnetu
H_{δ}	koercivní síla ve vzduchové mezeře
I_{ef}	efektivní hodnota proudu
I_u	proud cívkou 1
I_v	proud cívkou 2
I_w	proud cívkou 3
I_{tot}	celkový proud řezem stroje
J	proudová hustota
k_c	Carterův činitel
k_{pCu}	činitel plnění drážky
l	délka vodiče
l_{Fe}	délka magnetického obvodu
l_{PM}	výška permanentních magnetů
l_z	délka závitu
M	moment
M_i	vnitřní moment
M_n	jmenovitý moment
m_m	hmotnost stroje
m_{pl}	hmotnost svazku plechů
m_{PM}	hmotnost permanentních magnetů
N	počet vodičů cívkou
N_d	počet vodičů drážky
N_f	počet vodičů fáze



n_0	otáčky bez zatížení
$N_{\text{dráček}}$	počet statorových drážek
n_n	jmenovité otáčky
PMSM	synchronní motory s permanentními magnety
P_n	jmenovitý výkon
Q_{AS}	počet současně aktivních statorových drážek
Q_s	počet drážek
r_δ	střední poloměr vzduchové mezery
S_{ds}	plocha statorové drážky
S_{dsCu}	průřez mědi ve statorové drážce
S_v	průřez vodiče
U_{DC}	napájecí napětí
$U_{mreakce}$	vliv reakčního magnetického pole
ΔP_{cu}	ztráty ve vinutí
ΔP_c	celkové ztráty
ΔP_{Fe}	ztráty v železe
ΔP_{mech}	mechanické ztráty
δ	délka vzduchové mezery
κ	koeficient geometrických rozměrů
μ_0	permeabilita vakua
μ_{rPM}	relativní permeabilita
ϑ_n	provozní teplota
ρ_{20}	rezistivita při 20°C
ρ_{120}	rezistivita při 120°C
σ	efektivní hodnota proudové hustoty



σ_{\max}	proudová hustota
τ_{ds}	drážková rozteč
τ_p	pólová rozteč
ω_0	úhlová rychlost bez zatížení



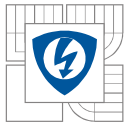
ÚVOD

První motory s permanentními magnety byly vyrobeny již v 19. století, ale z nízká kvalita magneticky tvrdých materiálů odradila od jejich používání ve prospěch elektromagnetických budících systémů. V roce 1932 byl systém permanentních magnetů oživen, ale jeho využití bylo limitováno pouze na malé výkony. V současné době většina komutátorových motorů s permanentními magnety na rotoru používá feritové magnety.

Použití bezkartáčových permanentních motorů se stává více atraktivní volbou než použití asynchronních motorů. Zlepšení v oblasti řízení polovodičových měničů umožňuje jednodušší a ekonomicky efektivní provoz motoru ve velkém rozsahu rychlostí s dobrou účinností.

Bezkartáčový motor má magnety namontované na rotoru a vinutí na statoru. To znamená, že proud kotvy není přenášen přes komutátor, nebo sběrací kroužky nebo kartáče (hlavní části motoru vyžadující údržbu). U bezkartáčových motorů s permanentními magnety je hlavní vinutí umístěno do drážek na statoru, proto se dá teplo způsobené ztrátami v mědi jednodušeji odvést na povrch. U motorů s permanentními magnety jsou tedy všechny ztráty prakticky ve statoru, kde lze teplo snadněji přenášet přes chladicí žebra nebo u větších strojů přes vodní chladicí systém. Dále je možné dosáhnout značného zlepšení v dynamice bezkartáčových pohonů s permanentními magnety, protože má motor menší setrvačnost a větší magnetickou indukci přes vzduchovou mezeru.

Různé formy magnetů umístěné na rotoru vedou k určitým jedinečným vlastnostem stroje a umožňují vysoký počet konfigurací.

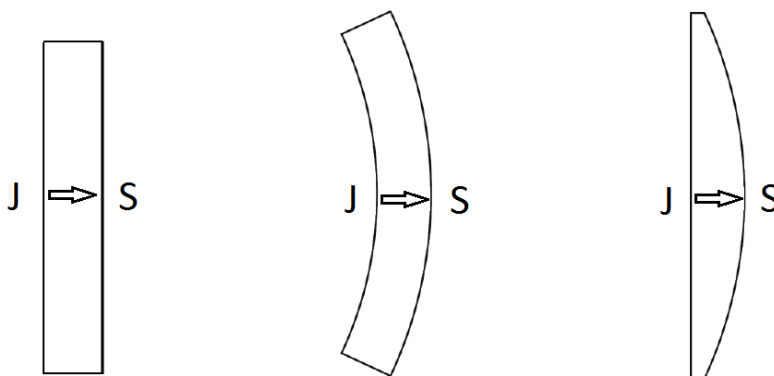


1 PERMANENTNÍ MAGNETY

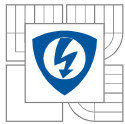
1.1 USPOŘÁDÁNÍ PERMANENTNÍCH MAGNETŮ

Magnety jsou základem každého PMSM stroje. Mohou být provedeny ve mnoha tvarech a velikostech. Nejjednodušší verze pro montáž je magnet ve tvaru kruhu, který se na stator upevní velice lehce a může být pak magnetizován v libovolném směru. Nevýhodou kruhových magnetů je, že jsou drahé oproti klasickým magnetům. Jednotlivé magnety mohou mít jakýkoliv tvar. Každý pól se může skládat z několika magnetických segmentů místo použití jednoho kusu, což přináší značnou výhodu při výrobě, kde jsou kladeny nároky na výslednou cenu a také se dá lépe snížit magnetický tok. Můžou se také skládat různě na sebe a použít různé šířky, čímž získáme požadovaný magnetický tok. Kombinace magnetů mají potom svoje výhody při různých aplikacích. Jeden magnet na pól je ideální pro malé stroje. Pro výkonnější stroje je výhodnější použít vícesegmentové magnety v jednom pólu.

Magnety mohou mít obdelníkový, radiální, nebo bochníkový tvar. Radiální a bochníkový jsou ideální pro montáž do PMSM strojů. Vzduchová mezera je případě radiálního typu rovnoměrná, v případě bochníkového typu je mezera nerovnoměrná, což umožňuje formování magnetického toku. Obdelníkové magnety se běžně používají u rotorů s vnořenými magnety, nejsou vhodné pro montáž na povrch rotoru, protože nemůže být zachována konstantní vzduchová mezera. Jsou možné i jiné tvary magnetů, jsou ovšem omezené na technologii výroby a výrobní náklady, proto se mnoho dalších tvarů nevyrábí.



Obrázek 1 Obdelníkový, radiální a bochníkový tvar permanentních magnetů



Dalším důležitým faktorem je jejich stálost při působení okolních vlivů a mechanické vlastnosti, jako je např. obrobitelnost nebo tvárnost. Jejich demagnetizační křivky se mění s teplotou. [1]

1.2 Materiály permanentních magnetů:

V průběhu let docházelo k objevení a vývoji několika materiálů permanentních magnetů, které tvoří nedílnou součást synchronních motorů s permanentními magnety (PMSM) a komutovaných motorů (BLDC). Jako jeden z prvních se začal používat materiál Alnico, který měl uplatnění v celé výkonové škále. Později byl však nahrazován novějšími materiály.

Rozdělení permanentních magnetů:

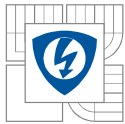
- Alnico - sloučeniny hliníku, niklu, kobaltu a železa
- Feritové magnety - barium a stroncium
- Magnety ze vzácných zemin
 - Samarium-Kobalt (SmCo_5),
 - Neodym-Železo-Bor (NdFeB)

1.2.1 Alnico

Hlavním výhodami tohoto materiálu jsou jeho vysoká magnetická remanentní indukce a nízká teplotní závislost. Jeho teplotní závislost je $-0,02\% \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ a maximální provozní teplota 520°C . Tyto výhody umožňují vysokou hustotu magnetického toku vzduchovou mezerou při vysoké teplotě magnetu. Jeho koercitivní síla je ovšem velmi nízká a proto je jeho demagnetizační křivka velmi nelineární. Z tohoto důvodu je velmi snadné jej magnetizovat, ale také demagnetizovat. Tento materiál byl použit v PMSM motorech s relativně velkou vzduchovou mezerou. Pro ochranu proti demagnetizaci se používají pólové nástavce z magneticky měkké oceli. Materiál Alnico byl nejvíce používán v motorech s permanentními magnety v rozsahu do 150kW v rozmezí let 1940-1960. Poté se staly nejpoužívanějším materiálem feritové magnety. [3]

1.2.2 Feritové magnety

Feritové magnety z baria a stroncia byly vynalezeny v roce 1950. Mají větší koercivní sílu než Alnico, ale má nižší remanentní indukci. Mají poměrně vysokou teplotní závislost (barium $0,2\% \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ a stroncium $-0,2\% \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$). Maximální provozní teplota je 400°C . Jejich hlavní výhody jsou nízké náklady a velmi vysoká rezistivita, díky které má velmi malé ztráty vířivými



proudy v magnetu. Jejich použití je ekonomicky výhodnější než použití magnetů Alnico u strojů s výkonem do cca 7,5kW. Obvykle se používají v automobilech jako dmychadla, ventilátory, stěrače a čerpadla. Magnety ze stroncia mají větší koercivní sílu než magnety baria. Feritové magnety se vyrábí práškovou metalurgií. Feritové magnety mohou být vyrobeny také z olova, ale olovo je nevhodné pro použití z hlediska životního prostředí. [3]

1.2.3 Magnety ze vzácným zemin

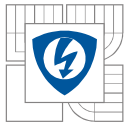
Díky rozvoji výzkumu permanentních magnetů ze vzácných zemin bylo dosaženo velkého pokroku z hlediska hustoty energie. Prvky magnetů ze vzácných zemin nejsou samy o sobě tak vzácné, ale v přírodě se vyskytují jako sloučeniny s dalšími prvky, které je nutno od sebe separovat. To omezuje dostupnost těchto materiálů, protože je jejich zpracování nákladné.

1.2.3.1 Samarium- Kobalt SmCo5

První generací těchto prvků byl Samarium Kobalt který byl vynalezen v roce 1960 a komerčně vyráběn v roce 1970. Jedná se o tvrdý magnetický materiál, s vysokou remanentní indukci, vysokou koercivní silou, lineární demagnetizační křivkou a nízkou teplotní závislostí (B_r 0,03 - 0,045% °C⁻¹ a H_c 0,14 - 0,04% °C⁻¹). Maximální provozní teplota je v rozmezí 300 - 350°C. Využívá se pro motory s nízkým objemem a vysokým výkonem. Jeho cena je relativně vysoká, protože oba prvky se vyskytují jen v omezeném množství. [3]

1.2.3.2 Neodym-Železo-Bor (NdFeB)

Druhou generaci vzácných magnetů tvoří NdFeB magnety, které se zakládají na velmi levném neodymu. Tímto bylo dosaženo velmi pozoruhodného pokroku z hlediska snížení nákladů na výrobu. Tento typ magnetu byl představen v roce 1983. Tyto magnety se začaly používat mnohem více než SmCo5, ale pouze v prostředí s teplotami kolem 20°C. Demagnetizační křivka je silně závislá na teplotě. Teplotní závislost B_r -0,09 – 0,15% °C⁻¹ a H_c 0,40 - 0,80% °C⁻¹). Maximální pracovní teplota je pouze 250°C a jeho odolnost proti korozi je velmi nízká. Vlastnosti tohoto materiálu se však mohou dále rozvíjet, novější verze těchto magnetů přicházejí s lepší remanentní indukci a lepší teplotní stabilitou, jsou však mnohem nákladnější a tak se výrobci a konstruktéři vrací k SmCo5. [3]



1.3 Magnetizace permanentních magnetů

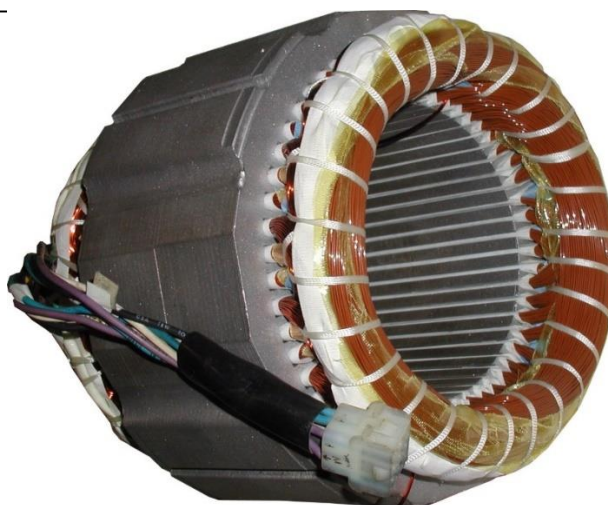
PM se magnetizují, aby získali orientaci směru magnetického toku, např. radiální, paralelní a jiné. Orientace magnetizace silně ovlivňuje kvalitu rozložení magnetického toku vzduchovou mezerou a nepřímo ovlivňuje proudovou hustotu stroje. Hustota toku ve vzduchové mezeře ovlivňuje točivý moment na výstupu stroje zejména v případě vysoce výkonných strojů. V praxi převládají radiální a paralelní magnetizace nad ostatními, i když některé jiné typy mají svoje jedinečné výhody. [1]

2 KONSTRUKCE MOTORU

2.1 Stator

Statory, které se používají u synchronních motorů s permanentními magnety, jsou velice podobné statorům použitých u asynchronních strojů. V některých případech se dokonce jedná a stejné statorové svazky, nebo řezy, což je zapříčiněno potřebou snížení nákladů. Magnetický obvod se skládá ze statorových plechů, které jsou od sebe vzájemně izolovány keramickými vrstvičkami, laky, nebo oxidy. Ten se vkládá do svařené, nebo odlité kostry, která bývá na vnější straně většinou opatřená žebrováním pro lepší odvod ztrátového tepla a následné lepší chlazení. Na vnitřním obvodě plechů jsou pak vylisovány zuby, do kterých se ukládá nebo navine vinutí. Při výběru plechů se klade důraz na frekvenci a velikost magnetické indukce ve statoru, aby nedocházelo k velkým ztrátám v železe. Dále je potřeba vhodně zvolit šířku zubů a drážek, protože permanentní magnety mohou způsobovat vznik parazitního reluktančního momentu.

V některých speciálních aplikacích se můžeme setkat s bezzubovým státorem. Důležitým požadavkem při konstrukci je tuhost statoru, která může být ovlivněna požadavky na tvar, upevnění a krytí. Dále je třeba dbát na výběr typu plechu statorového svazku. Obvykle se volí kompromis mezi cenou a kvalitou. Kvalitnější plechy bývají vyrobeny z lepší slitiny a mohou být tedy tenčí. Jejich kvalita je odvozena od jejich magnetizačních charakteristik a závislosti ztrát v železe a frekvenci magnetické indukce v řezu. Ztráty v železe jsou buď hysteretní, nebo vířivé. Hysteretní ztráty rostou v lineárně závislosti na frekvenci a vířivé rostou kvadraticky v závislosti na frekvenci. Ztráty vířivými proudy se také mohou snížit použitím izolace mezi jednotlivými plechy.

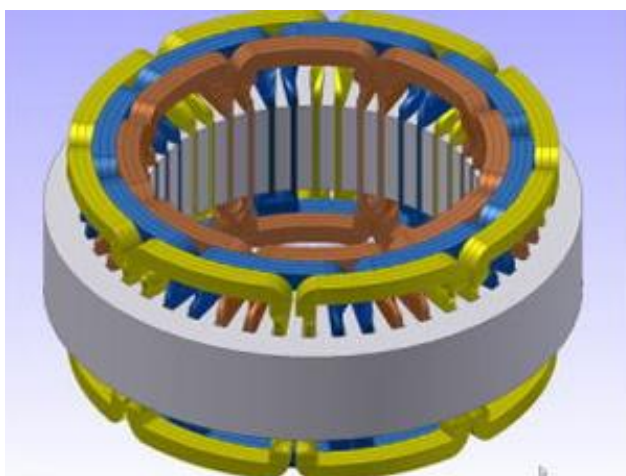


Obrázek 2 Stator BLDC stroje s vinutím [10]

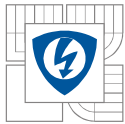
2.2 Typy vinutí

Jednou z hlavních částí všech elektrických strojů je vinutí. Vinutí vytváří společně s permanentními magnety magnetické točivé pole, které je potřebné k práci stroje. Cívky se namotávají do drážek statoru. Ve vinutí cívky vznikají Jouleovy ztráty, které se jsou závislé na odporu vinutí. Nejčastěji se vinutí zalívá epoxidem, protože má lepší tepelnou vodivost než vzduch a umožňuje lepší chlazení. To je důležité, protože změnou teploty se může změnit magnetizační charakteristika. Vodiče pro vinutí bývají z elektrotechnické mědi a pro návrh stroje je důležité znát činitel plnění.

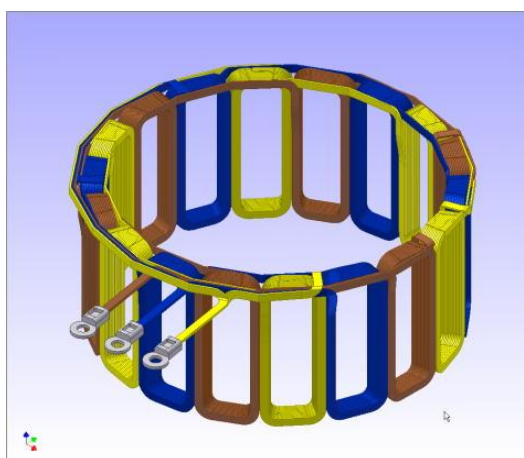
Vinutí dělíme na rozložené a soustředěné. Rozložené vinutí se poměrně lehce navíjí. V drážkách je potom izolace pro zlepšení vlastností. Tento typ vinutí je také velmi levný.



Obrázek 3 Rozložené vinutí statoru [11]



Soustředěné vinutí má proti rozloženému vinutí tu výhodu, že se jeho čela vinutí nepřekrývají a závit kopíruje zub mnohem přesněji. Z toho plyne mnohem lepší činitel plnění. V praxi se můžeme setkat s vinutím jednovrstvým nebo dvouvrstevným. U jednovrstvého vinutí je jen jedna cívka v každém slotu, u dvouvrstvého vinutí jsou v jednom slotu dvě cívky. Lze se setkat také s trojvrstevným vinutím, ale to se v praxi běžně nepoužívá. Soustředěné vinutí se u synchronních strojů s permanentními magnety používá mnohem častěji než vinutí rozložené.

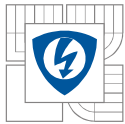


Obrázek 4 Soustředěné vinutí statoru [12]

2.3 Motory s permanentními magnety

Obecně platí, že všechny elektromagnetické pohony mohou být rozděleny na pohony s konstantní rychlostí, servopohony, a pohony s proměnnou rychlostí. Motory s konstantní rychlostí obvykle pracují samostatně bez jakéhokoliv měniče, zpětné vazby, nebo jakéhokoliv jiného motoru v případě, že je tolerována určitá změna otáček. Servopohon vyžaduje přesné řízení polohy, takže doba odezvy a přesnost zpracování příkazů je velice důležitá. U pohonů s proměnnou rychlostí není přesnost a doba odezvy až tak důležitá. Hlavním požadavkem na tyto stroje je změna rychlosti v širokém rozsahu. U všech elektromechanických pohonů, u kterých je řízena rychlost a poloha, je k řízení nutno použít elektronický převodník. Typy elektromagnetických motorů s permanentními magnety:

- Stejnoseměrné komutátorové motory
- Bezkartáčové motory
 - synchronní motory s permanentními magnety
 - komutované motory
- Krokové motory



Bezkartáčové motory spadají do dvou tříd. Motory buzené sinusovým průběhem, nebo buzené obdelníkovým průběhem proudu. Krokový motor má zcela odlišné napájení obvodů a kontrolu řízení.

2.3.1 Stejnoseměrné komutátorové motory

Tyto motory jsou stále všestranně používané stroje pro systémy s proměnnou rychlostí a jsou často preferovanou volbou, pokud není kladen nárok na údržbu, provoz v nepříznivých podmínkách nebo potřeba udržovat více strojů v synchronismu. Vzhledem k činnosti komutátoru je jeho řízení poměrně jednoduché a může splňovat požadavky většiny aplikací. Z těchto důvodů je tento typ motorů většinou nejlevnější volbou i s přihlédnutím na údržbu. V průmyslu se často používají jako dmychadla, tiskařské stroje, textilní stroje, jednoduché obráběcí stroje, ventilátory, atd. Motor vyžaduje pouze plynulý start a poté jeho řízení v jednom směru bez brždění, nebo změny směru. Momentovou a rychlostní charakteristiku má pouze v jednom kvadrantu a vyžaduje pouze jeden usměrňovací převodník. Může být také použit pouze polořízený můstek na místo plně řízeného, pokud nevádí zvýšení výstupního vlnění. Tento můstek se dá použít do výkonu cca 100kW. Je-li kladen nárok na otáčení motoru v obou směrech a regenerační brždění, lze použít plně řízený měnič se schopností obrácení proudu kotvy. Takovýto motor se využívá tam, kde je zapotřebí rychlá změna v rychlosti, nebo v zátěži. Např. ve válcovnách, jeřábech a důlních navijácích. V případech, kde je potřeba rychlá kontrola napětí, časté malé změny rychlostí mohou vyžadovat rychlé zvraty točivého momentu. V těchto případech se používá čtyřkvadrantový duální převodník, který obsahuje dva polovodičové mosty, kde jeden musí být kladný a druhý záporný. Toho se využívá v textilním a papírovém průmyslu. Přirozená komutace je v situacích jako je kontrola malých stejnosměrných motorů nemožná. Motor může mít tak malou indukčnost, že normální řízení by způsobilo nepřijatelné zvlnění momentu a podstatně by se zhoršila reakce motoru. [3]

2.3.2 Bezkartáčové motory

2.3.2.1 Synchronní motory s permanentními magnety (PMSM)

Sinusově buzené motory jsou napájeny třífázovým sinusovým průběhem proudu a pracují na principu rotačního magnetického pole. Jednotlivé fáze jsou od sebe posunuty o 120° . Všechny fáze vinutí vedou proud ve stejném okamžiku. Statorové vinutí bývá nejčastěji zapojeno do hvězdy.



Obrázek 5 Příklad konstrukce BLDC motoru [13]

Motory s nižším výkonem (v rozsahu kW) bývají napájeny jednoduchým diodovým usměrňovačem na straně měniče. Používá se konstantní stejnosměrné napětí. Měnič používá buď výkonové tranzistory nebo IGBT tranzistory. Tyto tranzistory je možné nahradit výkonovými tyristory (rychlé tyristory umožňují maximální frekvenci 400Hz), pokud je potřeba dosáhnout vyšších frekvencí, používají se antiparalelní diody. V některých aplikacích se používají čtyřkvadrantové usměrňovače, které umožňují rekuperaci energie zpět do sítě při brždění. Používají se u motorů s vyšším výkonem. U synchronních strojů s velmi vysokými výkony a nízkými otáčkami se používají přímé frekvenční měniče, které vytváří výstupní napětí přímo z třífázové soustavy (cyklokonvertory), jsou však omezeny nízkou frekvencí. Používají se v kombinaci s dieselovým alternátorem, například pro pohony lodí. [3]

2.3.2.2 Bezkartáčové stejnosměrné stroje (BLDC)

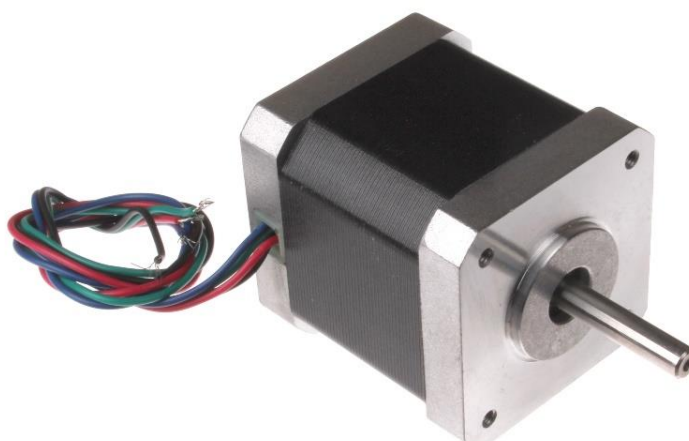
Motory buzené obdelníkovým průběhem jsou také napájeny třífázovým průběhem proudu posunutém o 120° od sebe, ale tento průběh mají obdelníkový, nebo lichoběžníkový tvar. Tento tvar je produkován, pokud je proud kotvy přesně synchronizován s okamžitou polohou rotoru a frekvencí. Nejjednodušší možností poskytnutí těchto informací o poloze motoru, je montáž polohového snímače na hřídel motoru. Současně jsou napájeny dvě fáze. Tento systém buzení je funkcí podobný buzení u stejnosměrných motorů. BLDC motory mají obecně menší účinnost a



menší hustotu momentu než PMSM, ale má levnější měnič a snímače polohy, proto se může uplatnit jako ekonomičtější náhrada v mnoha aplikacích, kde se nekladou takové nároky na účinnost, nebo přesné řízení otáček. Celkovou konstrukcí jsou PMSM motorům velmi podobné. [3]

2.3.3 Krokový motor

Typický krokový motor se skládá ze vstupního regulátoru, logického obvodu a řízení. Vstupní regulátor je obvod, který vytváří požadovaný sled pulsů. Tím může být mikroprocesor nebo mikropočítač, který generuje impulzy ke zrychlení, zpomalení, nebo zastavení krokového motoru.



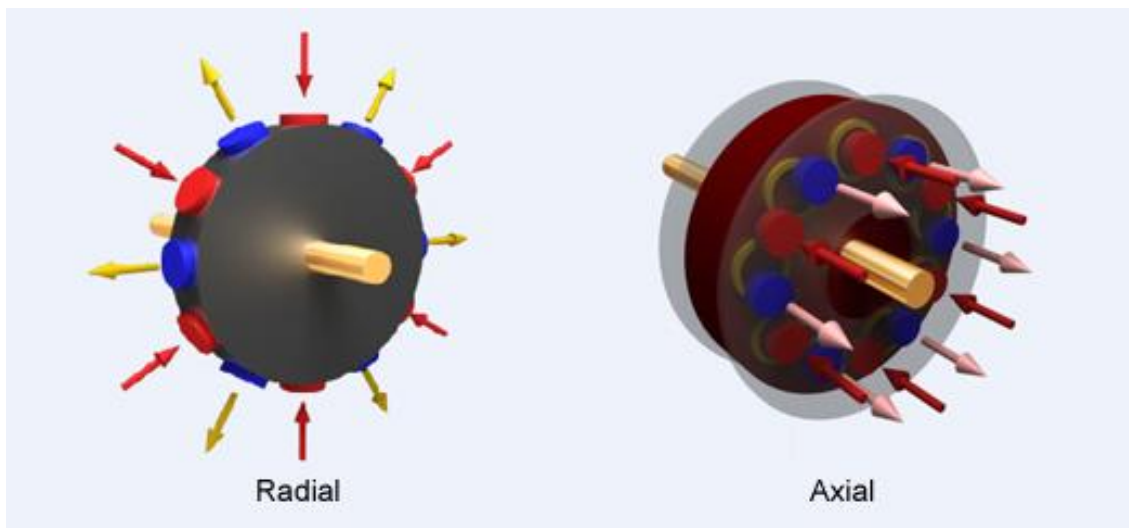
Obrázek 6 Příklad konstrukce krokového motoru [14]

Logický obvod reaguje na impulzy z regulátoru a postupně řídí buzení vinutí. Výstupní signál z tohoto obvodu je přenášen na vstupní svorky řízení, který zapíná a vypíná vinutí krokového motoru. Krokový motor mění elektrické impulzy na jednotlivé úhlové posuny. [3]

2.4 Konfigurace stroje

Motory s permanentními magnety lze rozdělit podle směru pole magnetického toku:

- Radiální pole: Směr pole je podél poloměru stroje
- Axiální pole: Směr pole je rovnoběžný s hřídelem rotoru



Obrázek 7 Porovnání radiálního a axiálního pole [15]

PMSM s radiálním polem jsou běžně používané, zatímco stroje s axiálním polem se vyskytují jen málo v případech, kde je potřeba vyšší proudová hustota a lepší zrychlení.

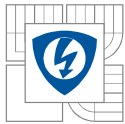
Magnety mohou být na rotoru umístěny různými způsoby, ovšem základní princip činnosti stroje je stejný bez ohledu na způsob montáže permanentních magnetů na rotor.

2.4.1 Motor s radiálním polem

Ve většině motorů prochází tok z rotoru na stator v radiálním směru. Převážná většina těchto motorů má vnitřní rotor a vnější stator. Jednou z největších výhod tohoto rotoru je snadný odvod tepla, protože vinutí jsou na vnější straně a uzavírají rotační prvek. Toto ovšem v některých případech není tak důležité a převládají výhody využití vnějšího rotoru. Objevuje se ve většině případech jako vrtule a používá se většinou jako motor ventilátoru (například chlazení CPU). V těchto případech se motor stává nedílnou součástí větší struktury [1]

2.4.2 Motor s axiálním polem

Rotační pohyb lze získat výměnou orientace vinutí a magnetického pole. U motorů s radiálním polem je vinutí orientováno podél osového směru a tok proudí ve směru radiálním. U motorů s axiálním polem tok proudí v osovém směru a vinutí je orientováno ve směru radiálním. V mnoha případech je rotor spojen s jedním statorem. Toto uspořádání je sice jednoduché, ale nevyvážené. Kromě točivého momentu toto uspořádání vykazuje také velmi vysoké axiální síly, protože se



magnety rotoru pokouší uzavřít vzduchovou mezeru. Oddělením rotoru od tohoto statoru se síly vyrovnají. Toto uspořádání jednoho rotoru mezi dvěma statoru zvyšuje výkon motoru. Kromě speciálních aplikací jako např. v disketové mechanice nemá motor s axiálním polem širší využití. [1]

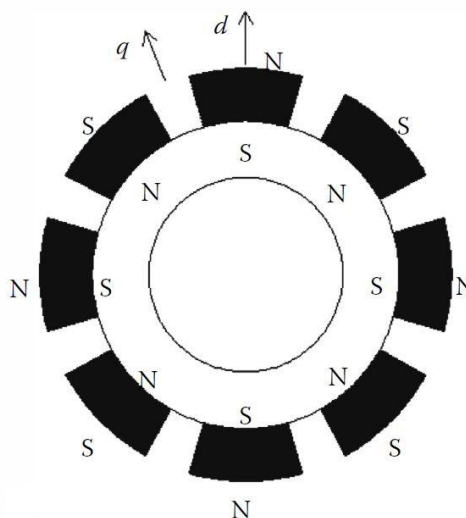
3 TYPY PMSM

Různé způsoby uspořádání magnetů na rotoru umožňují mnoho typů PMSM motorů.

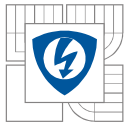
- Surface mounted
- Surface-Inset
- Interior
- Line-Start
- Hybridní PMSM stroje

3.1 Surface mounted PMSM (s magnety na povrchu)

Magnety jsou připevněny na povrchu vnějšího obvodu rotoru. Toto uspořádání poskytuje vysokou magnetickou indukci ve vzduchové mezeře, protože není ovlivňována dalším materiálem mezi permanentním magnetem a vzduchovou mezerou, jako jsou třeba lamely rotoru. Nevýhodou tohoto uspořádání je menší mechanická pevnost, jelikož magnety nejsou plně namontovány do lamel rotoru. V praxi se k pevnějšímu uchycení využívá speciální pásy (Kavilor tape), která mechanickou pevnost zvýší.



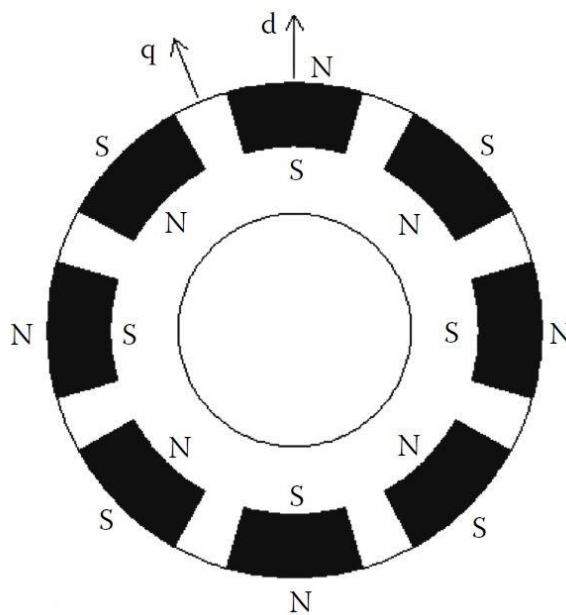
Obrázek 8 Surface mounted PMSM [1]



Toto uspořádání není vhodné pro vysokorychlostní aplikace s otáčkami vyššími než je 3000 min^{-1} . U malých motorků je ovšem možné dosáhnout rychlostí kolem 50000 min^{-1} . Využívá se zde radiálního magnetování a vysoce vodivého povrchu motoru, který zabraňuje demagnetizaci. [1]

3.2 Surface-Inset PMSM (se zapuštěnými magnety)

V případě rotoru se zapuštěnými magnety jsou magnety umístěny ve vnějším obvodu rotoru, čímž poskytují jednotnou válcovou plochu rotoru. Toto uspořádání je mnohem více mechanicky pevnější v porovnání s rotorem s magnety na povrchu. Důvodem je skutečnost, že magnety nevyčnívají z povrchu rotoru. Magnety použité u tohoto rotoru jsou radiálně polarizované. Oblast magnetického pole magnetu je menší než velikost pole na povrchu rotoru, tím pádem je magnetická indukce ve vzduchové mezeře menší než indukce v magnetu. Magnet je chráněn proti odstředivým silám a je využíván zejména u vysokofrekvenčních vysokorychlostních motorů.

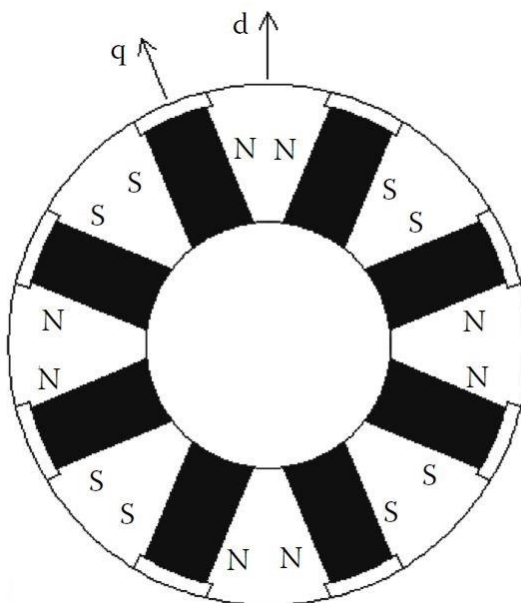


Obrázek 9 Surface-Inset PMSM [1]

Výhodou těchto motorů je jejich menší konstrukce a tím pádem i nižší hmotnost. Sníží se také moment setrvačnosti motoru. Celkově má takovýto stroj vysokou účinnost a lze jej konstruovat jako pomaluběžný stroj s dostatečně vysokým výkonem, takže se dá použít i bez převodovky. [1]

3.3 Interior PMSM (s vnořenými magnety)

Magnety jsou umístěné ve středu lamel rotoru v radiálních a obvodových směrech. Konstrukce tohoto rotoru je mechanicky velmi pevná a tudíž vhodná pro vysokorychlostní stroje. Toto uspořádání je mnohem složitější a náročnější na výrobu než v případě rotoru s magnety na povrchu nebo rotoru se zapuštěnými magnety. Interiér rotoru je konstruován tak, aby vznikly velké vzduchové mezery mezi magnety, což se docílí odstraněním železa v rotoru. Tím se zamezí průchodu magnetického toku mezi sousedními magnety v povrchu rotoru. Bez těchto bariér by magnetický tok procházel pouze mezi magnety v rotoru a neprocházel by konstrukcí statoru. Další výhodou použití těchto bariér je snížení hmotnosti rotoru, čímž se sníží i jeho setrvačnost a umožní vyšší akceleraci, která je vhodná pro využití v servopohonech.

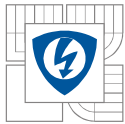


Obrázek 10 Interior PMSM [1]

Navzdory těmto výhodám je tento typ rotoru zřídka využíván v dnešní praxi. To je zapříčiněno nutností použití velkého množství magnetů, což je finančně neefektivní. Využívá se zejména ve strojích s nízkou hustotou energie a s použitím nízkonákladových magnetů jako jsou ferity. [1]

3.4 Line-Start PMSM

Tyto motory mají vinutí s kotvou nakrátko, což zajišťuje rychlý rozběh motoru na synchronní otáčky. Rotor tohoto typu motoru se skládá z jednotlivých pevných rotorů, které jsou vyrobeny z nelineárních materiálů a umožňují vodit jak magnetické, tak i elektrické pole. Mezi výhody tohoto



stroje patří jeho jednoduchá struktura, vysoká efektivita, dobrá akcelerace a schopnost změny magnetického toku. Používá se hlavně v oblastech, kde je zapotřebí velmi vysoká rychlost, která je umožněna velmi pevnou konstrukcí rotoru. Jeho pevnost je vyšší než u tradičních laminovaných PMSM. [1]

3.5 Hybridní PMSM stroje

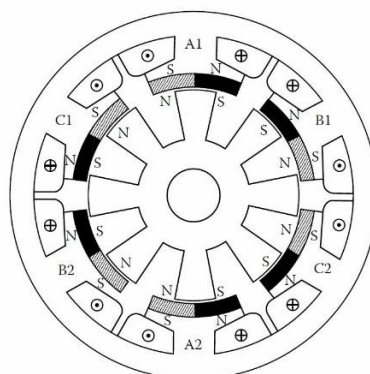
Homopolární stroje tvoří speciální třídu strojů, které mají vinutí pro střídavé a stejnosměrné buzení na samotném statoru. Rotor se skládá pouze z lamel vyjádřenými póly a nemá žádné vinutí, nebo permanentní magnety. Skutečnost, že je vinutí a magnety na statoru samotném přináší výhody, jako je jednoduchá konstrukce a schopnost velmi vysokorychlostních operací bez nutnosti použití pouzdra pro uchycení magnetů na rotoru. Absence tohoto pouzdra snižuje ztráty vířivými proudy, zatímco ponechává výhody klasických PMSM strojů. Používají se u generátorů.

V poslední době se výzkum zaměřil na tři typy hybridních strojů, které se od sebe liší způsobem umístění permanentních magnetů:

- Flux Reversal PMSM
- Flux Switching Machine
- PM SRM or Doubly Salient PM Machine

3.5.1 Flux Reversal PMSM

Každý pól na statoru má dvě cívky, které mají opačnou polaritu vůči protějším magnetům na statoru. Diametrálně umístěné permanentní magnety mají stejnou polaritu. Cívky na pólech statoru mají soustředěné vinutí. Permanentní magnety jsou umístěny na statoru, a tudíž jsou tyto stroje jednodušší na výrobu.

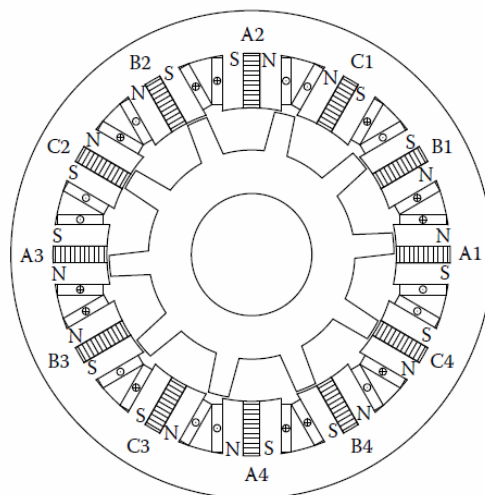


Obrázek 11 Flux reversal PMSM [1]

Za vhodnou vlastnost tohoto motoru je považována jeho pevnost, díky čemuž je využíván ve vysokorychlostních operacích. Indukčnost tohoto motoru je velmi malá, což umožňuje rychlou změnu točivého momentu. Ztráty jsou větší v porovnání s klasickými PMSM stroji.

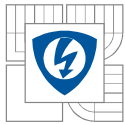
3.5.2 Flux Switching Machine

Na rotoru není umístěn žádný magnet nebo vinutí. Tyto motory mají vysokou hustotu magnetického toku ve vzduchové mezeře a díky tomu dosahují vysokého krouticího momentu. Tato konstrukce disponuje vysokou odolností a využívá se například v pohonech pro elektrická vozidla.



Obrázek 12 Flux Switching Machine [1]

Některé topologie hybridních FSM využívají další stejnosměrné pole vinutí k oslabení magnetického pole vyrobeného permanentními magnety. Vzhledem však k riziku demagnetizace permanentních magnetů není tento typ FSM tolik využíván. Přestože permanentní magnety přinášejí vysokou hustotu točivého momentu na elektrické stroje, nejsou vždy vhodné pro tuto konstrukci z důvodu jejich slabé mechanické pevnosti, špatnému odvodu tepla a z obchodního hlediska také stále se zvyšující ceny. Z tohoto důvodu se v určitých aplikacích používají stroje bez permanentních magnetů. Místo těch bývá použito vinutí stejnosměrného pole jako zdroj magnetického buzení. V této konfiguraci se schopnost oslabení magnetického pole výrazně zvýšila, protože je můžeme měnit změnou velikosti stejnosměrného budicího proudu. Takto navržená topologie (DCE-FSM) má vinutí navinuto na každém statorovém zubu, což má za následek relativně nízký krouticí moment. Kromě toho je vyžadován segmentový motor, který je méně robustní a složitější v porovnání s typickým FSM.



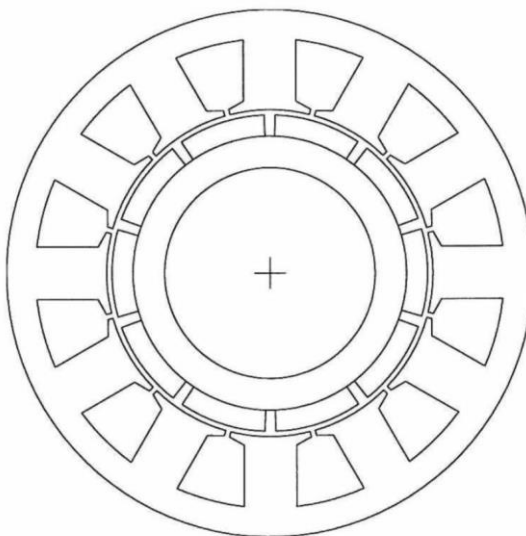
3.5.3 Doubly Salient PM Machine

Magnety jsou umístěné na statoru tak jako v předchozím případě. Výhodou tohoto je lepší chlazení a to zvláště v případech, kde je poměrně vysoká okolní teplota. Využívá se v elektrických, nebo hybridních vozidlech. Jelikož není žádný magnet nebo vinutí v rotoru, je konstrukce jednoduchá a robustní, proto se hodí pro vysoké rychlosti. Konfigurace statorových permanentních magnetů umožňuje změnou zapojení vinutí znovu přitáhnout magnety v momentu, kdy magnety jsou v poloze, kdy je jejich vliv magnetického pole nejslabší. Celkově je tento typ velmi podobný FSM ale má nepatrně horší parametry.

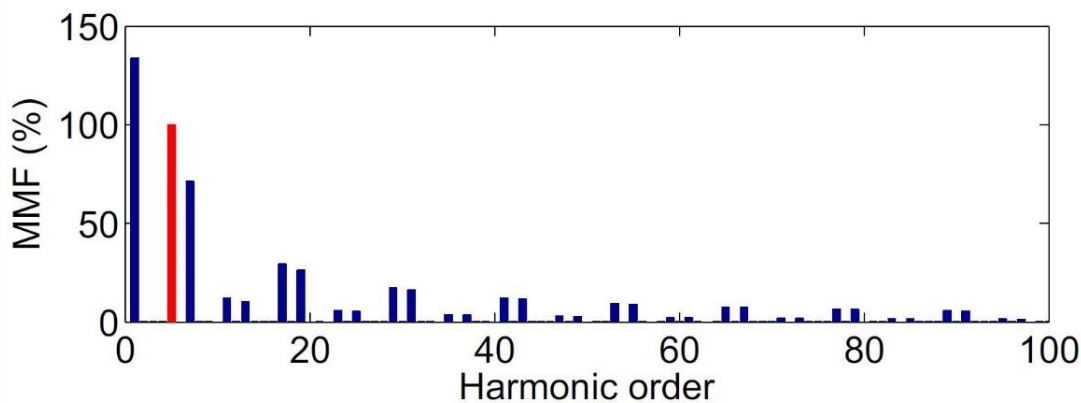
4 ANALÝZA PROSTOROVÝCH HARMONICKÝCH

MAGNETICKÉHO POLE U SOUSTŘEDĚNÉHO VINUTÍ

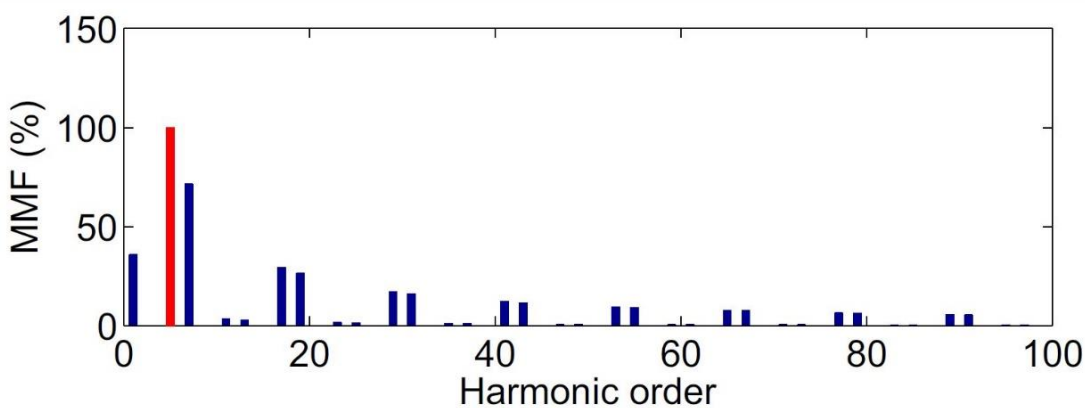
4.1 $Q_s/2p = 12/10$



Obrázek 13 $Q_s/2p = 12/10$ Schéma motoru [4]

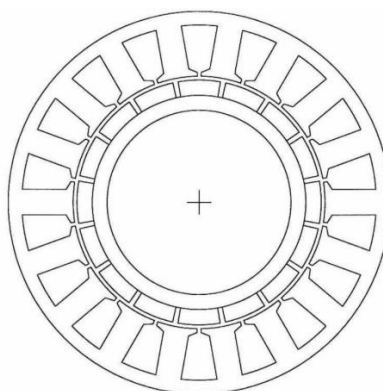


Obrázek 14 $Q_s/2p = 12/10$ průběh harmonických pro jednovrstvého vinutí [9]

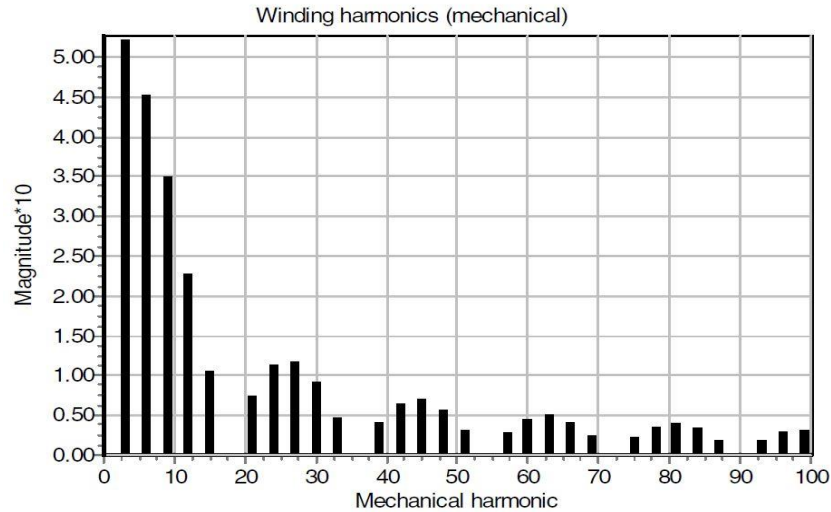


Obrázek 15 $Q_s/2p = 12/10$ průběh harmonických pro dvouvrstvé vinutí [9]

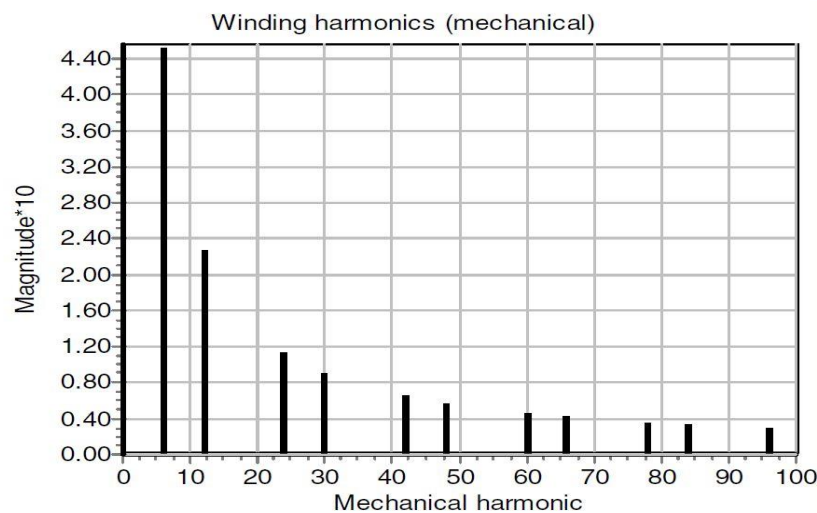
4.2 $Q_s/2p = 18/16$



Obrázek 16 $Q_s/2p = 18/16$ Schéma motoru [4]



Obrázek 17 $Q_s/2p = 18/16$ průběh harmonických pro jednovrstvé vinutí [17]



Obrázek 18 $Q_s/2p = 18/16$ průběh harmonických pro dvouvrstvé vinutí [17]

Z grafů je patrné, že při použití dvouvrstvého vinutí se proti jednovrstvému vinutí několikanásobně sníží počet harmonických.

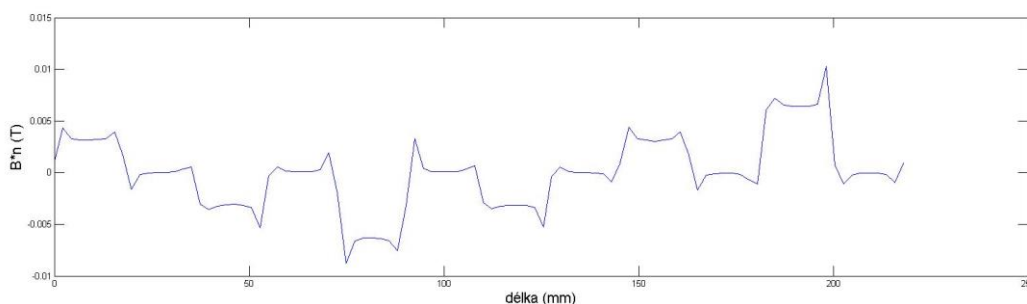
5 MODEL MOTORU V PROGRAMU FEMM

5.1 $Q_s/2p = 12/10$ s jednovrstvým vinutím

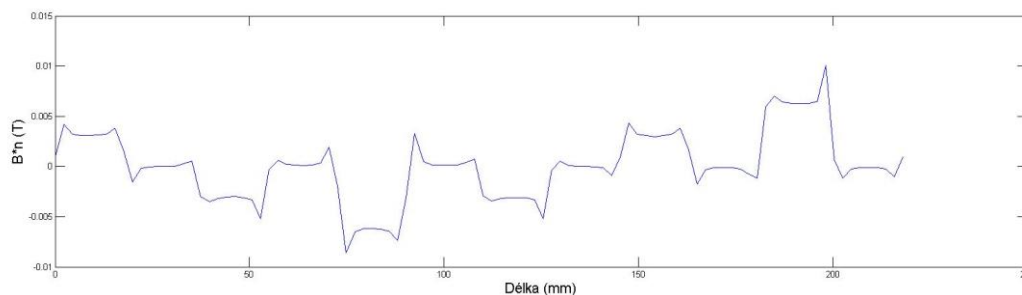
V programu FEMM jsem vytvořil model motoru $Q_s/2p = 12/10$ s permanentními magnety na povrchu. V návrhu jsem použil NdFeB magnety, u vinutí cívky jsem pro návrh uvažoval jeden závit a činitel plnění 1, Ocel M400-50A s lineární charakteristikou s relativní permeabilitou $\mu_r = 5000$ s a následně nelienární charakteristikou vybranou z katalogu pro danou ocel, viz příloha. Proudů cívkami: $I_u = 20A$, $I_b = -10A$, $I_c = -10A$.

Výsledky pro lineární a nelienární charakteristiku vyšly téměř shodně s malými odchylkami, což bylo způsobeno poměrně nízkou magnetickou indukcí. Při vyšší magnetické indukci by byly odchylky výraznější.

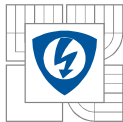
Prostorové průběhy normálové složky magnetické indukce ve středu vzduchové mezery po celém obvodu rotoru:



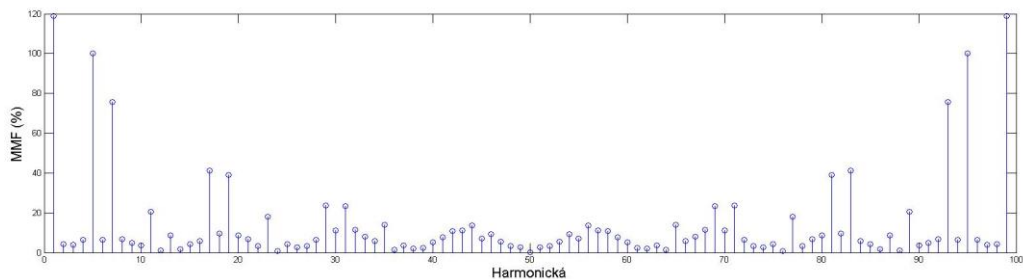
Obrázek 19 Průběh normálové složky mag. indukce ve středu vzduchové mezery pro M400-50A lineární



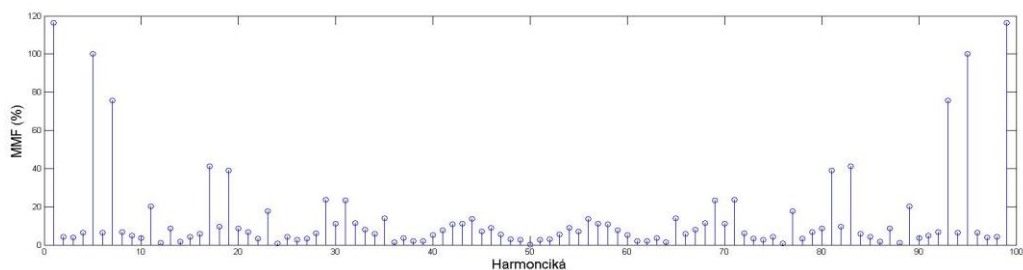
Obrázek 20 Průběh normálové složky mag. indukce ve středu vzduchové mezery pro M400-50A nelienární



Zobrazení průběhu harmonických složek motoru $Q_s/2p = 12/10$ s jednovrstvým vinutím:

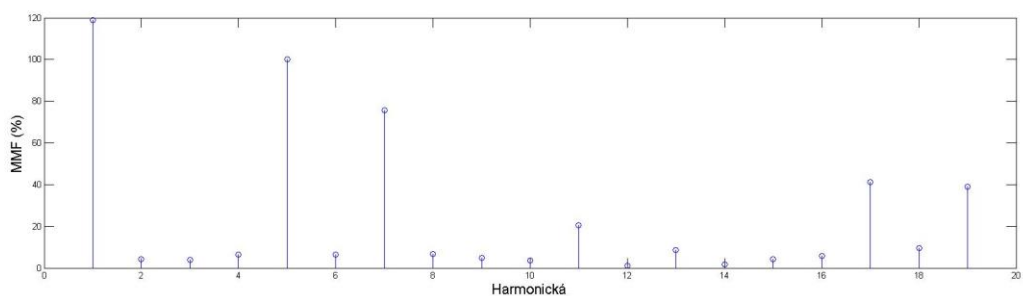


Obrázek 21 $Q_s/2p = 12/10$ průběh harmonických u jednovrstvého vinutí s lineární charakteristikou

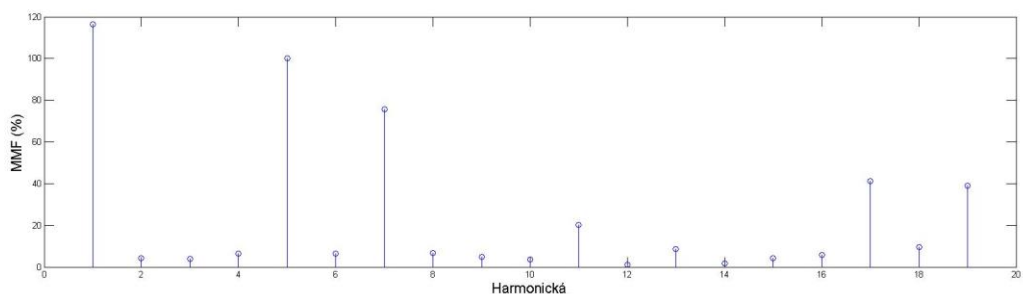


Obrázek 22 $Q_s/2p = 12/10$ průběh harmonických u jednovrstvého vinutí s nelineární charakteristikou

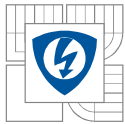
Zobrazení prvních dvaceti harmonických pro srovnání s průběhem harmonických získaných z literatury:



Obrázek 23 $Q_s/2p = 12/10$ průběh harmonických u jednovrstvého vinutí s lineární charakteristikou



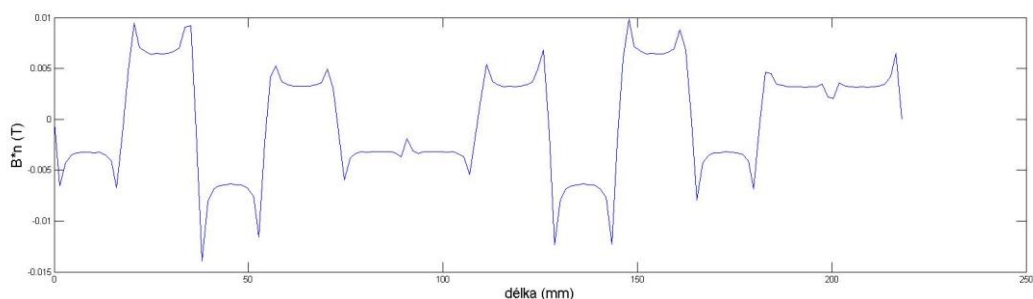
Obrázek 24 $Q_s/2p = 12/10$ průběh harmonických u jednovrstvého vinutí s nelineární charakteristikou



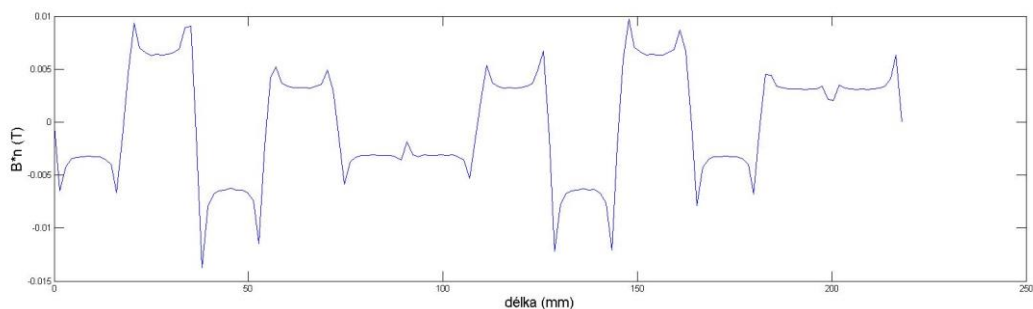
Jak je patrné z obrázku první harmonická u vypočteného modelu převyšuje pátou harmonickou, která je u tohoto stroje pracovní o 20%. A to jak v případě lineární charakteristiky oceli, tak i nelineární. U modelu z literatury převyšuje první harmonická pátou o 30%. Tato odchylka je pravděpodobně způsobena odlišnostmi v návrhu.

5.2 $Q_s/2p = 12/10$ s dvouvrstvým vinutím

Prostorové průběhy normálové složky magnetické indukce ve středu vzduchové mezery po celém obvodu rotoru:

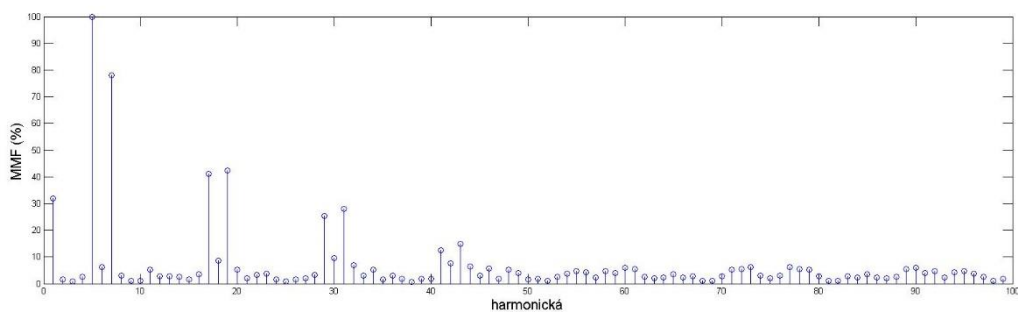


Obrázek 25 Průběh normálové složky mag. indukce ve středu vzduchové mezery pro M400-50A lineární

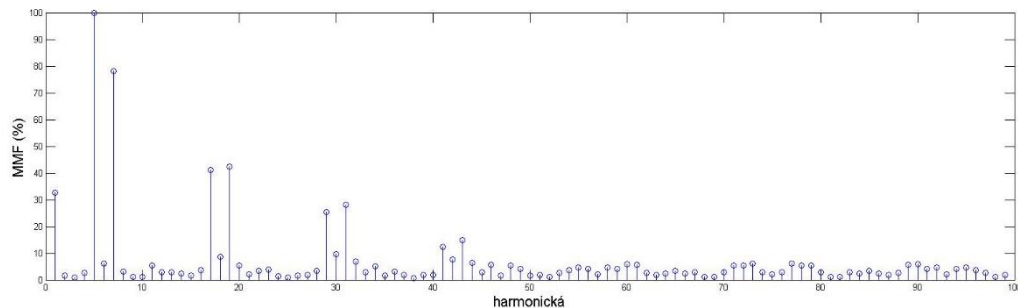


Obrázek 26 Průběh normálové složky mag. indukce ve středu vzduchové mezery pro M400-50A nelineární

Zobrazení průběhu harmonických složek motoru $Q_s/2p = 12/10$ s jednovrstvým vinutím:

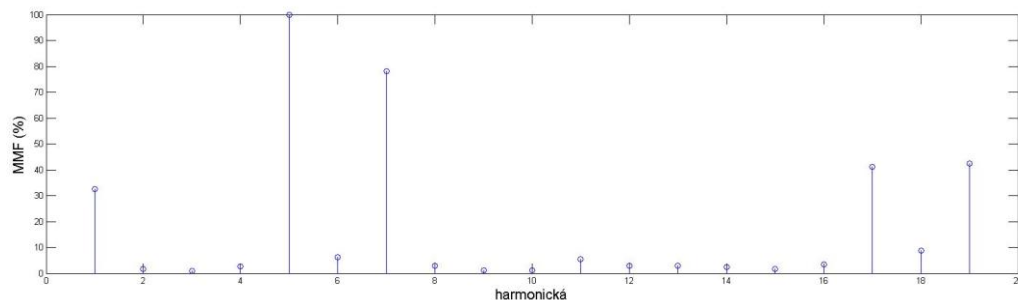


Obrázek 27 $Q_s/2p = 12/10$ průběh harmonických u dvouvrstvého vinutí s lineární charakteristikou

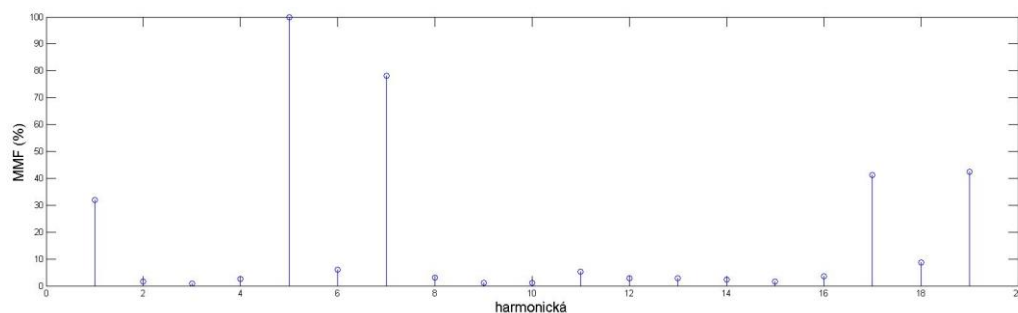


Obrázek 28 $Q_s/2p = 12/10$ průběh harmonických u dvouvrstvého vinutí s nelineární charakteristikou

Zobrazení prvních dvaceti harmonických pro srovnání s průběhem harmonických získaných z literatury:

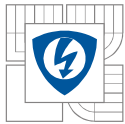


Obrázek 29 $Q_s/2p = 12/10$ průběh harmonických u dvouvrstvého vinutí s lineární charakteristikou



Obrázek 30 $Q_s/2p = 12/10$ průběh harmonických u dvouvrstvého vinutí s nelineární charakteristikou

U dvouvrstvého vinutí se průběh harmonických u vypočteného modelu shoduje s průběhem z literatury. Pokud porovnáme jednovrstvá a dvouvrstvá vinutí mezi sebou, je patrné, že u dvouvrstvého vinutí se značně sníží první harmonická složka.



6 NÁVRH PMSM MOTORU $Qs/2p = 18/16$

Zadané parametry motoru pro výpočet:

Tabulka 1 Zadané parametry motoru

Počet drážek	$N_{\text{drážek}}$	18
Počet pólů	$2p$	16
Materiál statorových plechů	M235-35A	
Činitel plnění drážky	k_{pCu}	0,3
Úbytek na napájecích tranzistorech	ΔU_{tran}	1V
Jmenovité otáčky	n_n	3600min^{-1}
Jmenovité napětí	U_{DC}	24V
Jmenovitý výkon	P_n	400W
Provozní teplota	ϑ_n	120°C
Mechanické ztráty	ΔP_{mech}	30W

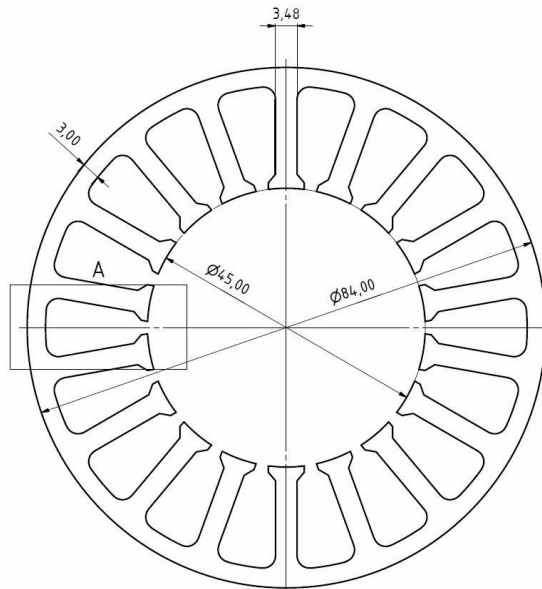
Při návrhu převezmeme některé parametry a typ použitých drážek z bakalářské práce *Návrh synchronního stroje s permanentními magnety* [20], abychom mohli porovnat výsledky dvou různých typů motoru.

Tabulka 2 Převzaté parametry stroje

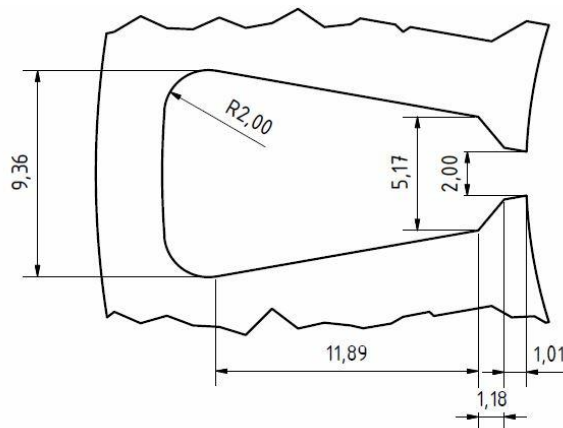
Název veličiny	Jednotky	Výpočet
Vnější průměr statoru	D_{SO}	84 mm
Vnitřní průměr statoru	D_{Si}	45 mm
Délka statorového svazku	l_{Fe}	39 mm
Délka vzduchové mezery	δ	0,75 mm
Stř. hodnota magnetické indukce ve vzduch. mez.	B_δ	0,65T

6.1 Návrh statorového plechu

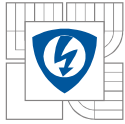
Abychom mohli spočítat parametry stroje, musíme si navrhnout jeho rozměry. Pro soustředěné vinutí 18/16. Návrh jsem udělal v programu Autodesk Inventor s předpokladem, že u tohoto stroje bude šířka $B_{ds1} = 2\text{ mm}$. Výšku J_{ha} statoru jsem zvolil 3 mm kvůli konstrukční pevnosti stroje. Tento návrh po dopočítání potřebných parametrů stroje namodeluji v programu FEMM, abych zjistil, zda máme potřebnou magnetickou indukci ve vzduchové mezeře a v zubu statoru.



Obrázek 31 Navržený statorový plech



Obrázek 32 Drážka statorového plechu



6.1.1 Výpočet vnitřního momentu stroje

Vnitřní výkon stroje:

Mechanické ztráty tvoří ztráty v ložiskách, ventilační ztráty, ztráty třením na guferech (těsnění)

$$P_i = P_n + \Delta P_{mech} = 400 + 30 = \underline{430 \text{ W}}$$

Vnitřní moment stroje

$$M_i = \frac{P_i}{2 \cdot \pi \cdot \frac{n_n}{60}} = \frac{430}{2 \cdot \pi \cdot \frac{3600}{60}} = \underline{1,14 \text{ N} \cdot \text{m}}$$

6.1.2 Výpočet proudu ve vodiči

Průřez mědi v drážce

$$S_{dscu} = S_{ds} \cdot k_{pCu} = 112,89 \cdot 0,3 = \underline{33,867 \text{ mm}^2}$$

Počet současně aktivních drážek

Třífázový PMSM motor má při své činnosti vždy aktivní pouze dvě fáze a jedna fáze komutuje. Proto lze při řešení tohoto motoru považovat vinutí dvou fází, tedy 2/3 statorových drážek Q_s .

$$Q_{SA} = \frac{2}{3} \cdot Q_s = \frac{2}{3} \cdot 18 = \underline{12}$$

Střední poloměr vzduchové mezery

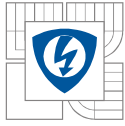
$$r_\delta = \frac{D_{si}}{2} + \frac{\delta}{2} = \frac{45}{2} + \frac{0,75}{2} = \underline{22,125 \text{ mm}}$$

Jelikož potřebujeme zachovat délku statorového svazku železa, můžeme spočítat celkový proud

$$I_{tot} = \frac{M_i}{r_\delta \cdot l_{Fe} \cdot B_\delta} = \frac{1,14}{22,125 \cdot 10^{-3} \cdot 39 \cdot 10^{-3} \cdot 0,65} = \underline{2142,43 \text{ A}}$$

Maximální proudová hustota

$$\sigma_{\max} = \frac{I_{tot}}{Q_{SA} \cdot S_{dscu}} = \frac{2142,43}{12 \cdot 33,867 \cdot 10^{-6}} = \underline{5,272 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2}$$



Proud drážkou

$$I_{dr} = \frac{I_{tot}}{Q_{SA}} = \frac{2142}{12} = \underline{178,54A}$$

Ověření výpočtu proudu drážkou

$$I_{dr} = \sigma_{max} \cdot S_{ds} \cdot k_{pCu} = 5,272 \cdot 10^6 \cdot 112,89 \cdot 10^{-6} \cdot 0,3 = \underline{178,54A}$$

Proud ve vodiči

$$I_{vod} = \frac{I_{dr}}{N_{DS}} = \frac{178,54}{8} = \underline{22,32A}$$

Efektivní hodnota proudu ve vodiči

$$I_{efvod} = \frac{I_{vod}}{\sqrt{2}} = \frac{22,32}{\sqrt{2}} = \underline{15,78A}$$

6.1.3 Výpočet ztrát ve vinutí statoru

Celkové přípustné ztráty motoru

$$\Delta P_{max} = P_1 - P_2 = \frac{P_2}{\eta} - P_2 = \frac{400}{0,85} - 400 = \underline{70,588 W}$$

Ztráty ve vinutí ΔP_{Cu} , ztráty v železe ΔP_{Fe} , dodatečné ztráty ΔP_d , a ztráty vířivými proudy v permanentních magnetech ΔP_{PM} .

$$\Delta P_{Cu} + \Delta P_{Fe} + \Delta P_d + \Delta P_{PM} = \Delta P_{max} - \Delta P_{mech} = 70,588 - 30 = \underline{40,588 W}$$

Střední poloměr statorové drážky

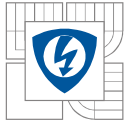
$$r_{ds} = \frac{1}{2} \cdot \frac{D_{si} + D_{so}}{2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{45 + 84}{2} = \underline{32,25 mm}$$

Šířka statorové drážky

$$b_{ds} = \frac{2 \cdot \pi \cdot r_{ds}}{Q_s} - b_z = \frac{2 \cdot \pi \cdot 32,25}{18} - 3,38 = \underline{7,877 mm}$$

Délka oblouku spojující středy dvou drážek

$$l_{z1} = \frac{2 \cdot \pi \cdot r_{ds}}{2p} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 32,25}{16} = \underline{12,66 mm}$$



Střední délka závitu

$$l_z = 2 \cdot l_{Fe} + 4 \cdot \frac{b_{ds}}{2} + 2 \cdot l_{z1} = 2 \cdot 39 + 4 \cdot \frac{7,877}{2} + 2 \cdot 12,66 = \underline{119,074 \text{ mm}}$$

Objem mědi jedné statorové cívky

$$V_{Cu1c} = S_{dsCu} \cdot l_z = 33,867 \cdot 119,074 = \underline{4,033 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3}$$

Objem mědi

$$V_{CuA} = \frac{Q_{SA}}{2} \cdot V_{Cu1c} = \frac{12}{2} \cdot 4,033 \cdot 10^{-6} = \underline{24,2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3}$$

Měrný odpor mědi při 120°C

$$\rho_{Cu90} = \rho_{Cu20} \cdot \left(1 + \frac{\vartheta - 20}{235,4 + 20}\right) = 1,724 \cdot 10^{-8} \cdot \left(1 + \frac{120 - 20}{235,4 + 20}\right) = \underline{2,41 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m}$$

Ztráty ve vinutí statoru

$$\Delta P_{Cu} = \rho_{Cu90} \cdot \sigma_{max}^2 \cdot V_{CuA} = 2,41 \cdot 10^{-8} \cdot (5,272 \cdot 10^6)^2 \cdot 24,2 \cdot 10^{-6} = \underline{16,21 \text{ W}}$$

Účinnost stroje

$$\eta = \frac{P_n}{P_n + P_{Cu} + P_{Fe} + P_{mech}} \cdot 100 = \frac{400}{400 + 16,21 + 15 + 30} \cdot 100 = \underline{86,73\%}$$

6.1.4 Návrh výšky magnetu

Magnetické napětí permanentního magnetu

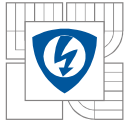
$$2 \cdot U_{mPM} = 2 \cdot U_{m\delta} + 2 \cdot U_{mFe} + U_{mreakce}$$

Zanedbáme-li vliv reakce kotvy a úbytku magnetického napětí na feromagnetických částech

$$2 \cdot U_{mPM} = 2 \cdot U_{m\delta}$$

Magnetické napětí na vzduchové mezeře

$$U_{m\delta} = H_{\delta max} \cdot \delta$$



Carterův činitel

$$k_c = \frac{B_{\delta max}}{B_{\delta}}$$
$$\kappa \approx \frac{\frac{b_{ds1}}{\delta}}{5 + \frac{b_{ds1}}{\delta}} = \frac{\frac{2}{0,65}}{5 + \frac{2}{0,65}} = \underline{0,38}$$

Drážková rozteč

$$\tau_{ds} = \frac{2 \cdot \pi \cdot r_{\delta}}{Q_s} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 22,125}{18} = \underline{7,72 \text{ mm}}$$

Carterův činitel z geometrických rozměrů

$$k_c = \frac{\tau_{ds}}{\tau_{ds} - \kappa \cdot b_{ds1}} = \frac{7,72}{7,72 - 0,38 \cdot 2} = \underline{1,109}$$

Magnetická indukce pod zubem statoru

$$B_{\delta max} = k_c \cdot B_{\delta} = 1,109 \cdot 0,65 = \underline{0,72 \text{ T}}$$

Permeabilita permanentního magnetu

$$\mu_{rPM} = \frac{B_r}{\mu_0 \cdot H_c} = \frac{1,15}{(4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}) \cdot 850 \cdot 10^3} = \underline{1,077}$$

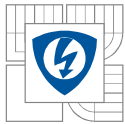
Intenzita magnetického pole pro určitý pracovní bod

Pro zjednodušení výpočtu budeme předpokládat, že velikost magnetické indukce ve vzduchové mezeře a magnetická indukce permanentního magnetu jsou stejné. Odchylna mezi výpočtem a simulací by měla být minimální.

$$B_{PM} \approx B_{\delta max}$$
$$H_{PM} = \frac{B_{PM} - B_r}{\mu_0 \cdot \mu_{rPM}} = \frac{0,72 - 1,06}{(4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}) \cdot 1,054} = \underline{-256,7 \text{ kA/m}}$$

Výška permanentního magnetu

$$l_{PM} = \frac{B_{\delta max} \cdot \delta}{\mu_0 \cdot H_{PM}} = \frac{0,72 \cdot 0,75}{(4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}) \cdot 256,7 \cdot 10^3} = 2,24 \cdot 10^{-3} \text{ m} = \underline{1,674 \text{ mm}}$$



6.1.5 Ověření dimenzování magnetu proti trvalé demagnetizaci při maximálním proudovém přetížení.

Pro vypočítanou výšku permanentního magnetu provedeme kontrolu proti trvalé demagnetizaci, která je způsobena vlivem reakce kotvy při záběrném proudu. Tento proud je třikrát větší než jmenovitý proud

$$\frac{I_k}{I_N} = 3$$

$$U_{mreakce} = \frac{Q_{SA}}{2p} \cdot S_{dsCu} \cdot \sigma_{max} \cdot \frac{I_k}{I_N} = \frac{I_{tot}}{2 \cdot p} \cdot \frac{I_k}{I_N} = \frac{2142,429}{16} \cdot 3 = \underline{401,7 \text{ A}}$$

$$U_{mPM} = U_{m\delta} + \frac{U_{mreakce}}{2}$$

$$B_{PM} \approx B_{\delta kmin} = 0,15 \text{ T}$$

$$H_{PMk} = \frac{B_{PMk} - B_r}{\mu_0 \cdot \mu_{rPM}} = \frac{0,15 - 1,06}{(4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}) \cdot 1,054} = \underline{-687,054 \text{ kA/m}}$$

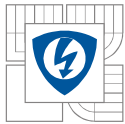
$$H_{PMk} \cdot l_{PM} = H_{\delta kmin} \cdot \delta + \frac{U_{mreakce}}{2} = \frac{B_{\delta kmin}}{\mu_0} \cdot \delta + \frac{U_{mreakce}}{2}$$

$$l_{PMk} = \frac{1}{H_{PMk}} \cdot \left(\frac{B_{\delta kmin}}{\mu_0} \cdot \delta + \frac{U_{mreakce}}{2} \right)$$

Pro materiál N35UH při provozní teplotě 120°C by velikost magnetické indukce neměla klesnout pod min $B_{\delta min} = 0,15 \text{ T}$.

$$l_{PMk} = \frac{1}{687 \cdot 10^3} \cdot \left(\frac{0,15}{(4 \cdot \pi \cdot 10^{-7})} \cdot 0,75 \cdot 10^{-3} + \frac{401,7}{2} \right) = \underline{0,423 \text{ mm}}$$

Námi navržená výška 1,674 mm permanentního magnetu vyhovuje, protože třínásobnému přetížení by z hlediska nevratné demagnetizace měly odolat permanentní magnety o výšce 0,423 mm.



6.1.6 Návrh počtu závitů statorových cívek

Maximální fázové napětí

$$U_{fmax} = \frac{U_{DC}}{2} = \frac{24}{2} = \underline{12 V}$$

Napětí indukované do vinutí jedné fáze

$$\Delta U_{Rf} \approx 1 V$$

$$\Delta U_{Rf} \approx 1 V$$

$$U_{ifmax} = U_{fmax} - \Delta U_{tr} - \Delta U_{Rf} = 12 - 1 - 1 = \underline{10V}$$

Počet vodičů jedné fáze

$$N_f = \frac{U_{ifmax}}{B_\delta \cdot l_{Fe} \cdot \omega \cdot r_\delta} = \frac{10}{0,65 \cdot 39 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{3600}{60} \cdot 22,125 \cdot 10^{-3}} = 47,29 = \underline{48 \text{ vodičů}}$$

Počet vodičů v jedné drážce

$$N_{ds} = \frac{N_f}{q \cdot 2p} = \frac{48}{1 \cdot 6} = \underline{8 \text{ vodičů}}$$

V každé drážce tedy bude 8 vodičů, 4 pro každou cívku navinutou kolem statorového zubu.

Největší možný použitelný průměr vodiče

$$D_v = \sqrt{\frac{S_{ds} \cdot k_{pCu}}{N}} = \sqrt{\frac{112,89 \cdot 0,3}{8}} = \underline{2,057 \text{ mm}}$$

Největší možný použitelný průřez vodiče

$$S_v = \frac{\pi \cdot D_v^2}{4} = \frac{\pi \cdot 2,057^2}{4} = \underline{3,32 \text{ mm}^2}$$



6.1.7 Návrh výšky jha rotoru

Pólová rozteč

$$\tau_p = \frac{2 \cdot \pi \cdot r_\delta}{2p} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 22,125}{16} = \underline{8,688 \text{ mm}}$$

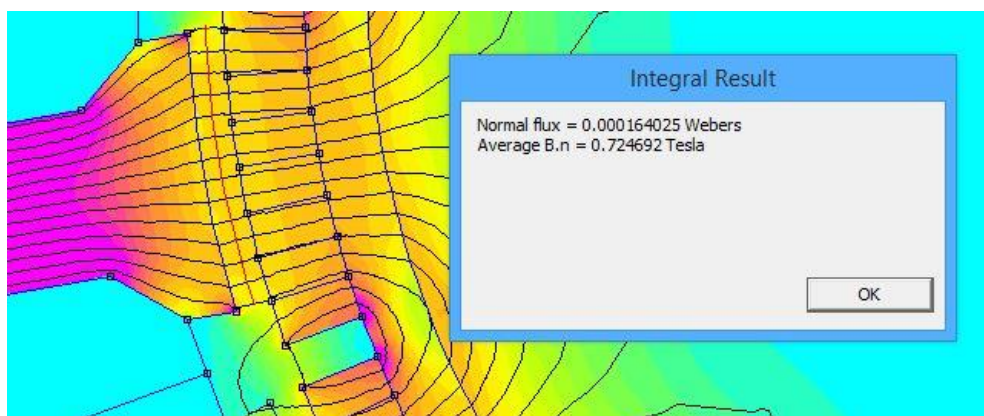
Výška jha rotoru

$$h_{jr} = \frac{1}{2} \cdot \frac{B_\delta}{B_{jr}} \cdot \tau_p \cdot \alpha_{PM} = \frac{1}{2} \cdot \frac{0,65}{1,5} \cdot 8,688 \cdot \frac{120}{180} = \underline{1,25 \text{ mm}}$$

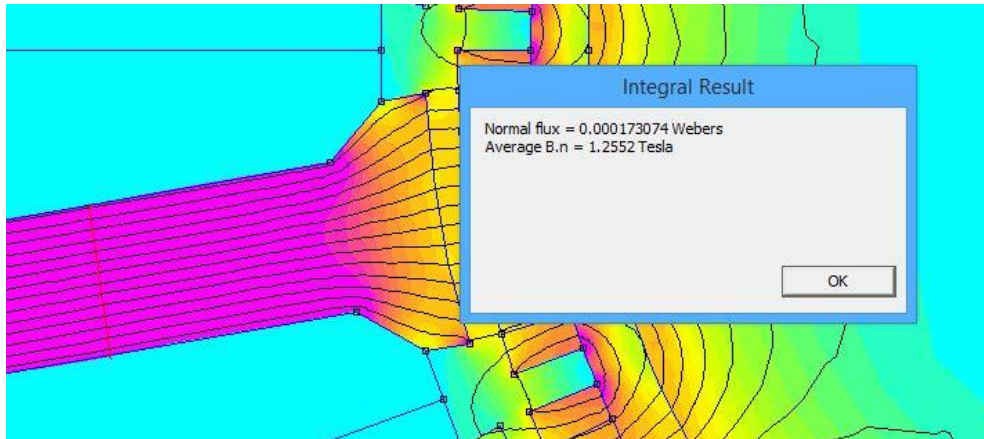
6.2 Ověření navrženého modelu v programu FEMM

Námi navržený model potřebujeme ověřit v programu FEMM, zkontrolujeme magnetickou indukci ve vzduchové mezeře a ve statorovém zubu, abychom dosahovali stejných hodnot jako u modelu 12/10. Provedeme tedy simulaci motoru při zapojení naprázdno.

Abych provedl analýzu, nejprve jsem importoval výkres řezu stroje namodelovaného v programu Autodesk Inventor do programu FEMM, doplnil všechny materiály a parametry potřebné pro výpočet metodou konečných prvků. Jelikož tento program neumožňuje nastavení radiálního magnetování permanentních magnetů, rozdělil jsem každý magnet na více částí a nastavil směr magnetizace k ose, nebo od osy otáčení.



Obrázek 33 Magnetická indukce ve vzduchové mezeře



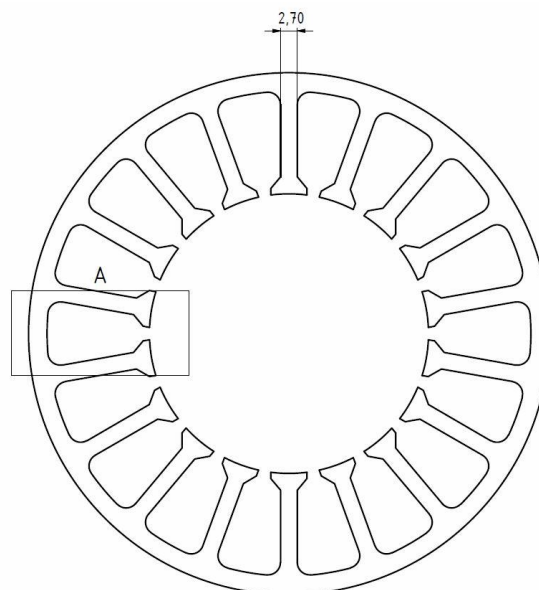
Obrázek 34 Magnetická indukce v zubu statorového svazku

Magnetická indukce v zubu statorového svazku je menší, než požadujeme, musíme tedy snížit šířku statorového zubu.

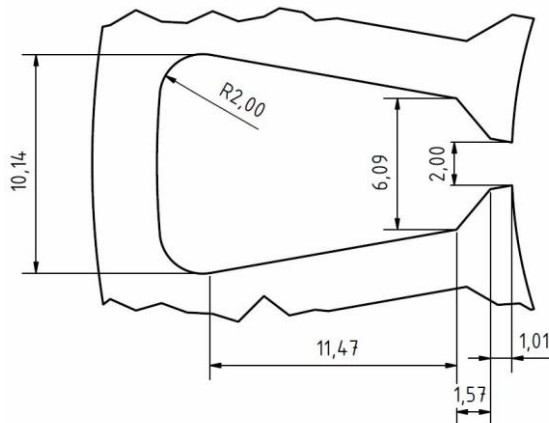
$$b_{zs} = b_{zs1} \frac{B_{jST}}{B_{jSTpož}} = 3,38 \cdot \frac{1,26}{1,6} = \underline{2,7 \text{ mm}}$$

6.2.1 Úprava statorového plechu

V programu Autodesk Inventor jsem upravil původní návrh statorového plechu na novou šířku zubu a přepočítal parametry, které jsou touto změnou ovlivněny. Poté jsem provedl novou analýzu.



Obrázek 35 Upravený statorový plech



Obrázek 36 Upravená drážka statorového plechu

Při úpravě návrhu se měnila se plocha drážky, která je nyní dle programu Autodesk Inventor $S_{ds} = 129,98 \text{ mm}^2$. Se změnou drážky musíme přepočítat některé parametry stroje:

Průřez mědi v drážce

$$S_{dsCu} = S_{ds} \cdot k_{pCu} = 129,98 \cdot 0,3 = \underline{39 \text{ mm}^2}$$

Maximální proudová hustota

$$\sigma_{\max} = \frac{I_{\text{tot}}}{Q_{SA} \cdot S_{dsCu}} = \frac{2142,43}{12 \cdot 39 \cdot 10^{-6}} = \underline{4,577 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2}$$

Ověření výpočtu proudu drážkou

$$I_{dr} = \sigma_{\max} \cdot S_{ds} \cdot k_{pCu} = 4,577 \cdot 10^6 \cdot 129,98 \cdot 10^{-6} \cdot 0,3 = \underline{178,48 \text{ A}}$$

Objem mědi jedné statorové cívky

$$V_{Cu1c} = S_{dsCu} \cdot l_z = 39 \cdot 119,074 = \underline{4,643 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3}$$

Objem mědi

$$V_{CuA} = \frac{Q_{SA}}{2} \cdot V_{Cu1c} = \frac{12}{2} \cdot 4,643 \cdot 10^{-6} = \underline{27,858 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3}$$

Ztráty ve vinutí statoru

$$\Delta P_{Cu} = \rho_{Cu90} \cdot \sigma_{\max}^2 \cdot V_{CuA} = 2,41 \cdot 10^{-8} \cdot (4,577 \cdot 10^6)^2 \cdot 27,858 \cdot 10^{-6} = \underline{14,06 \text{ W}}$$

Největší možný použitelný průměr vodiče

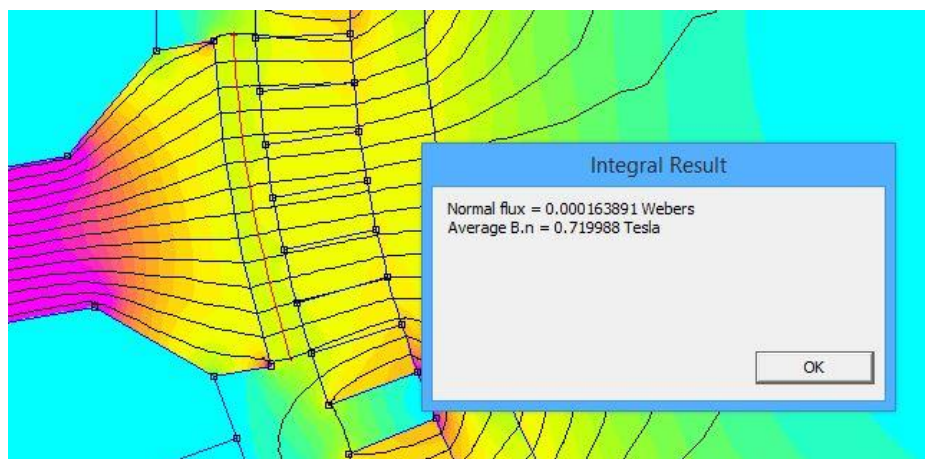
$$D_v = \sqrt{\frac{S_{ds} \cdot k_{pCu}}{N}} = \sqrt{\frac{129,98 \cdot 0,3}{8}} = \underline{2,21 \text{ mm}}$$

Největší možný použitelný průřez vodiče

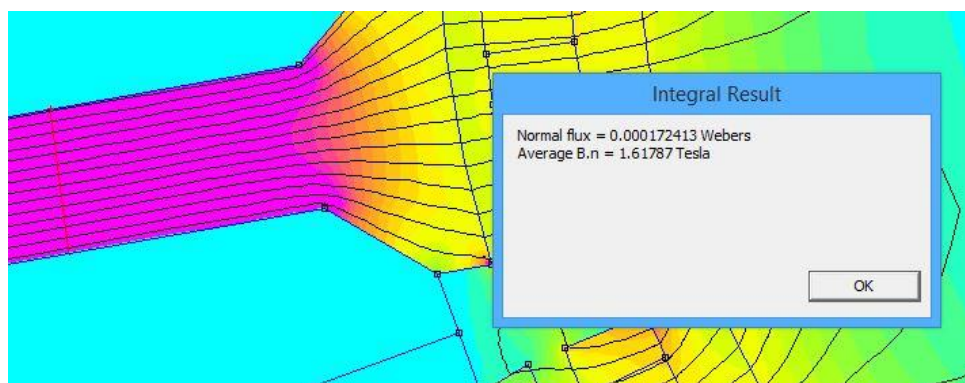
$$S_v = \frac{\pi \cdot D_v^2}{4} = \frac{\pi \cdot 2,057^2}{4} = \underline{3,82 \text{ mm}^2}$$

Zbytek vypočtených parametrů zůstane stejný, jako před úpravou šířky statorového zubu.

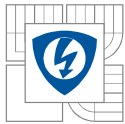
6.2.2 Ověření upraveného modelu v programu FEMM



Obrázek 37 Magnetická indukce ve vzduchové mezeře po úpravě zubu



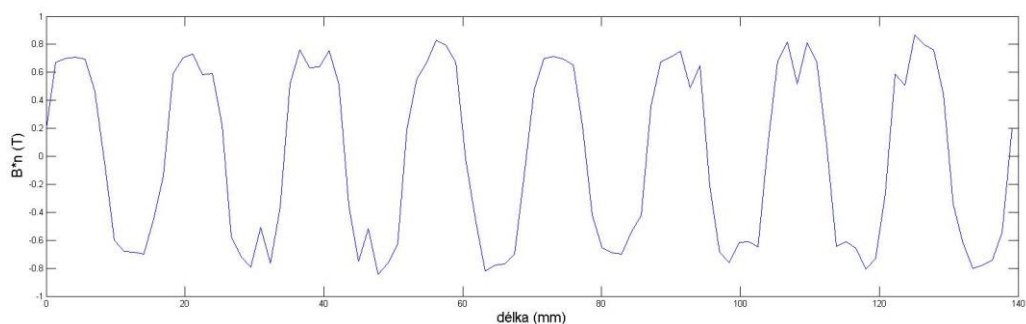
Obrázek 38 Magnetická indukce v zubu statorového svazku po úpravě zubu



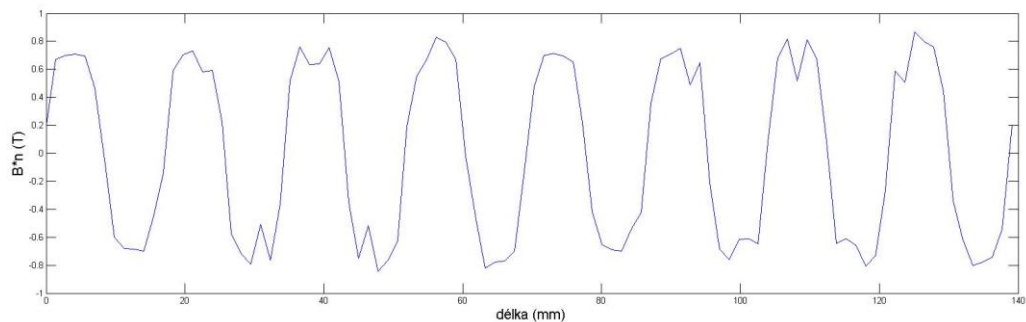
Magnetická indukce ve vzduchové mezeře zůstala stejná, ovšem magnetická indukce v zubu statorového svazku se změnila na námi požadovanou hodnotu $B_{jST} = 1,6T$. takto upravený návrh je pro nás vyhovující.

Prostorové průběhy normálové složky magnetické indukce ve středu vzduchové mezery po celém obvodu rotoru:

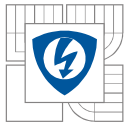
lineární



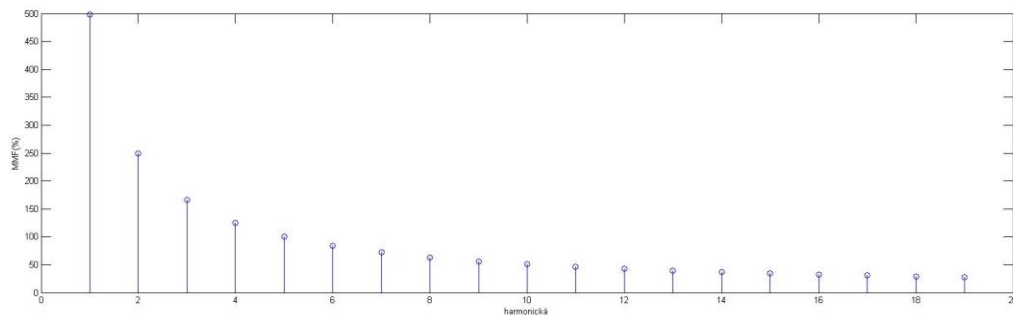
Obrázek 39 Průběh normálové složky mag. indukce ve středu vzduchové mezery pro M235-35A lineární



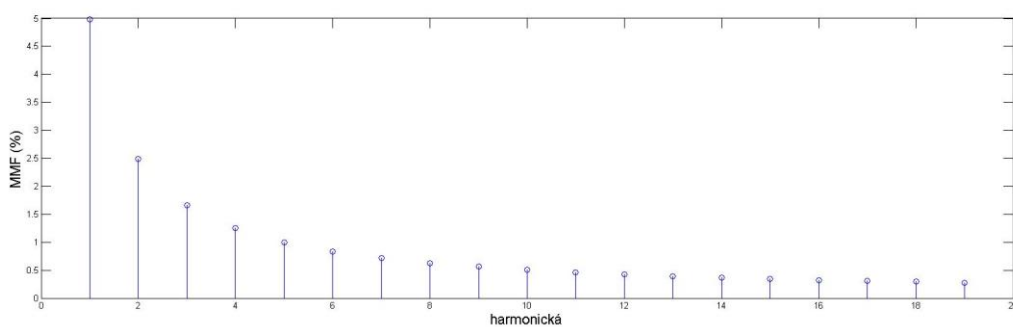
Obrázek 40 Průběh normálové složky mag. indukce ve středu vzduchové mezery pro M235-35A nelineární



Zobrazení průběhu harmonických složek motoru $Q_s/2p = 18/16$ s dvouvrstvým vinutím:



Obrázek 41 $Q_s/2p = 18/16$ průběh harmonických u dvouvrstvého vinutí s lineární charakteristikou



Obrázek 42 $Q_s/2p = 18/16$ průběh harmonických u dvouvrstvého vinutí s nelineární charakteristikou

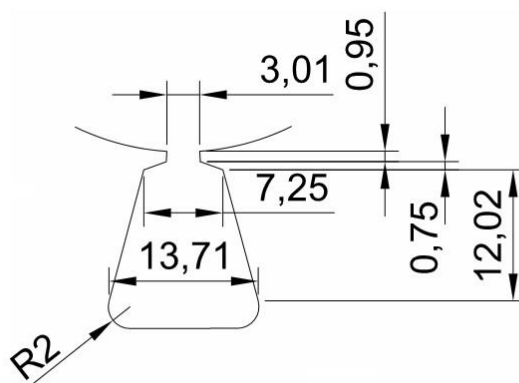
Z grafů vidíme, že výsledky návrhu s lineární charakteristikou železa v porovnání s nelineární charakteristikou jsou jen minimální odchylky.



7 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ NÁVRHU MOTORU $Q_s/2_p=12/10$ S NÁVRHEM MOTORU $Q_s/2_p=18/16$

Pro porovnání jsem použil výsledky výpočtu motoru 12/10 z bakalářské práce *Návrh synchronního stroje s permanentními magnety* [1]. Dle těchto parametrů jsem vytvořil model motoru 12/10 v program RMXprt a tyto hodnoty porovnal s mými výpočty a modelem motoru 18/16.

Parametry motoru 12/10 pro vytvoření modelu v program RMXprt

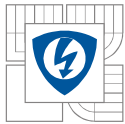


Obrázek 43 Rozměry drážky pro návrh modelu motoru 12/10

Rozměry rotoru a statoru obou typů motoru jsou identické, abychom mohli provést srovnání.

Tabulka 3 Rozměry obou typů motoru

Název veličiny	Jednotky	Výpočet
Vnější průměr statoru	D_{so}	84 mm
Vnitřní průměr statoru	D_{si}	45 mm
Délka statorového svazku	l_{fe}	39 mm
Délka vzduchové mezery	δ	0,75 mm
Průměr rotoru	D_r	43,5 mm
Průměr oceli na rotoru	D_{ro}	37,5 mm



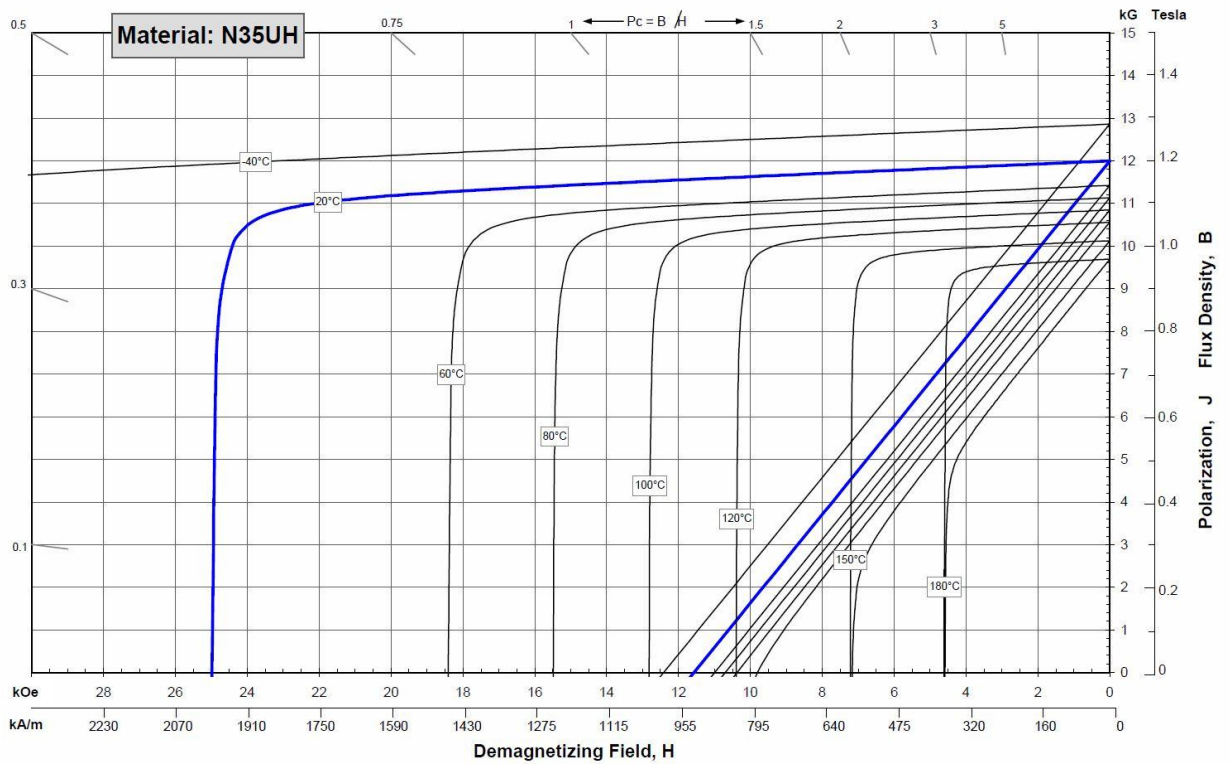
Tabulka 4 Vstupní parametry pro návrh motorů

		Q _s /2p=12/10	Q _s /2p=18/16
Počet drážek	N _{drážek}	12	18
Počet pólů	2p	10	16
Počet vodičů v drážce	N _{DS}	12	8
Činitel plnění drážky	k _{pCu}	0,3	0,3
Úbytek napětí na diodách	ΔU _{diod}	0,7V	0,7V
Úbytek na napájecích tranzistorech	ΔU _{tran}	0,5V	0,5V
Jmenovité otáčky	n _n	3600min ⁻¹	3600min ⁻¹
Jmenovité napětí	UDC	24V	24V
Jmenovitý výkon	P _n	400W	400W
Provozní teplota	ϑ _n	120°C	120°C
Mechanické ztráty	ΔP _{mech}	30W	30W
Materiál statorových plechů	typ	M235-35A	M235-35A

Při návrhu byly použity magnety na bázi vzácných zemin NdFeB. Tyto magnety bývají většinou vyráběny přesně podle zadaných parametrů pro daný typ stroje. Pro náš návrh byl zvolen NdFeB magnet s označením N35UH.

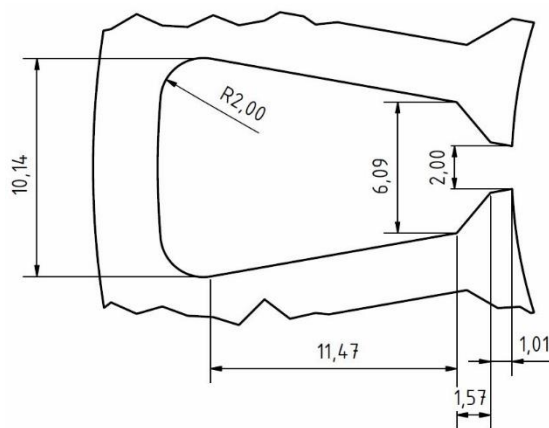
Tabulka 5 Vlastnosti magnetického materiálu N35UH při 20°C

Remanentní indukce	B _r	1200 mT
Koercivní síla	H _c	903 kA.m ⁻¹
Minimální vlastní koercivní síla	H _{cj}	1990 kA.m ⁻¹
Maximální energetický součin	BH max	275 kJ.m ⁻³

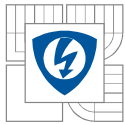


Obrázek 44 Demagnetizační charakteristika N35UH [19]

Pro model motoru 18/16 byl použit model drážky po úpravě šířky zubu statorového plechu

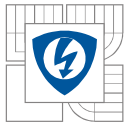


Obrázek 45 Drážka statorového plechu statoru 18/16



Tabulka 6 Porovnání vypočtených a namodelovaných parametrů motorů 12/10 a 18/16

Název veličiny	Jednotky	12/10		18/16	
		Výpočet	Simulace	Výpočet	Simulace
Vnější průměr motoru D_{SO}	[mm]	84		84	
Délka statorového svazku l_{Fe}	[mm]	39		39	
Délka závitu l_z	[mm]	95,09		119,074	
Materiál statorových plechů	[-]	M235-35A		M235-35A	
Počet statorových drážek $N_{Drážek}$	[-]	12		18	
Počet pólů $2p$	[-]	10		16	
Teoretický průměr vodiče D_v	[mm]	2,28		2,21	
Materiál PM	[-]	N35UH		N35UH	
Výška magnetů l_{PM}	[mm]	1,8		1,674	
Magnetická indukce ve statorovém zubu B_{JST}	[T]	1,56	1,44	1,6	1.84424
Magnetická indukce v rotorovém jhu B_{JR}	[T]	1,5	1,62	1,5	1.90
Magnetická indukce ve vzduchové mezeře B_δ	[T]	0,54	0,65	0,65	0.646
Efektivní hodnota proudu ve vinutí I_{ef}	[A]	16,7	17,85	15,77	17.81
Hmotnost permanentních magnetů m_{PM}	[g]	56,7		56,5	
Hmotnost statorových plechů m_{st}	[kg]	0,582		0.504	
Celková hmotnost m_m	[kg]	0,975		0.796	
Efektivní hodnota proudové hustoty σ	[A/mm ²]	4,08	4,36	4,58	4,01
Magnetická indukce ve vzduchové mezeře B_δ	[T]	0,54	0,65	0,65	0,645
Jmenovitý výkon P_n	[W]	400	402,6	400	399,27
Jmenovitý moment na hřídeli M_n	[Nm]	1,06	1,06	1,14	1,06
Jmenovité otáčky n_n	[min ⁻¹]	3600	3629	3600	3649
Ztráty v železe ΔP_{Fe}	[W]	10,5	21,45	15	17,6
Ztráty ve vinutí ΔP_{Cu}	[W]	12,46	13,28	14,06	16,28
Účinnost stroje η	[%]	88,3	86,06	86,73	84.47



ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo provést analýzu různých typů vinutí synchronního stroje s permanentními magnety z hlediska vzniku prostorových harmonických a porovnání těchto výsledků s modelem vytvořeným v programu FEMM. Dále pak provést výpočet těchto typů PMSM, vytvořit model v programu RMxpert a výsledky porovnat.

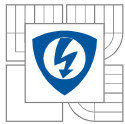
Práce obsahuje rešerši uspořádání permanentních magnetů, druhy použitých materiálů a jejich magnetizaci. Dále pak konstrukci motoru, porovnání typů vinutí, typů motorů s permanentními magnety, konfiguraci stroje a publikovaná řešení různých typů motorů s permanentními magnety.

Z těchto typů jsem vybral synchronní stroj s permanentními magnety na povrchu rotou a analyzoval typy $Q_s/2p = 12/10$ a $Q_s/2p = 18/16$ a to pro jednovrstvé a dvouvrstvé vinutí statoru. U motoru typu $Q_s/2p = 12/10$ se při použití dvouvrstvého vinutí značně sníží první harmonická, která je u jednovrstvého vinutí vyšší než pátá, pracovní harmonická. U motoru typu $Q_s/2p = 18/16$ se potom u dvouvrstvého vinutí několikanásobně sníží počet harmonických proti jednovrstvému vinutí.

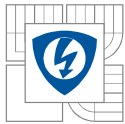
Tyto hodnoty byly ověřeny vytvořením modelu motoru typu $Q_s/2p = 12/10$, pro ocel typu M400-50A lineární i nelineární a modelu typu $Q_s/2p = 18/16$ pro ocel typu M235-35A s lineární i nelineární charakteristikou. Z výsledků je patrné, že závislost nelineární charakteristiky se v našem případě projeví jen nepatrně.

Jak je vidět z obrázků v příloze, také rozložení magnetické indukce je pro ocel s lineární charakteristikou téměř totožné jako je u oceli s nelineární charakteristikou. Pro jednovrstvé vinutí je maximální magnetická indukce u lineární oceli $B=0,0261T$ a u nelineární $B=0,0235T$. U dvouvrstvého vinutí je potom maximální magnetická indukce u lineární oceli $0,0438T$ a u nelineární $B=0,0431T$. Pokud porovnáme maximální indukci pro jednovrstvé a dvouvrstvé vinutí zjistíme, že se magnetická indukce téměř zdvojnásobila.

Dále jsem provedl výpočet motoru $Q_s/2p = 18/16$, pomocí programu FEMM zkontroloval magnetickou indukci v zubu statoru a ve vzduchové mezeře a původní návrh šířky zubu a drážky jsem upravil tak, aby vycházely podobné hodnoty jako u motoru $Q_s/2p = 12/10$. To bylo nutné, abychom mohli provést adekvátní porovnání obou typů motoru. Dále jsem v programu RMxpert vytvořil model motoru vypočítaný v práci *Návrh synchronního stroje s permanentními magnety* [20] a výsledné parametry porovnal.

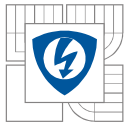


Motor typu $Q_s/2p = 18/16$ dosahuje ve výpočtu i v simulaci nepatrně nižších účinností, než motor $Q_s/2p = 12/10$, což může být způsobeno tím, že jsme vycházeli z návrhu motoru $Q_s/2p = 12/10$ a zachovali jsme tak veškeré rozměry stroje. Vyšší účinnosti stroje by bylo možné dosáhnout další optimalizací a změnami rozměrů stroje. Motor $Q_s/2p = 18/16$ má však nižší hmotnost a tím pádem i menší spotřebu materiálu.



LITERATURA

- [1] KRISHNAN, R. *Permanent magnet synchronous and brushless DC motor drives* [online]. Boca Raton: CRC Press/Taylor, c2010 [cit. 2013-12-04]. ISSN 978-0-8247-5384-9.
- [2] HENDERSHOT, J.R. a T.J.E. MILLER. *Design of Brushless Permanent-Magnet motors*. USA: Oxford University Press,. 1995. p. 584. ISBN 978-0198593898.
- [3] GIERAS, Jacek F. a Mitchell WING. *Permanent Magnet Motor Technology: Design and Applications*. New York: CRC Press, Inc., 2002. 2. ISBN 0-8247-0739-1.
- [4] HANSELMAN, Duane. *Brushless Permanent Magnet Motor Design*. 2nd ed. Lebanon, Ohio: Magna Physics Pub. ISBN 18-818-5515-5.
- [5] PETROV, G. N. *Elektrické stroje 2*. Praha: Academia, 1982. ISBN 21-055-80.
- [6] HUA, Wei, Ming CHENG, Hongyun JIA a Xiaofan FU. Comparative Study of Flux-Switching and Doubly-Salient PM Machines Particularly on Torque Capability. 2008 *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*. IEEE, 2008, s. 1-8. DOI: 10.1109/08IAS.2008.58. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5618269>
- [7] MORE, D.S., B.G. FERNANDES, Hongyun JIA a Xiaofan FU. Power density improvement of three phase flux reversal machine with distributed winding. *IET Electric Power Applications*. IEEE, 2010, vol. 4, issue 2, s. 109-. DOI: 10.1049/iet-epa.2009.0003. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4658846>
- [8] TANG, Y., J. J. H. PAULIDES, T. E. MOTOASCA a E. A. LOMONOVA. Flux-Switching Machine With DC Excitation. *IEEE Transactions on Magnetics*. IEEE, 2012, vol. 48, issue 11, s. 3583-3586. DOI: 10.1109/TMAG.2012.2199100. Dostupné z: <http://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/iet-epa.2009.0003>
- [9] FORNASIERO, Emanuele, Luigi ALBERTI, Nicola BIANCHI a Silverio BOLOGNANI. Considerations on selecting fractional—slot windings. 2010 *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*. IEEE, 2010, s. 1376-1383. DOI: 10.1109/ECCE.2010.5618269.
- [10] Adryl Electrotech Ltd.: Electrical Rewind Solutions. [online]. [cit. 2013-12-04]. Dostupné z: <http://www.adryl.com/images/Copy%20of%20elmo%20stator.jpg>



-
- [11] Uratani Engineering: Distributed winding. [online]. [cit. 2013-12-04]. Dostupné z: <http://www.uratani-eng.com/english/service/renovation1.html>
- [12] Uratani Engineering: Concentrated winding. [online]. [cit. 2013-12-04]. Dostupné z: <http://www.uratani-eng.com/english/service/renovation2.html>
- [13] RC Groups. In: [online]. [cit. 2013-12-04]. Dostupné z: <http://www.rcgroups.com/forums/attachment.php?attachmentid=3363792>
- [14] Wikimedia Commons: Stepper Motor. [online]. [cit. 2013-12-04]. Dostupné z: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Nema_17_Stepper_Motor.jpg
- [15] Microsun: Free Energy. [online]. [cit. 2013-12-04]. Dostupné z: http://www.phemax.com/images/freeproject_21.jpg
- [16] Control Engineering: Bezkartáčové motory s permanentními magnety. [online]. [cit. 2013-12-04]. Dostupné z: <http://www.controlengcesko.com/hlavni-menu/artykuly/artikul/article/bezkartacove-motory-s-permanentnimi-magnety/>
- [17] POPESCU, M., D.G. DORRELL, D. IONEL a C. COSSAR. Single and double layer windings in fractional slot-per-pole PM machines - effects on motor performance. 2008 *34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics* [online]. IEEE, 2008, s. 2055-2060 [cit. 2013-12-15]. DOI: 10.1109/IECON.2008.4758273.
- [18] VÍTEK, O. *Výpočet magnetického obvodu BLDC motoru s permanentními magnety: Studijní podklady*. Brno, 2012.
- [19] Neodymium-Iron-Boron Magnet Catalogs. ARNOLD MAGNETIC TECHNOLOGIES. *Arnold Magnetic Technologies Corporation* [online]. 2012 [cit. 2012-12-04]. Dostupné z: <http://www.arnoldmagnetics.com/WorkArea/DownloadAsset.aspx?id=5016>
- [20] BLAHA, J. *Návrh synchronního stroje s permanentními magnety*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 74 s.