

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA ELEKTROTECHNIKY A POČÍTAČOVÉHO
MODELOVÁNÍ

Disertační práce

**Bezkartáčový motor s Halbachovým
polem**

Ing. Miroslav Blohmann

2022

školitel: Prof. Ing. Pavel Karban, Ph.D.

Anotace

Předkládaná dizertační práce je zaměřena na problematiku BLDC motorů. Tento typ motorů je v současné době velmi široce používán. Hlavním cílem práce je s podporou simulací zkonstruovat kompletní funkční vzorek bezkartáčového motoru s Halbachovým polem, ověřit jeho funkčnost a porovnat jeho vlastnosti se strojem se standardním rotorem. K tomuto účelu jsou vytvořeny dva rotory stroje. Jeden standardní konstrukce a druhý vyrobený z plastu pomocí metody 3D tisku s použitím Halbachova pole. Po ověření základní funkčnosti stroje s Halbachovým rotorem je tento stroj porovnáván se strojem standardní konstrukce při použití stejného statoru z pohledu různých parametrů pro využití stroje v praxi.

Klíčová slova

BLDC motor, permanentní magnety, PMSM, vinutí, Hallovy senzory, konstrukce BLDC motoru, koncentrické vinutí, řízení BLDC stroje, 3D tisk, Halbachovo pole

Anotation

The thesis deals with BLDC motors. This type of motor is currently widely used. The main goal of this thesis is to design and mainly construct a complete functional prototype of a brushless motor with a Halbach array, to verify its functionality and to compare its properties with a machine with a standard rotor. For this purpose, two different rotors are created, one of standard construction and the other made of plastic using the 3D printing method with the Halbach array rotor. After verifying the basic functionality of the machine with the Halbach array rotor, this machine is compared with a machine of standard design using the same stator in terms of different parameters for the practical use of the machine.

Keywords

BLDC motor, permanent magnets, PMSM, winding, hall sensors, BLDC motor design, concentric winding, BLDC machine control, 3D print, Halbach array

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval svému školiteli prof. Ing. Pavlu Karbanovi, Ph.D. za jeho velmi cenné a podnětné rady, připomínky, metodické vedení práce a především za čas a ochotu, se kterou se mně vždy věnoval. Zároveň bych chtěl touto cestou poděkovat mojí rodině a blízkým za jejich podporu a trpělivost při mém studiu.

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení dizertační práci, zpracovanou během studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni. Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této práce, byl využit s respektováním všech licenčních podmínek.

V Plzni dne 11.06.2022

Miroslav Blohmann

Seznam symbolů a zkratek

BLDC	Brushless direct current
FEM	Finite element method
HDD	Hard disk drive
CD	Compact disc
PWM	Pulse width modulation
SW1-SW6	Switch 1-6
ČSN	České technické normy
EN	Evropské normy
MgO	Oxid hořečnatý
Nd	Neodym
Pr	Praseodym
FeNdB	Směs železa niklu a bóru
SmCo	Směs samarium cobalt
PMSM	Permanent magnet synchronous motor
EMF	Electromotive force
edeg	Electrical degree
mdeg	Mechanical degree
DXF	Drawing exchange format
FFT	Fast Fourier transform
MATLAB	Matrix laboratory
U, V, W	Fázové vodiče
f [Hz]	Frekvence
l [mm]	Délka
T _c [°C]	Curieova teplota
U [V]	Napětí
P [W, kW]	Činný výkon
n [ot./min.]	Otáčky za minutu
I [A]	Proud
M [Nm]	Točivý moment
m [Kg]	Hmotnost
S [mm ²]	Plocha
R [Ω, kΩ]	Odpor
F [N]	Síla
m [kg]	Hmotnost
g [ms ⁻²]	Gravitační zrychlení
P _m [W]	Mechanický výkon
P _e [W]	Elektrický výkon
v [ms ⁻¹]	Rychlost
I [A]	Proud
U [V]	Napětí
r [m]	Poloměr
T [°C]	Teplota
N [-]	Počet závitů
B [T]	Magnetická indukce
l [m]	Délka statoru
K _m [-]	Momentová konstanta

Obsah

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	6
OBSAH.....	7
ÚVOD A MOTIVACE PRÁCE.....	9
1 SOUČASNÝ STAV ZNALOSTÍ, SEZNÁMENÍ S BLDC MOTORY.....	10
1.1 TYPY BLDC MOTORŮ PODLE KONSTRUKCE.....	10
1.1.1 BLDC motor s rotorem uvnitř statoru (inrunner).....	10
1.1.2 BLDC motor s rotorem vně statoru (outrunner).....	12
1.2 TYPY BLDC MOTORŮ PODLE POČTU FÁZÍ.....	13
1.2.1 Jednofázový BLDC motor.....	13
1.2.2 Trojfázový BLDC motor.....	15
1.2.3 BLDC s jiným počtem fází.....	17
1.3 KONSTRUKCE BLDC MOTORŮ S VYUŽITÍM MODERNÍCH TECHNOLOGIÍ A 3D TISKU	17
2 CÍLE PRÁCE.....	19
3 POPIS JEDNOTLIVÝCH ČÁSTÍ BLDC STROJE Z HLEDISKA MATERIÁLŮ A TECHNOLOGIE VÝROBY.....	21
3.1 STATOR.....	21
3.2 VINUTÍ STATORU BLDC STROJŮ.....	23
3.3 ROTOR.....	24
3.4 PERMANENTNÍ MAGNETY.....	26
3.5 IZOLAČNÍ PODSYSTÉM BLDC STROJŮ.....	26
3.6 KONSTRUKČNÍ PODSYSTÉM BLDC STROJŮ.....	29
3.7 SENZORY BLDC STROJŮ.....	29
4 FUNKČNÍ VZOREK BLDC STROJE S OBĚŽNÝM ROTOREM.....	31
4.1 ZÁKLADNÍ PARAMETRY FUNKČNÍHO VZORKU.....	31
5 SIMULACE BLDC STROJE, POPIS PROGRAMU, ZÁKLADNÍ PARAMETRY	38
5.1 PŘEDSTAVENÍ PROGRAMU MOTORANALYSIS-PM.....	38
5.2 METODY ANALÝZY V PROGRAMU MOTORANALYSIS.....	38
5.3 POPIS MATEMATICKÉHO MODELU.....	40
5.4 SÍŤ PRO METODU KONEČNÝCH PRVKŮ.....	43
5.5 VÝPOČET MOMENTU V PROGRAMU MOTORANALYSIS.....	44
5.6 VÝPOČET ZTRÁT V ŽELEZE V PROGRAMU MOTORANALYSIS.....	46
5.7 VÝPOČET JOULEOVÝCH ZTRÁT V PROGRAMU MOTORANALYSIS.....	46
5.8 ZÁKLADNÍ PARAMETRY SIMULACE.....	46
6 SIMULACE STROJE S KOVOVÝM ROTOREM.....	49

6.1	MAGNETOSTATICKÁ ANALÝZA STROJE S ROZDÍLNÝMI ŠÍŘKAMI MAGNETŮ.....	49
6.2	SHRnutí VÝSLEDKŮ SIMULACÍ S RŮZNÝMI VELIKOSTMI MAGNETŮ NA ROTORU.....	49
6.3	ANALÝZA STROJE S KOVOVÝM ROTOREM S 15 MM MAGNETY.....	53
7	SIMULACE ROTORU S HALBACHOVÝM POLEM.....	63
7.1	PRINCIP HALBACHOVA POLE, USPOŘÁDÁNÍ MAGNETŮ A VYUŽITÍ V PRAXI.....	63
7.2	VOLBA ROZMĚRŮ MAGNETŮ PRO HALBACHOVO POLE.....	65
8	POROVNÁNÍ SIMULACÍ OBOU VARIANT ROTORŮ BLDC MOTORU.....	69
8.1	VZÁJEMNÉ POROVNÁNÍ SIMULACÍ ROTORŮ PRO REÁLNou KONSTRUKCI.....	72
9	REÁLNÁ KONSTRUKCE FUNKČNÍHO VZORKU BLDC STROJE.....	79
9.1	STATOR.....	79
9.2	VINUTÍ.....	80
9.3	ROTOR KLASICKÉ KONSTRUKCE Z FEROMAGNETICKÉ OCELI S 15 MM MAGNETY.....	81
9.4	ROTOR S HALBACHOVÝM POLEM VYROBENÝ Z NEMAGNETICKÉHO MATERIÁLU.....	81
10	KONSTRUKCE ROTORU S HALBACHOVÝM POLEM METODOU 3D TISKU.....	82
10.1	VÝBĚR MATERIÁLU PRO FUNKČNÍ VZOREK 3D TIŠTĚNÉHO ROTORU.....	83
10.2	PARAMETRY MODELU PRO 3D TISK.....	85
10.3	REÁLNÁ KONSTRUKCE ROTORU BLDC STROJE S HALBACHOVÝM POLEM.....	87
10.4	KONSTRUKCE KLECE PLASTOVÉHO ROTORU.....	87
10.5	KONSTRUKČNÍ SOUČÁSTI PLASTOVÉHO ROTORU.....	88
11	REÁLNÁ MĚŘENÍ BLDC STROJE S OBEĀMA VARIANTAMI ROTORŮ.....	94
11.1	MĚŘENÍ STROJE JAKO GENERÁTORU.....	94
11.2	MĚŘENÍ STROJE JAKO MOTORU BEZ ZÁTĚŽE.....	97
11.3	MĚŘENÍ STROJE JAKO MOTORU SE ZÁTĚŽÍ.....	99
11.4	DALŠÍ VERZE FUNKČNÍHO VZORKU BLDC STROJE S PLASTOVÝM ROTOREM.....	100
11.5	MĚŘENÍ STROJE S VRTULOVou ZÁTĚŽÍ.....	101
11.6	SHRnutí MĚŘENÍ S VRTULÍ.....	105
12	SHRnutí VÝSLEDKŮ A ZÁVĚR.....	107
	SEZNAM SOUVISEJÍCÍCH PUBLIKACÍ AUTORA.....	112
	SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....	113
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	121
	SEZNAM TABULEK.....	125
13	PŘÍLOHY.....	126

Úvod a motivace práce

Zkratka BLDC označuje stejnosměrné stroje s elektronickou komutací. Tato zkratka pochází z anglického termínu Brushless Direct Current Motor (bezkartáčový stejnosměrný motor). Tento typ motorů odstraňuje největší nedostatek klasických DC motorů. Tím je u standardních stejnosměrných strojů kluzný kontakt mezi kartáči a komutátorem. Tento mechanický kontakt způsobuje opotřebení kartáčů a při nedokonalém kontaktu také jiskření. To má za následek zvýšené nároky na údržbu. Naproti tomu BLDC motor neobsahuje žádný kluzný kontakt a komutace je realizována pomocí elektronických součástek. Tím je zajištěna bezúdržbovost a vysoká účinnost, která se u BLDC motorů může pohybovat až přes 95 %. Elektronická jednotka motoru přepíná jednotlivá vinutí statoru (nahrazuje mechanický komutátor) v závislosti na požadovaných vlastnostech motoru. Aby regulátor mohl vyhodnotit, kdy napájet kterou cívku vinutí pro hladký chod a největší možný moment, potřebuje mít regulátor přesnou informaci o poloze rotoru. Toho je možno dosáhnout různými způsoby, které jsou dále rozvedeny v dalších kapitolách práce.

V současné době díky výraznému nástupu elektromobility poptávka po BLDC motorech výrazně roste. BLDC motory jsou využívány ve výkonech od stovek wattů v elektrokolech, po desítky, případně stovky kilowattů v elektrických automobilech či letadlech. Cílem této práce je shrnout současné poznatky o konstrukci BLDC strojů a na základě těchto poznatků zkonstruovat funkční vzorek BLDC stroje, na kterém bude možno vzájemně porovnat rotor klasické konstrukce a rotor s Halbachovým polem a vliv těchto variant na chování a výkon BLDC stroje.

V literatuře je možno nalézt zdroje, zabývající se problematikou BLDC motorů s Halbachovým polem za použití simulací, avšak ke skutečnému ověření simulovaných výsledků za pomoci funkčního vzorku stroje dochází velmi zřídka. Tato práce proto může být nápomocná při návrhu nového BLDC motoru.

1 Současný stav znalostí, seznámení s BLDC motory

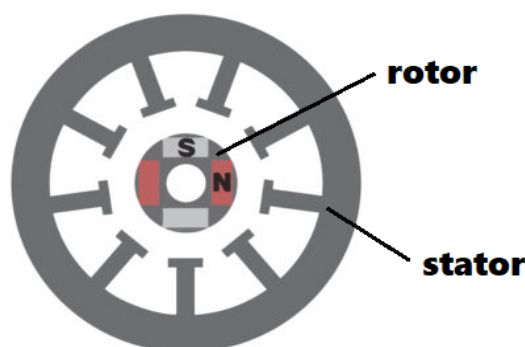
Princip stejnosměrného stroje je známý a používán dlouhé roky. Stroj typu BLDC odstraňuje známé problémy standardního stejnosměrného stroje. To znamená, že odpadá kluzný kontakt, který způsobuje jiskření a znečištění vnitřního prostoru motoru. Dále je rotor osazený permanentními magnety ze vzácných zemin, a tím odpadá nutnost rotorového vinutí a s ním spojené ztráty ve vinutí. Díky tomu je dosaženo velké účinnosti a spolehlivosti, kterou se BLDC motory vyznačují.

1.1 Typy BLDC motorů podle konstrukce

BLDC motory jsou konstruovány buďto v klasické koncepci nebo s oběžným rotorem, kdy rotor s permanentními magnety obíhá okolo statoru s navinutými cívkami.

1.1.1 BLDC motor s rotorem uvnitř statoru (inrunner)

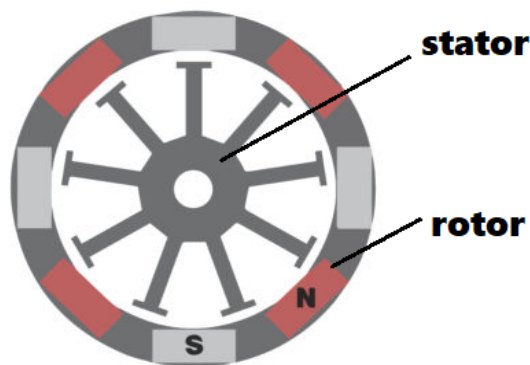
Standardní konstrukce je stejná jako u ostatních typů motorů. Tento typ se obvykle používá pro pohony automobilů, tříkolek a motocyklů v případě, že je výsledný moment na kola přenášen pomocí dodatečného převodového členu. BLDC motory jsou používány nejen ve vozidlech. V článku *Design and development of DC powered BLDC motor for Mixer-Grinder application* je například popsána záměna komutátorového motoru v mixéru za BLDC motor pro zvýšení účinnosti. [44] Výhodou klasického BLDC stroje je jeho jednoduchá konstrukce, jako kompletně uzavřený stroj. Dále díky statoru vně motoru je výrazně jednodušší možnost konstrukce kapalinového chlazení cívek statoru. Nevýhodou této koncepce BLDC stroje je pak horší dynamika oproti stroji s oběžným rotorem, a také horší odvod tepla od magnetů, které jsou uzavřeny uvnitř stroje. [1, 2, 4]



Obr. 1: BLDC s rotorem uvnitř statoru – inrunner (Upraveno z [4])

1.1.2 BLDC motor s rotorem vně statoru (outrunner)

Konstrukce BLDC stroje s rotorem obíhajícím kolem statoru je velmi hojně využívána u aplikací, kde je moment přenášen přímo na hnanou součást bez převodového prvku. Typickým příkladem oběžných BLDC motorů mohou být malé motorčky z CD mechanik a HDD. Dále pak jsou oběžné BLDC motory pro jejich větší moment a lepší chlazení magnetů vyhledávány příznivci modelaření, kteří pro tyto motory nacházejí velmi dobře uplatnění v modelech letadel pro pohon vrtule. Konstrukce stroje s oběžným rotorem se však uplatňuje i u aplikací s vyšším požadovaným výkonem, například u elektrokol, elektroskútrů či elektroaut, kde jsou tyto motory zabudovány přímo v poháněném kole (tzv. hub motor). V článku *Design and dynamic study of a 6 kW external rotor permanent magnet Brushless DC motor for electric drivetrains* je popsán proces návrhu a testování 6 kW BLDC stroje pro pohon malých elektrických vozidel. [48] Dále se také v posledních letech rozvíjí i elektrifikace létajících strojů, ať už jsou to elektrické paraglidy, rogala nebo skutečná letadla. [5] Porovnáním dostupných systémů pro použití v letectví se podrobně zabývá například článek *A Review of Electrical Motor Topologies for Aircraft Propulsion*, ve kterém jsou shrnuty dostupné technologie elektrických motorů a také napájecích baterií. [53] I v těchto případech je s výhodou využíváno konstrukce s oběžným rotorem. Často jsou tyto stroje konstruovány se vzduchovým chlazením, kdy chlazení je zajištěno náparem vzduchu od otáčející se vrtule. Díky tomu je zajištěna jednoduchost konstrukce, vysoká spolehlivost stroje, minimální nároky na údržbu a nízká cena stroje. [1, 4, 5]



Obr. 2: BLDC s rotorem vně statoru – outrunner (Upraveno z [4])

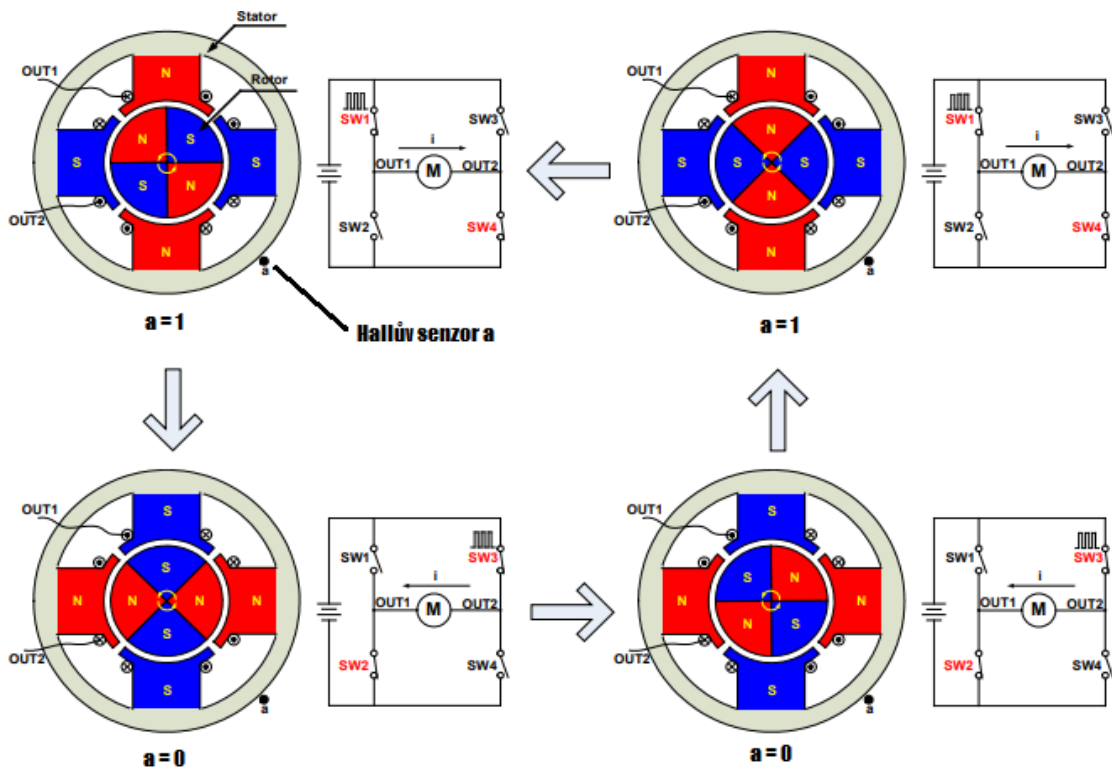
1.2 Typy BLDC motorů podle počtu fází

BLDC motory lze dělit podle počtu fází na statoru. Je možné se setkat s motory jednofázovými i vícefázovými. Počtem fází na statoru se poté řídí, mimo jiné, volba vhodného kontroléru k motoru.

1.2.1 Jednofázový BLDC motor

Statorové vinutí BLDC stroje je možno navrhnout tak, že ho lze řídit za pomoci H-můstku. Výhodou jednofázového BLDC motoru je tedy nízká cena komponentů řídicí elektroniky a jednoduchost řízení. Kontinuálního otáčení rotoru je zajištěno vhodným geometrickým uspořádáním zubů na rotoru a statoru a správně načasovaným přepínáním polarit napětí na vinutí. Pro správné načasování přepnutí polarit je využíváno snímače polohy. Tím je zajištěno přepínání polarit ve správný okamžik, a tudíž maximální točivý moment stroje. Výhodou jednofázového BLDC stroje je, že pro správnou informaci o poloze rotoru dostačuje pouze jeden Hallův senzor. Klíčové parametry řízení motoru jsou napájecí napětí, frekvence spínání a střída PWM modulace. Tyto parametry ovlivňují otáčky a moment motoru. Komutaci jednofázového BLDC ukazuje obrázek (Obr. 3) [1, 6].

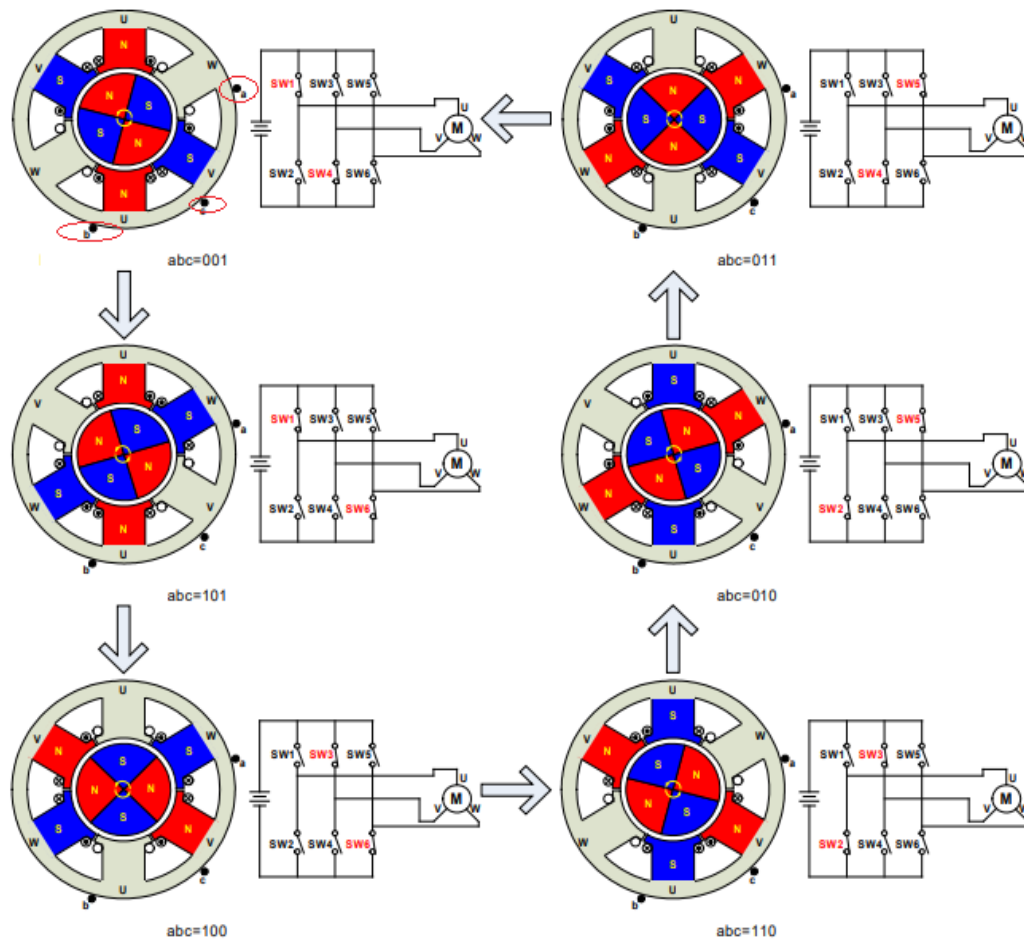
Jednofázové motory jsou využívány v jednoduchých aplikacích jako jsou například ventilátory, což je popsáno v článku *Development of external rotor single-phase PM BLDC motor based drive for ceiling fan*, kde je využita jednoduchost konstrukce a řízení jednofázového BLDC motoru. [56] I u jednofázových BLDC motorů je však možno použít pokročilejší formy řízení, což ukazuje článek z roku 2016 *Vector control of single phase brushless DC motor*, ve kterém je popsáno použití vektorového řízení pro zlepšení vlastností jednofázového BLDC motoru. [57]



Obr. 3: Komutace jednofázového BLDC motoru (Upraveno z [6])

1.2.2 Trojfázový BLDC motor

Trojfázový BLDC motor je nejrozšířenější konstrukcí BLDC motoru. Oproti jednofázovému BLDC motoru lze u tohoto motoru redukovat pulzační moment a díky přesnějšímu řízení třífázový BLDC motor dosahuje lepšího výkonu a účinnosti oproti stroji jednofázovému. [6] Pro motor se snímáním polohy rotoru jsou potřeba minimálně tři Hallovy senzory. To odpovídá šesti krokům po 60° elektrických na jednu elektrickou otáčku, kdy při každých 60° změní jedna Hallova sonda svůj stav. V závislosti na fyzickém umístění Hallových sond v motoru buďto po 60° nebo 120° je potřeba vybrat vhodný kontrolér. Většina komerčně dostupných kontrolérů již však standardně nabízí možnost softwarového přepnutí mezi 60° a 120° . Na obrázku (Obr. 4) je uvedeno přepínání jednotlivých kroků pro trojfázový BLDC motor. Pro každý krok je na jeden ze tří fázových vývodů přivedena kladná polarita (High), na druhý záporná polarita (Low) a třetí zůstává nenapájený (Float). Tímto šestikrokovým způsobem řízení se zabývá například článek *Instrumentation and control of a high power BLDC motor for small vehicle applications*, ve kterém je popsáno řízení motorů pro pohon malých elektrických vozidel. [59] Počet plných elektrických otáček na jednu mechanickou otáčku závisí na počtu pólových dvojic na rotoru. Každý pólpár potřebuje jeden signálový cyklus za jednu mechanickou otáčku. To znamená, že počet elektrických cyklů na jednu mechanickou otáčku je roven počtu pólových dvojic na rotoru. [1, 6]



Obr. 4: Komutace trojfázového BLDC motoru (Upraveno z [6])

Na příkladu je znázorněn BLDC motor s Hallovými senzory umístěnými po 120° . Hallové senzory jsou využívány pro zjištění polohy rotoru. Díky pokročilému řízení je možno motor provozovat i v případě poruch jednoho z Hallových senzorů. Článek *Application of a smart hall effect sensor system for 3-phase BLDC drives* popisuje, jakým způsobem je možno provozovat stroj v případě poruchy senzorů. [60] Pro ovládání rychlosti jsou spínače SW1 – SW6 ovládány pomocí PWM modulace. Je potřeba vzít v úvahu, že frekvence PWM modulace by měla být minimálně desetkrát vyšší, než maximální dosažitelná frekvence otáčení rotoru. [6]

1.2.3 BLDC s jiným počtem fází

V praxi je možné se setkat i s BLDC motory, které jsou konstruovány s jiným počtem fází než jedna nebo tři. Poměrně často lze nalézt například BLDC motory šestifázové. V článku *FEM simulation and harmonic torque analysis of six-phase BLDC motor* je provedena analýza šestifázového BLDC stroje a jeho výhod oproti třífázovému BLDC motoru. [63] Je třeba mít na paměti, že nestandardní počet fází vyžaduje nestandardní návrh řídicího algoritmu a jiný počet senzorů pro polohu rotoru. Tyto motory jsou proto většinou navrženy přímo pro konkrétní aplikaci včetně řízení. Konkrétním příkladem využití šestifázového BLDC stroje může být například motor pro posilovač řízení, který dokáže pracovat i při poškození. [7] Nevýhodou tohoto stroje je již zmíněné komplikované řízení a zároveň velký počet použitých spínacích součástek a senzorů polohy. [7]

1.3 Konstrukce BLDC motorů s využitím moderních technologií a 3D tisku

V literatuře se objevují informace o využití 3D tisku pro konstrukci BLDC strojů. Poměrně velké množství informací lze nalézt o použití metody tisku vinutí obdobnou technologií, která se využívá pro výrobu desek plošných spojů, ať už pevných či flexibilních. Například v článku *Analysis of a new topology of flexible PCB winding for slotless BLDC machines* je popsána možnost natisknutí vinutí obdobnou technologií, jako jsou vyráběny desky plošných spojů. [42] Také v článku *Design of 3D Printed High Performance Windings for Switched Reluctance Machines* je popsáno použití technologie 3D tisku pro výrobu cívek pro reluktanční motory. [65] Dále článek *Theoretical and Experimental Investigation of Flex-PCB Air-Gap Windings in Slotless BLDC Machines* [75] se zabývá použitím flexibilních desek plošných spojů pro BLDC motory. V článku je zmíněno, že použitím optimalizovaného tvaru vinutí na flexibilní desce plošných spojů je možno teoreticky dosáhnout zvýšení hustoty výkonu stroje až o 23%. Touto technologií je totiž možno jednoduše dosáhnout zkoseného tvaru vinutí (skewed winding), které při běžném výrobním procesu vyžaduje nákladné strojní vybavení a k jeho využití obvykle dochází až při sériové výrobě. Využití vinutí na flexibilní desce plošných spojů tedy umožňuje výrazné zjednodušení výrobního procesu vinutí a to i při využití speciálních tvarů cívek vinutí. Dále je díky této technologii možno plně využít prostor mezi

jednotlivými závity cívek, a tím zajistit lepší činitel plnění drážky a lepší odvod tepla. Zmínky o využití technologie tištěného vinutí se také objevují již ve starších člancích, například v *Development of dual air gap printed coil BLDC motor* [76] z roku 1999.

V článku *Design of 3D-Printed Hybrid Axial-Flux Motor Using 3D-Printed SMC Core* [77] je popsáno využití magneticky měkkého kompozitu (SMC), který je možno díky jeho speciálním vlastnostem využít pro 3D tisk statoru BLDC motoru. Z článku vyplývá, že vhodným použitím této technologie lze zlepšit účinnost a další vlastnosti stroje při zachování stejných rozměrů. Tato technologie je však vhodná spíše pro výrobu prototypů než pro sériovou produkci. Navíc je 3D tisk magneticky měkkého kompozitu nákladný a náročný na speciální vybavení. Tímto tématem a 3D tiskem motoru z SMC se také zabývá článek *Application of Magnetic Metal 3-D Printing on the Integration of Axial-Flow Impeller Fan Motor Design* [78]. V tomto článku je popsán návrh, simulace a výroba prototypu FSPM motoru pro axiální ventilátor o výkonu 30 W. Prototyp motoru byl vyroben technologií SLM se speciální izolační vrstvou oxidu. Technologie SLM je však stále velmi náročná na vybavení, a také nákladná. Pro sériovou výrobu je proto zatím prakticky nepoužitelná.

V článku *Analysis and Experimental Investigation of 3D Printed Electric Motor with Permanent Magnets* [74] je popsána výroba malého BLDC motoru s oběžnou konstrukcí pomocí 3D tisku, přičemž pro výrobu statoru je použitý feromagnetický materiál s relativní permeabilitou 5-8 (PLA s feromagnetickou příměsí). Rotor je vytištěn pomocí standardního PLA. Motor byl dle článku schopen fungovat až do 3000 ot./min., avšak nejsou zde uvedeny žádné hodnoty získané z testování prototypu. Není tedy možno říci, jakého výkonu byl motor schopen dosáhnout při praktických testech. Magnety jsou v motoru složeny v klasickém uspořádání, nikoli ve tvaru Halbachova pole.

Využití Halbachova pole pro zlepšení vlastností BLDC motoru je prezentováno v článku *The Performance Enhancement of BLDC Motor Using Halbach Array Rotor* [66]. Autoři se snaží porovnat vlastnosti BLDC motoru s Halbachovým uspořádáním magnetů s motorem s klasickým uspořádáním. Z testování vyšlo najevo, že použitím Halbachova pole bylo možno zlepšit vlastnosti BLDC motoru, například účinnost, výkon a rozběhový moment stroje. Analýza strojů probíhala pouze pomocí výpočtů a simulací, nikoli

praktickým otestováním vlastností jednotlivých typů motorů. Podobným tématem se zabývá článek *Efficiency Improvement of Permanent Magnet BLDC With Halbach Magnet Array for Drone* [79]. Z publikovaných výsledků vyplývá, že vhodným využitím Halbachova pole bylo možno zvýšit účinnost BLDC motoru pro pohon dronu o 2,8 %. Výsledky byly opět získány pomocí simulací a nedošlo k praktickému ověření.

Dalším článkem, zabývajícím se BLDC strojem s Halbachovým polem je *Design and Analysis of Halbach Ironless Flywheel BLDC Motor/Generators* [80]. V tomto článku je popsán návrh BLDC stroje pro použití jako vysokootáčkového setrvačnicku. Z analýzy vyplývá, že motor s Halbachovým polem má proti klasickému uspořádání hladší průběh indukovaného napětí a také vyšší amplitudu indukovaného napětí. Dále dosahuje motor vyššího točivého momentu a zároveň nižšího zvlnění momentu. Velice důležitým aspektem je v případě Halbachova pole jeho konkrétní uspořádání, co do počtu, velikosti a tvaru jednotlivých magnetických segmentů. Tímto problémem se zabývá například článek *Halbach array variations on BLDC motor under magnet constraint* [81]. V článku jsou pomocí FEM porovnávány a vzájemně testovány různé tvary, velikosti a počty permanentních magnetů, vždy však se stejným objemem. Výsledky opět potvrzují, že využití Halbachova pole v porovnání s klasickou konstrukcí magnetů přináší určité výhody. Dále pak bylo zjištěno, že tvarem, směrem magnetizace a počtem magnetů je možno poměrně výrazně ovlivnit magnetické pole stroje a jeho výsledné vlastnosti.

2 Cíle práce

Využití Halbachova pole v BLDC motorech se jeví jako velice zajímavé. Největší překážkou v jeho širším využívání je obtížná konstrukce Halbachova pole. K vyřešení tohoto problému mě napadlo využít 3D tisku. V předchozí kapitole byly uvedeny články zabývající se touto problematikou s využitím technologie SLM, která je velmi náročná na vybavení, a tudíž značně nákladná. Tento problém by měla vyřešit moje práce, ve které jsem se rozhodl vyvinout BLDC motor s plastovým rotorem s permanentními magnety uspořádanými do Halbachova pole. Výsledný motor bude nejen nasimulován, ale také zkonstruován, prakticky otestován a porovnán vůči motoru s klasickým uspořádáním permanentních magnetů.

Hlavním cílem práce je vývoj a realizace funkčního vzorku bezkartáčového stroje s rotorem s permanentními magnety v uspořádání do Halbachova pole za použití 3D tisku a porovnání tohoto typu stroje se strojem s rotorem s permanentními magnety v klasickém uspořádání, a to nejen pomocí simulací, ale také pomocí praktických měření na zkonstruovaném funkčním vzorku. Funkční vzorek bude navržen tak, aby jeho vlastnosti korespondovaly s vlastnostmi komerčně dostupných strojů s obdobnými parametry. Bylo by možno využít i komerčně dostupný stator stroje a zabývat se pouze úpravou jeho rotoru na rotor s Halbachovým polem. Z důvodu ucelené konstrukce kompletního stroje a případných jednodušších změn a úprav v konstrukci jsem se rozhodl, že bude vyroben kompletní stroj včetně statoru. Od stroje pak budou očekávány obdobné vlastnosti, jaké mají běžně dostupné, komerčně prodávané motory. K předběžnému odhadnutí vlastností BLDC motoru bude využito modelování pomocí FEM. Z vytvořených modelů pak bude vybrána nejvhodnější konfigurace tak, aby bylo dosaženo kombinace nejlepších výsledků s přihlédnutím k rozličným parametrům motoru. Sledovanými parametry jsou například robustnost, přetížitelnost, účinnost, jednoduchost konstrukce, nároky na údržbu, časová náročnost oprav, životnost a cena. Dále bude následovat konstrukce funkčního vzorku stroje, přičemž budou v práci shrnuty současné poznatky týkající se materiálů a technologií výroby jednotlivých podsystémů BLDC stroje tak, aby bylo možno zvolit vhodnou technologii výroby pro funkční vzorek a následně pak technologii jednoduše modifikovat pro sériovou výrobu stroje.

Stator stroje bude sestaven dle současných standardů, přičemž návrh stroje se bude opírat o poznatky z literatury pro stavbu elektrických strojů [16], [18], [71], [72]. Oběžné rotory stroje budou vyrobeny dva vzájemně záměnné. Prvním typem použitého rotoru bude rotor standardní konstrukce se jhem z feromagnetického materiálu a klasickým uložením magnetů na povrchu rotoru. Druhá varianta rotoru bude sloužit k otestování použitelnosti konstrukce z plastu s využitím metody 3D tisku. V tomto rotoru budou magnety uspořádány do Halbachova pole. Tyto dvě varianty rotorů budou podrobeny stejným testům, za použití stále stejného statoru stroje, stejných měřících metod a měřících přístrojů. Tím bude možno spolehlivě vyhodnotit výhody a nevýhody jednotlivých variant a ověřit, zda použití jiného než feromagnetického materiálu na jeho rotoru stroje může být vhodné pro konkrétní aplikace.

Vytyčené cíle práce je možno shrnout v následujících bodech:

- shrnutí současných poznatků z materiálů a technologie výroby jednotlivých podsystémů BLDC strojů
- vytvoření více variant simulačních modelů stroje
- konstrukce funkčního vzorku BLDC stroje s přihlédnutím k výsledkům simulací
- výroba dvou vzájemně záměnných rotorů BLDC stroje, jeden standardní konstrukce z feromagnetického materiálu s klasickým uložením permanentních magnetů a druhý metodou 3D tisku z plastu s magnety v uspořádání do Halbachova pole
- porovnání vlastností BLDC stroje s oběma variantami rotorů, získaných z měření a simulací, praktické využití obou variant rotorů

3 Popis jednotlivých částí BLDC stroje z hlediska materiálů a technologie výroby

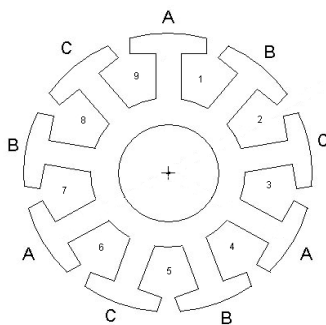
Tato kapitola se podrobněji věnuje jednotlivým komponentům, ze kterých se skládá BLDC motor.

3.1 Stator

Základní částí BLDC motoru je jako u ostatních točivých strojů stator. Stator je kruhového průřezu s drážkami a póly (Obr. 5), na kterých je navinuto statorové vinutí. Materiál použitý pro konstrukci magnetického obvodu statoru hraje velmi významnou roli v konečné účinnosti stroje. Z principu funkce BLDC motoru, kdy jsou jednotlivé póly statoru cyklicky spínány, je záhodno použít stator složený z magneticky měkkého materiálu s co nejmenší plochou hysterézní smyčky. Dále je vhodné stator složit z navzájem izolovaných tenkých plechů, pro co možná největší omezení ztrát vířivými proudy. Vířivé proudy jsou úměrné druhé mocnině tloušťky plechu a druhé mocnině frekvence proudu.

Vzhledem k poměrně vysokému počtu pólů u BLDC strojů se spínací frekvence proudu pro vyšší otáčky stroje pohybuje v řádu stovek Hz., proto ztráty vířivými proudy

hrají významnou roli v celkových ztrátách motoru. Z tohoto důvodu se místo plného jádra používá téměř výhradně laminované jádro („listění“). Skládáním vzájemně izolovaných plechů (listů) se výrazně zvýší odpor jádra pro vířivé proudy a tím poklesnou ztráty způsobené vířivými proudy. Odpor se dále zvyšuje použitím plechů s vyšším obsahem křemíku. [8], [9]



Obr. 5: Stator BLDC stroje s oběžným rotorem [2]

Pro výrobu statoru BLDC stroje je tedy vhodné využít elektrotechnický plech, který je izotropní (ve všech směrech stejná magnetická vodivost), za studena válcovaný a tepelně zpracovaný. Dle normy ČSN EN 10106 - Plechy a pásy pro elektrotechniku izotropní válcované za studena dodávané v tepelně zpracovaném stavu. [10] Dle výše uvedené normy jsou běžně dostupné plechy v tloušťkách 0,35 mm; 0,50 mm a 0,65 mm. Podle zdroje [11] jsou tyto plechy dostupné v několika stupních kvality. Běžně dostupné jsou například plechy s označeními: M330-50A, M350-50A, M400-50A, M470-50A, M530-50A, M600-50A, M700-50A, M800-50A. Po telefonickém dotazu mně byl firmou Kovintrade Praha s.r.o. nabídnut ještě plech vyšší jakosti s označením M270-35A C5 (obchodní označení Remisol EB5308), jehož ztráty nepřesahují 2,7W/kg pro 50 Hz při magnetické indukci 1,5 T. Technický list použitého plechu je v příloze práce.

Jak již bylo uvedeno výše, ve statoru BLDC motoru probíhá změna magnetického pole s výrazně vyšší frekvencí než 50 Hz. Pro omezení ztrát v železe je proto velice důležité zvolit kvalitní plech s co možná nejmenšími ztrátami a s co možná nejmenší tloušťkou. Z tohoto důvodu byl pro výrobu BLDC stroje zvolen plech M270-35A C5 i přes jeho vyšší cenu, která odpovídá kvalitě.

3.2 Vinutí statoru BLDC strojů

Vinutí BLDC stroje je umístěno uvnitř drážek okolo jednotlivých pólů. Rotor je složen z permanentních magnetů umístěných po obvodu tak, že se střídá vždy severní a jižní pól magnetu. Počet zubů statoru a počet magnetů na rotoru musí být v určitém poměru, aby motor fungoval. Nejzákladnější podmínka je, že počet zubů na statoru musí být vždy číslo dělitelné třemi a počet magnetů na rotoru musí být vždy číslo dělitelné dvěma. Vhodnost jednotlivých poměrů počtu pólů na statoru a rotoru a typ vinutí pro jednotlivé poměry ukazuje tabulka (Tab. 1). Odlišení směru navinutí se provádí za pomoci velkých a malých písmen. [4]

zuby póly	3	6	9	12	15	18
2	ABC	ABCabc	AacBBaCCb	AaccBBaaCCbb	AAACcbbbaaCCCbb	AAAccBBBaaaCCcbbb
4	ABC	ABCABC	ABaCAcBCb	AcBaCbAcBaCb	AACBaCCbAcBBaCb	AACBBaCCbAAcBBaCCb
6			ABCABCABC			AcBaCbAcBaCbAcBaCb
8	ABC	ABCABC	AaABbBCcC	ABCABCABCABC	AcaCABabABCbcBc	ABaCAcBCbABaCacBCb
10	ABC	AbCaBc	AaABbBCcC	AabBCcaABbcC A-b-C-a-B-c	ABCABCABCABCABC	AcabABCbcaCABabcBC
12			ABCABCABC			ABCABCABCABCABC AaBbCcAaBbCcAaBbCc A-B-C-A-B-C-A-B-C
14	ABC	AcBaCb	ACaBAbCBc	AacCBbaACcbB A-b-C-a-B-c	AaAaABbBBBCcCcC	AabcCABbcaABCcabBC
16	ABC	ABCABC	AAbCCaBBc	ABCABCABCABC	AaAaACcCcCBbBBB	AaABbBCcCAaABbBCcC
20						AaABbBCcCAaABbBCcC

Tab. 1: Kombinace statorových a rotorových pólů (modré – ideální, bílé – možné, oranžové – nepříliš vhodné, černé – nevhodné) - upraveno z [4]

Dále pak rozlišujeme několik druhů zapojení vinutí. Vinutí do hvězdy se obvykle používá u malých motorků například v CD mechanikách. Všechny závity u vinutí do

hvězdy jsou vinuty vždy stejným směrem. Vinutí do trojúhelníka je nejčastěji používané u BLDC motorů s oběžným rotorem vyšších výkonů. [4] Ostatní druhy vinutí jsou určité modifikace popřípadě kombinace vinutí do hvězdy a do trojúhelníka. V některých případech bývá vinutí realizováno tak, že část je navinuta po směru hodinových ručiček a jiná část je navinuta v opačném směru. U jiných druhů je vinutí navinuto pouze v jednom směru. Toho si lze povšimnout v tabulce Tab. 1. Změna směru vinutí jednotlivých pólů může působit potíže při výrobě BLDC strojů ať při strojním či ručním navíjení. Je proto potřeba brát tento fakt v úvahu při návrhu stroje.

Materiálem pro vinutí BLDC motorů je jako v drtivé většině jiných točivých strojů měď. Průřez vinutí je obvykle kruhový, pro zvýšení činitele plnění drážky je možno použít i vodič obdélníkového průřezu. Použité průřezy, množství paralelních vodičů, teplotní třída izolace, počet vrstev laku vodiče a další parametry jsou zohledňovány při návrhu stroje v závislosti na typu vinutí a požadovaných vlastnostech stroje. [17], [19]

3.3 Rotor

Jak již bylo uvedeno výše, rotor je podle typu konstrukce realizován buď jako obíhající kolem statoru (Obr. 6), nebo otáčející se uvnitř statoru u klasické konstrukce (Obr. 7). Rotor BLDC stroje je složen z permanentních magnetů, které jsou připevněny na povrchu rotoru.



Obr. 6: Oběžná konstrukce rotoru



Obr. 7: Klasická konstrukce rotoru
(upraveno z [20])

Nosný povrch rotoru je obvykle vyroben z magneticky měkké oceli. Je možno jej vyrobiť z plechů, ale vzhľadom ke konštantní magnetizaci od permanentních magnetů může být rotor vyroben i z jednoho kusu materiálu. Zásadním problémem, který je nutno brát v potaz při konstruování rotoru, je upevnění magnetů na povrchu rotoru proti odstředivým silám. U strojů s oběžným rotorem působí na magnety větší odstředivé síly, vzhľadem k většímu průměru rotoru, a tudíž větší úhlové rychlosti na povrchu rotoru. Výhodou však je, že magnety jsou umístěny na vnitřním povrchu rotoru a tím pádem působí odstředivá síla proti materiálu rotoru. Magnety se tedy obvykle připevňují za pomoci lepidel na bázi epoxidových pryskyřic.

U strojů s klasickou vnitřní konstrukcí rotoru jsou odstředivé síly působící na permanentní magnety obvykle nižší díky menšímu průměru rotoru. Problémem však je, že odstředivá síla odtahuje magnet směrem od konstrukce rotoru. Proto pouhé přilepení magnetů nemusí být dostačující. U klasické konstrukce rotoru je tedy často využíváno bandáží, které pomáhají držet magnety na místě. Tyto bandáže jsou obvykle vyrobeny z kompozitních materiálů. Podle požadavků může být materiál výztuže například skelná tkanina. Pro konstrukce, kde je potřeba dosahovat nejvyšších pevností a zároveň co nejvíce ušetřit na hmotnosti se pak využívá kevlarových výztuží (Obr. 8). [20], [17], [18], [19].



Obr. 8: Rotor klasické konstrukce s magnety upevněnými pomocí kompozitových bandáží (upraveno z [20])

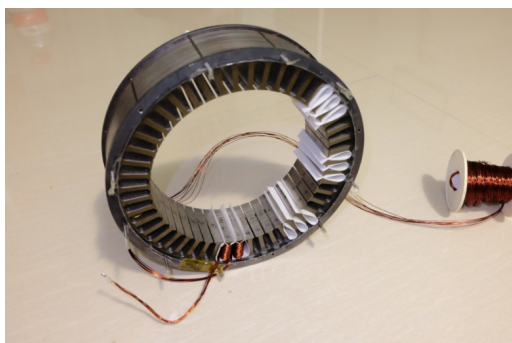
3.4 Permanentní magnety

Vzhledem k povaze použití BLDC strojů především v aplikacích s požadavkem na vysoký výkon při velmi nízké hmotnosti a celkových rozměrech, je nutné používat co možná nejsilnější magnety. Z tohoto důvodu jsou v BLDC strojích téměř výhradně používány magnety na bázi vzácných zemin. Permanentní magnety na bázi FeNdB (někdy též NdFeB), obsahují prvky vzácných zemin neodým (Nd), dysprosium (Dy), příp. praseodym (Pr). Tyto magnety dosahují vysoké hodnoty remanentní indukce okolo 1,2 T. [11] Nevýhodou těchto magnetů je, že jsou poměrně křehké, na což je třeba dávat pozor při manipulaci. Dalším problémem magnetů na bázi FeNdB je, že k jejich odmagnetování dochází při výrazně nižších teplotách (v některých případech už nad 80 °C) než například u feritových permanentních magnetů. Dalším problémem je náchylnost magnetů na bázi FeNdB ke korozi. Proto jsou tyto magnety ve většině případů již dodávány s povrchovou úpravou. Poslední nevýhodou je pak vyšší cena oproti klasickým magnetům. [8], [21], [22]

3.5 Izolační podsystem BLDC strojů

Dalším důležitým podsystemem BLDC strojů je podsystem izolační. Jeho úkolem je oddělit části stroje s rozdílným potenciálem. V BLDC stroji je možno nalézt více druhů izolací. První izolací je, jak již bylo uvedeno výše, vzájemná izolace jednotlivých plechů statoru stroje. Tímto tématem jsem se již zabýval v kapitole 3.1 této práce. Druhou izolací, kterou lze nalézt v BLDC stroji, je izolace vodičů. S ohledem na použití BLDC strojů je v drtivé většině používána pro konstrukci BLDC strojů izolace vodičů izolačním lakem. Typ lakování a jeho teplotní odolnost závisí na požadovaných výsledných vlastnostech konstruovaného stroje. Dráty jsou rozděleny podle tříd teplotní odolnosti, průrazného napětí izolace a odolnosti vůči teplotním šokům. [25] Při vystavení izolace příliš vysokým teplotám dochází k degradaci izolace a výraznému zkracování její životnosti. [8], [26], [27]. Vzhledem k tomu, že neodýmové magnety, používané v BLDC strojích, jsou velmi náchylné na vysokou teplotu, je nutné udržovat pracovní teplotu stroje nízkou. Na izolaci BLDC strojů nejsou díky tomu kladeny nijak extrémní nároky.

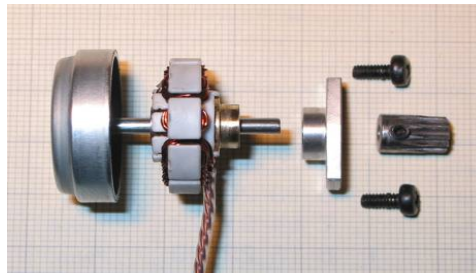
Materiály používané pro lakování drátů jsou například roztoky polymerů, polyuretanů nebo polyimidů. Laky jsou nanášeny na speciálních lakovacích linkách a případně vypalovány při teplotách 300 až 600 °C. Aby bylo dosaženo hladkého, souměrného a neporézního povlaku, opakuje se proces nanášení a vypálení laku vícekrát. Obvykle tvoří hmotnost lakového filmu asi 10 % hmotnosti výsledného produktu. [25], [28] Poslední izolací v BLDC motoru je izolace drážková. Tato izolace napomáhá předejít poškození izolace vodičů o stěny drážek při navíjení, a tím případnému mezizávitovému zkratu. Tloušťka drážkové izolace ovlivňuje rozměry a hmotnost stroje. Drážková izolace musí splňovat požadované mechanické, elektrické a tepelné vlastnosti a dále musí umožňovat případnou automatizaci při navíjení. Jako drážkové izolace se obvykle používají papír, drážkové lepenky, vícevrstvé ohybné materiály, Nomex® a různé kombinace těchto materiálů. Jak již bylo uvedeno, vzhledem k tomu, že BLDC stroje pracují obvykle při poměrně nízkých napětích a pracovních teplotách, nejsou ani na drážkovou izolaci v BLDC strojích obvykle kladeny žádné extrémní nároky. [18], [19], [26], [27]



Obr. 9: Drážková izolace BLDC stroje (upraveno z [20])

3.6 Konstrukční podsystém BLDC strojů

Dalšími nezbytnými částmi BLDC strojů jsou konstrukční součásti jako je hřídel, ložiska a štíty nebo úchyty pro upevnění stroje. Tyto součásti jsou závislé na konstrukčním řešení konkrétního stroje. Na obrázku (Obr. 10) je pro lepší představu ukázáno řešení konstrukce hřídele a ložisek na malém BLDC motorku z CD mechaniky.



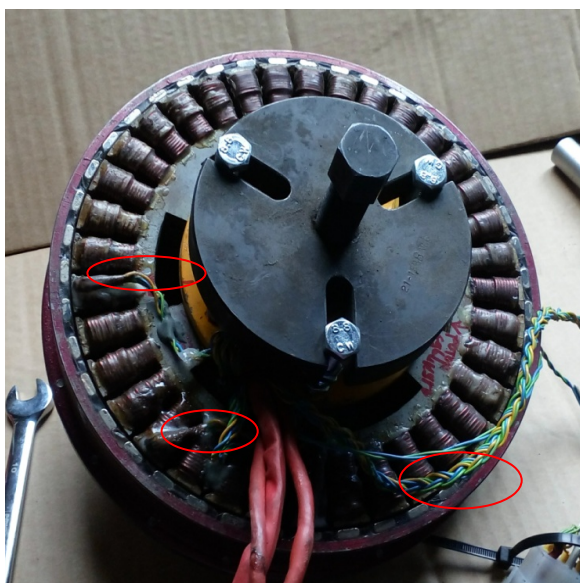
Obr. 10: Konstrukce BLDC motorku (Převzato z [29])

Hřídel je obvykle vyrobena z konstrukční oceli (například 11 500). [30] Požadovanými vlastnostmi materiálu, použitého pro výrobu hřídele, je dostatečná pevnost v krutu, nízký průhyb, dobrá obrobitelnost, korozivzdornost a nízká cena. Výkovek se obvykle na požadovaný tvar hřídele upravuje pomocí soustružení. Při extrémních požadavcích na nízkou hmotnost stroje je možno hřídel vyrobit například ze slitin hliníku nebo použít kompozitových materiálů. Hřídel může být v závislosti na aplikaci stroje ukončena pomocí závitu, spojem pero-drážka, ozubeným tisícíhranem, kuzelem nebo jiným tvarem. Vzhledem k velkému rozsahu výkonů BLDC strojů a rozličnému použití je velké množství variant. U strojů s oběžným rotorem se velmi často setkáme také s případem, kde hřídel není vyvedena vůbec a jako hřídel slouží celý oběžný rotor.

3.7 Senzory BLDC strojů

U BLDC strojů, kde je vyžadován moment již od nulových otáček stroje je nutno znát pro vhodné řízení stroje přesnou polohu rotoru. K určení polohy rotoru BLDC stroje, která je důležitá pro správné řízení, slouží nejčastěji Hallovy senzory. Pro správnou informaci o poloze rotoru jsou potřeba minimálně 3 kusy Hallových senzorů. Tyto senzory jsou obvykle umístěny po 60° nebo 120° elektrických, protože s těmito hodnotami pracuje

většina komerčně dostupných kontrolérů. U některých strojů se můžeme setkat i s vyšším počtem Hallových senzorů (zdvojení, ztrojení...), což je dáno vyššími nároky na spolehlivost stroje. Na obrázku (Obr. 11) je vyznačeno umístění Hallových senzorů na statoru 18 kW BLDC motoru, který byl původně navržen pro bezsenzorové řízení a následně upraven pro řízení senzorové.



Obr. 11: Umístění Hallových sond na statoru BLDC stroje

U vyšších řad BLDC strojů je možno nalézt ve statorovém vinutí zabudovaný jeden nebo více termistorů sloužících ke kontrole teploty uvnitř vinutí. Při překročení požadované teploty je pak kontrolér BLDC stroje schopen omezit, popřípadě úplně vypnout, proud do vinutí tak, aby nedocházelo k přílišnému oteplení a tím degradaci izolace a poškození magnetů. Termistory jsou používány například KTY84-130 nebo KTY 83/122. [31]

4 Funkční vzorek BLDC stroje s oběžným rotorem

Hlavním zaměřením této práce je teoretické i praktické ověření a zkonstruování BLDC stroje s oběžným rotorem o výkonu 2,5 kW pro napájení z baterie 72 V s rotorem s Halbachovým polem, který navíc bude vyroben z pro rotor motoru neobvyklého materiálu - plastu. Zároveň bude tento experimentální motor průběžně porovnáván se shodným motorem u kterého bude využita klasická konstrukce rotoru. Díky tomu bude možno zjistit a porovnat výhody a nevýhody ojedinělé plastové konstrukce rotoru. Celý proces je směřován tak, aby konstrukce stroje byla co nejméně náročná na obtížnost výroby, motor byl robustní, vysoce přetížitelný a vyrobený za pomoci materiálů s co nejvyšší kvalitou. Zároveň však musí být výsledný motor cenově přijatelný a musí být možno využít standardně dostupné komponenty pro dosažení nejnižší možné ceny. Reálný stroj by se měl ideálně svými vlastnostmi přiblížit ke komerčně dostupným strojům s obdobnými parametry.

Pro motor budou vyrobeny dvě vzájemně záměnné varianty rotorů. První varianta bude rotor s permanentními magnety klasické konstrukce. Druhá varianta bude rotor vytvořený za pomoci 3D tisku z plastu, kde budou permanentní magnety uspořádány do tvaru Halbachova pole. Celý průběh vývoje funkčního vzorku je zároveň podpořen využíváním simulací pro ověřování správnosti postupu a co nejlepší odhad parametrů a chování stroje. Elektromagnetický návrh byl proveden standardním postupem na základě kombinace běžně používané literatury pro stavbu elektrických strojů [16], [18], [71], [72] a průběžného ověřování parametrů pomocí FEM modelování. Vzhledem ke standardnímu průběhu není elektromagnetický návrh součástí této práce, jelikož by výrazně zvýšil délku práce a není tudíž cílem této práce. Všechny podstatné parametry funkčního vzorku jsou uvedeny v následující kapitole.

4.1 Základní parametry funkčního vzorku

Jak již bylo uvedeno, reálný funkční vzorek motoru by se měl svými vlastnostmi blížit vlastnostem komerčně dostupných strojů s obdobným výkonem. BLDC motory o výkonu v řádu jednotek kilowattů nacházejí uplatnění zejména jako pohon elektrických skútrů, motokár či miniautomobilů. U tohoto použití se využívá strojů s otáčkami okolo

3000 ot./min. Další velmi důležitou skupinou, využívající BLDC motory, jsou stroje, které využívají k pohonu vrtuli, jako například modely letadel či dronů. V této kategorii jsou pro nejmenší modely do 1 kg hmotnosti využívány motory o menším výkonu v řádu stovek wattů, které jsou provozovány s výrazně vyššími otáčkami, například okolo 10000 ot./min.. Naopak pro pohon skutečných letadel či kluzáků jsou využívány motory o výkonech v řádu desítek kilowattů. U těchto strojů již maximální otáčky motorů opět klesají na hodnoty kolem 3000 ot./min. Mnou navržený BLDC motor o výkonu 2,5 kW a jmenovitými otáčkami naprázdno 3150 ot./min. s oběžnou konstrukcí by mohl v praxi nalézt uplatnění jako pohon velkého zemědělského dronu či velmi velkého modelu letadla do cca 15 kg. Pro výrobu funkčního vzorku jsem zvolil po dohodě s vedoucím práce motor s oběžnou konstrukcí. Volba rotoru s oběžnou konstrukcí vznikla z důvodu častého využití strojů tohoto typu v již zmíněných leteckých aplikacích, kde by se mohl stroj s plastovým rotorem velmi dobře uplatnit, vzhledem k tomu, že od plastového rotoru očekávám výrazné snížení hmotnosti stroje. Tento parametr je velmi důležitý zejména v případě využití u vícemotorových dronů.

Stroj obdobného výkonu s oběžnou konstrukcí rotou na trhu v současné době chybí. Jako komerčně dostupný stroj s obdobnými parametry pro porovnání s mnou navrženým strojem lze použít například BLDC motor klasické konstrukce značky Volcanomotor typ VOL-BL300B72 [73]. Tento motor o výkonu 3 kW pro napájecí napětí 72 V dosahuje 3000 ot./min., jmenovitého točivého momentu 9,55 Nm a účinnosti 89 %. Podrobnější informace lze nalézt na stránkách výrobce [73].



Obr. 12: BLDC motor Volcanomotor typ VOL-BL300B72 (převzato z [73])

Po poradě s vedoucím práce a důkladném zvážení možností, jak otestovat výsledný funkční vzorek BLDC motoru, bylo přihlédnuto k reálné pevnosti plastového rotoru. Plastový rotor by pravděpodobně nebyl schopen přenést extrémně vysoký točivý moment, ale je klíčový pro otestování vlastností stroje s magnety uspořádanými do Halbachova pole. Naopak stroj s plastovým rotorem se jeví velmi vhodný díky své nižší hmotnosti pro, již zmíněné, použití v leteckém průmyslu. Parametry stroje proto budou otestovány při měření pomocí zátěže realizované leteckou vrtulí.

Stroj bude zkonstruován s 18 statorovými póly a 24 magnety na rotoru. Tuto kombinaci jsem zvolil, protože vede na jednoduchý formát vinutí **ABCABC**, který je možno velmi snadno navinout. Konfigurace odpovídá faktoru vinutí 0,86603 a na jednu mechanickou otáčku bude mít rotor 72 stabilních poloh. Výsledné parametry reálného stroje, které vycházejí z elektromagnetického návrhu a FEM simulací jsou shrnuty v následujících tabulkách.

V následující tabulce (Tab. 2) jsou shrnuty základní parametry BLDC motoru ve verzi s klasickým rotorem. Kromě štítkových hodnot stroje jsou uvedeny i další důležité parametry získané pomocí výpočtů a simulací.

Základní parametry BLDC motoru s klasickým rotorem	
Jmenovité napájecí napětí	72 V
Jmenovitý výkon	2,5 kW
Maximální výkon (1 minuta)	5 kW
Otáčky naprázdno	3150 ot./min.
Točivý moment	7,6 Nm
Účinnost	94,2 %
Účíník	0,96
Proudová hustota ve vodiči	5,05 A/mm ²
Ztráty ve vinutí	18,2 W
Ztráty v železe	124,4 W
Ztráty v permanentních magnetech	5,9 W
Řízení	senzorové
Rychlostní konstanta K_v	43,1 (ot./min.)/V

Momentová konstanta K_M	0,36 Nm/A
Konstanta indukovaného napětí K_e	0,022 V/(ot./min.)

Tab. 2 Základní parametry funkčního vzorku stroje s klasickým rotorem

Další tabulka (Tab. 3) popisuje základní rozměry statoru a použitý materiál pro jeho konstrukci. Dále jsou uvedeny rozměry použité drážky a popsáno vinutí statoru. Jak již bylo uvedeno, cílem je otestování dvou rozdílných verzí rotorů v reálných měřeních, ke kterému bude sloužit stále stejný stator. Tím bude zajištěna maximální výpovědní schopnost měření a porovnání obou typů rotorů.

Stator BLDC stroje pro oba rotory	
Vnější průměr statoru	139 mm
Vnitřní vrtání statoru	56 mm
Délka plechového svazku	40 mm
Tloušťka statorového plechu	0,35 mm
Typ statorového plechu	M270-35A
Činitel plnění železa	0,96
Počet drážek statoru	18
Essoňův činitel	5439,33 VA/m ³ ot.
Drážky statoru	
Geometrie drážek	rovnoběžné stěny zubů
Výška můstku	2 mm
Šířka můstku	2 mm
Hloubka drážky	26 mm
Šířka zubu	10 mm
Zkosení pólového nástavce	45°
Rádus na dně drážky	1 mm
Rádus na vrcholu drážky	1 mm
Tloušťka drážkové izolace	0,6 mm
Vinutí statoru	
Počet závitů na jednom pólu	29
Průřez vodiče	0,3117 mm ² a 0,3526 mm ²

Průměr vodičů (2 vodiče paralelně)	0,63 mm a 0,67 mm
Celkový průřez jedné fáze	3,9858 mm ²
Odpor jedné fáze vinutí při 20°C	0,015 Ω
Činitel plnění drážky	0,21
Sled fází	ABCABCABC
Typ vinutí	Dvouvrstvé koncentrické
Činitel vinutí	0,86603
Zapojení vinutí	Trojúhelník – paralelní spojení pólů jednotlivých fází pomocí měděných kruhů

Tab. 3 Parametry statoru stroje

V následující tabulce (Tab. 4) jsou uvedeny parametry, definující rotor klasické konstrukce. Materiál jha rotoru je konstrukční feromagnetická ocel 11 500 a použité magnety jsou na rotor přilepeny pomocí lepidla na bázi epoxidové pryskyřice.

Rotor klasický	
Velikost vzduchové mezery	1 mm
Indukce ve vzduchové mezeře	0,9 T
Počet magnetů na rotoru	24
Vnější průměr rotoru	151 mm
Vnitřní průměr rotoru	141 mm
Tloušťka jha rotoru	5 mm
Materiál jha rotoru	ocel 11 500
Délka magnetu	40 mm
Šířka magnetu	15 mm
Výška magnetu	5 mm
Materiál magnetu	NdBF _e , N42

Tab. 4 Parametry rotoru klasické konstrukce

Následující tabulka (Tab. 5) shrnuje vlastnosti rotoru, ve kterém jsou magnety uspořádány tak, aby tvořily Halbachovo pole. Materiál jha rotoru je plast. Velikost vzduchové mezery mezi magnety rotoru a statorem byla zvětšena o 0,5 mm z důvodu použití speciální konstrukce rotorové klece, která fixuje magnety na svém místě bez

použití lepidla. Materiál rotorové klece je rovněž plast. Na magnetické pole ve vzduchové mezeře tudíž nemá vliv. Z důvodu zvětšení vzduchové mezery a využití neferomagnetického materiálu na jeho rotoru došlo k poklesu magnetické indukce ve vzduchové mezeře na hodnotu 0,86 T. Stroj s Halbachovým polem je podrobněji popsán v následujících kapitolách práce.

Rotor Halbach	
Velikost vzduchové mezery	1,5 mm
Indukce ve vzduchové mezeře	0,86 T
Počet magnetů na rotoru	48
Vnější průměr rotoru	169 mm
Vnitřní průměr rotoru	142 mm
Tloušťka jha rotoru	10 mm
Materiál jha rotoru	PLA nebo PETG
Délka magnetu 1	40 mm
Šířka magnetu 1	10 mm
Výška magnetu 1	5 mm
Materiál magnetu 1	NdBF _e , N42
Délka magnetu 2	40 mm
Šířka magnetu 2	6 mm
Výška magnetu 2	8 mm
Materiál magnetu 2	NdBF _e , N42

Tab. 5 Parametry rotoru s Halbachovým polem

Základní parametry BLDC motoru s Halbachovým uspořádáním magnetů jsou uvedeny v tabulce (Tab. 6). Oproti vlastnostem stroje s klasickým rotorem (Tab. 2) si lze povšimnout, že došlo ke snížení ztrát ve stroji, a tudíž k zlepšení účinnosti stroje. Vzhledem k nižší indukci ve vzduchové mezeře je však zapotřebí vyššího proudu ve vinutí statoru k dosažení stejného točivého momentu stroje. Rozdíl ve vlastnostech obou variant rotorů je velmi dobře patrný při porovnání konstant K_v , K_m a K_e pro obě varianty rotorů.

Parametry motoru s Halbachovým uspořádáním magnetů	
Jmenovité napájecí napětí	72 V
Jmenovitý výkon	2,5 kW
Maximální výkon (1 minuta)	5 kW
Otáčky naprázdno	3150 ot./min.
Točivý moment	7,6 Nm
Účinnost	95,4 %
Účíník	0,94
Proudová hustota ve vodiči	6,3 A/mm ²
Ztráty ve vinutí	28,3 W
Ztráty v železe	92,1 W
Ztráty v permanentních magnetech	1,6 W
Řízení	senzorové
Rychlostní konstanta K_v	52,3 (ot./min.)/V
Momentová konstanta K_M	0,31 Nm/A
Konstanta indukovaného napětí K_e	0,019 V/(ot./min.)

Tab. 6 Základní parametry funkčního vzorku stroje s Halbachovým uspořádáním magnetů

Následující tabulka (Tab. 7) uvádí parametry použitých permanentních magnetů. Pro funkční vzorky byly použity magnety s teplotní odolností pouze 80 °C vzhledem k jejich lepší dostupnosti a nižší ceně. Pro motor určený do reálných aplikací by bylo výhodnější použít magnety s vyšší teplotní třídou odolnosti například 150 °C – třída magnetů SH.

Parametry permanentních magnetů	
Koercivita magnetů	1015 kA/m
Remanentní indukce při 20°C	1,35 T
Teplotní pokles remanence	-0,12 %/°C
Teplotní pokles koercivity	-0,535 %/°C
Relativní permeabilita	1,059
Teplotní třída	80 °C
Hustota	7500 kg/m ³

Tab. 7 Parametry permanentních magnetů

5 Simulace BLDC stroje, popis programu, základní parametry

Pro simulace v této dizertační práci byl použit volně dostupný simulační software pro motory s permanentními magnety MotorAnalysis-PM.

5.1 Představení programu MotorAnalysis-PM

MotorAnalysis-PM je volně dostupný software pro simulování vlastností strojů s permanentními magnety včetně BLDC motorů a generátorů, PMSM motorů a generátorů. MotorAnalysis-PM je založen na automatizované metodě konečných prvků (FEM). Program nabízí kompletní sadu nástrojů pro design a analýzu strojů s permanentními magnety. Software MotorAnalysis-PM je dostupný jako aplikace běžící na základu programu MATLAB nebo jako samostatná aplikace fungující bez prostředí MATLAB. [34]

Program poskytuje následující možnosti vytvoření prototypů motoru:

- *import geometrie statoru a rotoru ve formátu DXF*
- *automaticky vytvořené nebo manuální rozložení vinutí*
- *různé metody pro správné dimenzování drážkových vodičů*
- *knihovnu předdefinovaných materiálů a možnost importu vlastních materiálů*
- *varianty řízení pomocí sinusového průběhu či šestikrokové komutace*
- *řešení rotorů se šikmými drážkami*
- *topologie s klasickým či oběžným rotorem*

5.2 Metody analýzy v programu MotorAnalysis

Magnetostatická analýza

Pomocí magnetostatické analýzy je možno vytvářet simulace za pomoci sinusového nebo obdélníkového napájecího proudu v závislosti na čase. Například lze vypočítat napětí, výkon, EMF, moment, účinník, účinnost a ztráty. Dále pak je možno graficky zobrazit průběh magnetického toku ve vzduchové mezeře včetně grafických animací.

Statická a dynamická D-Q analýza

Statická analýza je založená na modelu v osách d-q. Ve statické analýze d-q je bráno v potaz nasycení magnetického obvodu. Ze simulací lze získat ustálené výkonové charakteristiky a mapy účinnosti. Pro vytvoření modelu d-q jsou využívány níže uvedené rovnice.

Rovnice spřaženého magnetického toku Ψ_d, Ψ_q :

$$\Psi_d = \Psi_{md} + L_d I_d + L_{dq} I_q ,$$

$$\Psi_q = \Psi_{mqd} + L_q I_q + L_{dq} I_d ,$$

kde Ψ_{md} je spřažený magnetický tok od permanentních magnetů v ose d. Ψ_{mqd} je spřažený magnetický tok od permanentních magnetů v ose q. L_d a I_d jsou indukčnost a proud v ose d, L_q a I_q jsou indukčnost a proud ose q, L_{dq} je vzájemná indukčnost.

Rovnice pro napětí U_d, U_q :

$$U_d = R_s I_d - \omega \Psi_q - \omega L_{sew} I_q ,$$

$$U_q = R_s I_q - \omega \Psi_d - \omega L_{sew} I_d ,$$

kde R_s je odpor fáze vinutí na statoru. L_{sew} je indukčnost vinutí statoru a ω je úhlová rychlost stroje.

Rovnice pro točivý moment M , kde p značí počet pólových dvojic:

$$M = \frac{3}{2} p (\Psi_d I_q - \Psi_q I_d) .$$

Dynamická FEM analýza

Dynamická analýza je nejpropracovanější, nejpřesnější a také výpočtově nejnáročnější ze všech metod analýzy. Zakládá se na dynamických simulacích v přechodných stavech metodou konečných prvků. Umožňuje simulace napájecích zdrojů proudu nebo napětí včetně napájení z měniče s PWM.

5.3 Popis matematického modelu

Problémy v magnetickém poli jsou v programu MotorAnalysis řešeny užitím dvoudimenzionální aproximace, která je založena na předpokladu, že magnetické pole je neměnné v ose Z. Za osu Z je brána osa, která je rovnoběžná s osou rotoru. Magnetické pole je proto řešeno pouze v osách X a Y. Proudová hustota a magnetický vektorový potenciál mají v dvoudimenzionálních problémech pouze složku Z a mohou být proto vyjádřeny dle [34] takto

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu_0 \mu_r} \cdot \nabla \times A \right) = J ,$$

$$J = \gamma \cdot \frac{U}{l} - \gamma \cdot \frac{\partial A}{\partial t} ,$$

kde A je magnetický vektorový potenciál, B značí magnetickou indukci, $B = \nabla \times A$ nebo také $B = \text{rot } A$, dále μ_0 je permeabilita vakua a μ_r je relativní permeabilita, J zastupuje proudovou hustotu, σ značí elektrickou vodivost, dále U je elektrické napětí a l značí délku v ose Z.

Program MotorAnalysis nabízí dvě metody řešení problému definovaného výše uvedenými rovnicemi. První možnou metodou řešení je metoda konečných prvků (FEM), která je využívána při řešení pomocí magnetostatické analýzy. Pro FEM analýzu je proudová hustota brána jako nezávislá na čase, a je tudíž možné k definování magnetostatického problému využít pouze první z výše uvedených rovnic. Magnetostatická analýza může být využívána pouze pro řešení v ustáleném stavu. [34]

Druhá metoda řešení používaná v programu MotorAnalysis se nazývá tranzientní metoda konečných prvků a je využívána pro dynamickou analýzu řešeného problému. Ze druhé z výše uvedených rovnic vyplývá, že proudová hustota se skládá ze dvou složek. První složka je způsobena přivedeným napájecím napětím U a druhá složka je zapříčiněna magnetickou indukcí od proměnného magnetického pole ve stroji. Z toho vyplývá, že v tranzientní FEM analýze je derivace magnetického vektorového potenciálu reprezentována pomocí rovnice

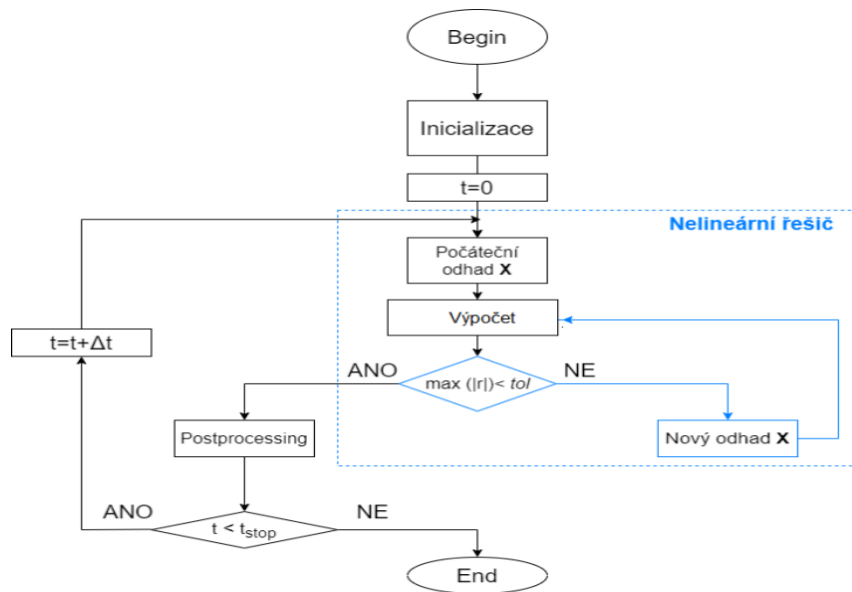
$$\frac{\partial A}{\partial t} = \frac{A_n - A_{n-1}}{\Delta t},$$

kde Δt zastupuje časový úsek a A_n, A_{n-1} zastupují magnetický vektorový potenciál v časech n a $n-1$.

Stanovením počátečních podmínek magnetického vektorového potenciálu za pomoci FEM a při předpokladu nulového proudu ve vinutí statoru lze stanovit magnetický vektorový potenciál v jakémkoli čase. Pomocí této metody je možné brát v úvahu vířivé proudy, nelinearitu magnetického obvodu a rychlost otáčení rotoru. [34]

Pro magnetostatickou analýzu FEM je magnetický vektorový potenciál neznámá v každém bodě výpočetní sítě. V případě tranzientní analýzy jsou do vektoru neznámých zahrnuty také hodnoty statorových proudů a napětí. [34]

Na obrázku (Obr. 13) je zobrazen použitý algoritmus řešení. Po inicializaci problému je problém řešen v čase $t = 0$ se zadanými počátečními podmínkami. V nelineárním řešiči je poté testováno, zda je počáteční odhad dostatečně přesný. V případě že ne, řešení se pro daný časový krok opakuje. Pokud ano, hodnota je postoupena do postprocessingu a dále je testováno, zda již bylo řešení provedeno pro všechny požadované časové kroky. Následně dochází k výpočtu dalšího časového kroku a tento průběh je opakován tak dlouho, dokud není známo řešení pro celý požadovaný časový úsek. Poté je řešení ukončeno. [34]



Obr. 13: Zobecněný algoritmus řešení nelineárního problému pomocí FEM

Pro řešení problémů s nelineární B-H charakteristikou využívá program MotorAnalysis Gauss-Newtonovu metodu. Řešič, používající Gauss-Newtonovu metodu, považuje problém za vyřešený, pokud je splněna podmínka

$$\max(|r|) < tol ,$$

kde tol znamená tolerance, definující požadovanou přesnost řešení.

Iterace Gauss-Newtonovou metodou pokračují, dokud není splněna podmínka velikosti maximální dovolené odchylky. Tato odchylka byla nastavena na 0,001 neboli jednu tisícinu. Maximální počet opakování iterací Gauss-Newtonova algoritmu byl nastaven na čtyřicet. V případě překročení počtu iterací se program automaticky zeptá, zda chcete pokračovat či výpočet přerušit.

Použití okrajových podmínek v programu MotorAnalysis je popsáno v dokumentaci, která je k programu k dispozici. Použité okrajové podmínky se liší v případě rozdělení magnetického obvodu stroje na více elementů se stejným magnetickým potenciálem. [34] Počet periodicky opakujících se částí magnetického obvodu se stejným potenciálem je v programu nazýván jako faktor periodicity. V praxi je faktor periodicity obvykle rovný počtu pólů. Použití okrajových podmínek pro magnetický potenciál bohužel není

v poskytnuté dokumentaci více konkretizováno. S největší pravděpodobností se však jedná o kombinaci nejběžněji používaných podmínek pro magnetický vektorový potenciál, to znamená Dirichletovy a Neumannovy okrajové podmínky pro magnetický potenciál. [34]

Dirichletova okrajová podmínka pro magnetický potenciál říká, že hodnota magnetického vektorového potenciálu je rovna známé funkci f

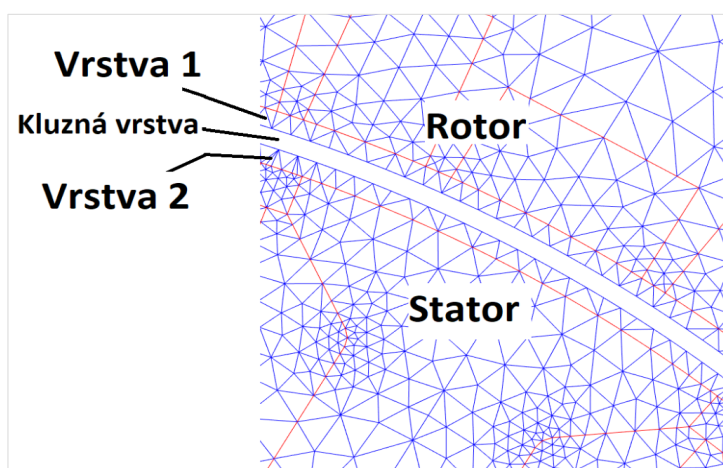
$$A = f ,$$

Neumannova okrajová podmínka udává, že derivace magnetického potenciálu je rovná funkci g

$$\frac{1}{\mu_0 \mu_r} \cdot \frac{\partial A}{\partial x} = g .$$

5.4 Síť pro metodu konečných prvků

Program MotorAnalysis používá pro řešení jednoduchou trojúhelníkovou síť. Tato síť musí být znovu vytvořena pokaždé, když v simulaci dojde ke změně polohy rotoru. Toho je dosaženo pomocí rotace výpočetní sítě na rotoru. Ta je spojena s pevnou sítí statoru přes kluznou vrstvu sítě, která je umístěna ve vzduchové mezeře. Počet vrstev ve vzduchové mezeře je v programu MotorAnalysis vždy lichý (3, 5, 7 nebo 9 vrstev). Tím je zajištěno, že kluzná vrstva výpočetní sítě je vždy ta, která je umístěna ve středu vzduchové mezery. Tento princip je zobrazen na obrázku (Obr. 14). [34]



Obr. 14: Výpočetní síť stroje se třemi vrstvami ve vzduchové mezeře – kluzná vrstva uprostřed

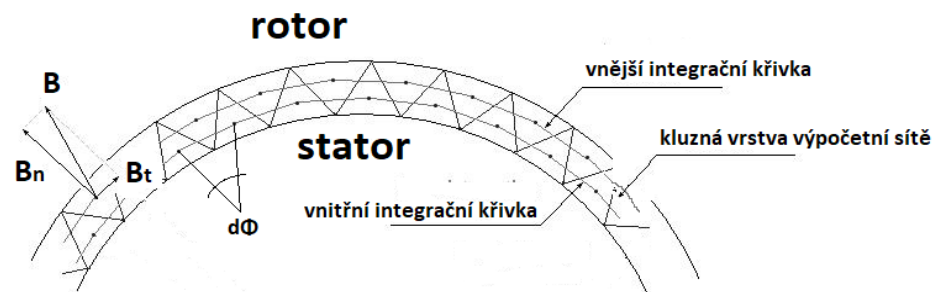
5.5 Výpočet momentu v programu MotorAnalysis

Program MotorAnalysis využívá k výpočtu momentu dvě metody. Maxwellův tensor pnutí a metodu celkové práce. Pro výpočet radiální síly mezi státorem a rotorem je využívána metoda celkové virtuální práce. [34] Podle metody Maxwellova tenzoru pnutí může být moment vyjádřený jako

$$M = \frac{l \cdot (D_r + l_\delta)^2}{4 \cdot \mu_0} \int_0^{2\pi} B_n B_t d\Phi ,$$

kde M je kroutící moment, l znamená délku laminace statoru, D_r je průměr rotoru, l_δ zastupuje velikost vzduchové mezery, μ_0 je permeabilita vakua a B_n a B_t zastupují normálovou a tečnou složku magnetické indukce ve vzduchové mezeře.

Křivka integrace se vždy nachází uvnitř kluzné vrstvy vzduchové mezery, jak je to zobrazeno na obrázku (Obr. 15).



Obr. 15: Kluzná vrstva vzduchové mezery v modelu

Na obrázku je ukázána pouze kluzná vrstva sítě ve vzduchové mezeře. Jsou použity dvě integrační křivky – vnější a vnitřní. Vnitřní křivka prochází středem trojúhelníků směřujících od středu stroje a vnější křivka prochází středy trojúhelníků směřujících dovnitř. V těchto bodech je vypočítán kroutící moment a jejich zprůměrováním je získána výsledná hodnota momentu.

Podle principu virtuální práce je dána elektromagnetická síla změnou energie vzhledem k virtuálnímu posuvu. Celkový magnetický tok zůstává konstantní. Toto je vyjádřeno rovnicí

$$F_u = -\left(\frac{\partial W}{\partial e}\right) \quad \text{pro } \Psi = \text{konst.} . .$$

Vyjádření pro výpočet kroutícího momentu je obdobné, jen namísto posuvu je uvažováno virtuální pootočení

$$M = -\left(\frac{\partial W}{\partial \phi}\right) \quad \text{pro } \Psi = \text{konst.} . .$$

Pro přesnost principu virtuální práce je klíčová správná volba hodnoty virtuálního posuvu. Na jednu stranu musí tato hodnota být dostatečně malá, aby byla zachována celistvost trojúhelníkové sítě. Na druhou stranu chyba způsobená zaokrouhlením narůstá, pokud je posuv příliš velký.

Metoda virtuální práce poskytuje přesnější výsledky v porovnání s metodou Maxwellova tenzoru pnutí, protože předpokládá integraci v celém průřezu stroje. Oproti tomu metoda Maxwellova tenzoru pnutí zahrnuje pouze elementy sítě ve vzduchové mezeře. [34]

5.6 Výpočet ztrát v železe v programu MotorAnalysis

Výpočet ztrát v železe probíhá v programu MotorAnalysis v postprocesingu, to znamená, že je předpokládáno, že ztráty v železe neovlivňují rozložení magnetického pole. [34] Výpočet ztrát v železe je založen na Steinmetzově vztahu

$$P_{fe} = P_H + P_v = k_h f^\alpha B_m^\beta + k_e (f \cdot B_m)^2 ,$$

kde P_H jsou hysterezní ztráty, P_v jsou ztráty vířivými proudy, k_h , k_e , β jsou materiálové koeficienty pro různé frekvence, které ovlivňuje například tloušťka plechu, vodivost a další vlastnosti materiálu, které poskytuje obvykle výrobce materiálu.

5.7 Výpočet Jouleových ztrát v programu MotorAnalysis

Jouleovy ztráty ve vinutí elektrického stroje jsou počítány z proudové hustoty ve vinutí a elektrické vodivosti materiálu vinutí

$$P_j = \frac{|J|^2}{\gamma}$$

5.8 Základní parametry simulace

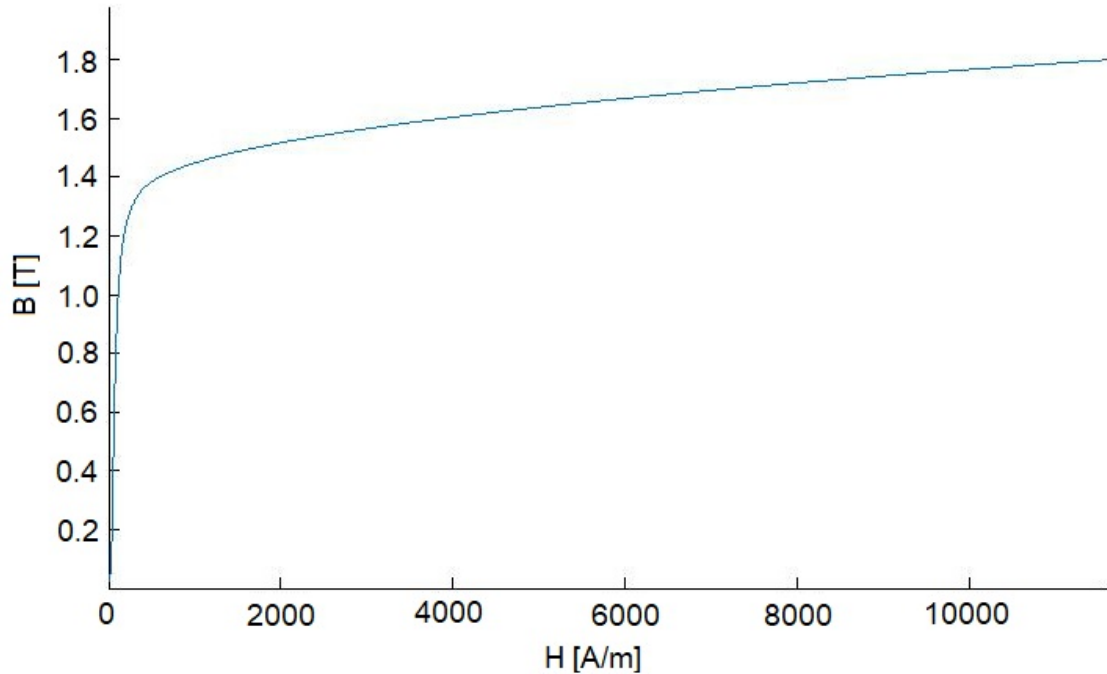
Simulováno je napájení za pomoci obdélníkového průběhu s šestikrokovou komutací. Hallovy senzory jsou umístěny po 120°. Napájecí napětí je DC 72 V, vzorkovací frekvence PWM je 16 kHz. Úhel komutace byl pro simulaci zvolen 0°. Zapojení vinutí je do trojúhelníku. Základní parametry simulace jsou shrnuty v tabulce (Tab. 8).

Napájecí napětí DC	72 V DC
Tvar napájecího proudu	obdélník
Druh komutace	Six step
Otáčky	3150 ot./min.
RMS fázový proud	20 A
Úhel komutace	0°
Frekvence PWM	16000 Hz
Úhel Hallových senzorů	120°
Zapojení vinutí	trojúhelník
Materiál statoru	M270-35A
Materiál rotoru	ocel 11 500
Materiál permanentních magnetů	NdFe, N42

Tab. 8: Základní parametry pro simulace

Velice podstatný vliv na přesnost simulace má správná volba materiálů jednotlivých součástí motoru, zejména pak statoru, ve kterém se generuje převážná část ztrát v železe. Do simulace byl proto naimportován přesný tvar B-H charakteristiky materiálu M270-35A, použitého pro výrobu statoru. Na obrázku (Obr. 16) je znázorněna B-H

charakteristika použitého materiálu, která popisuje jeho sycení.



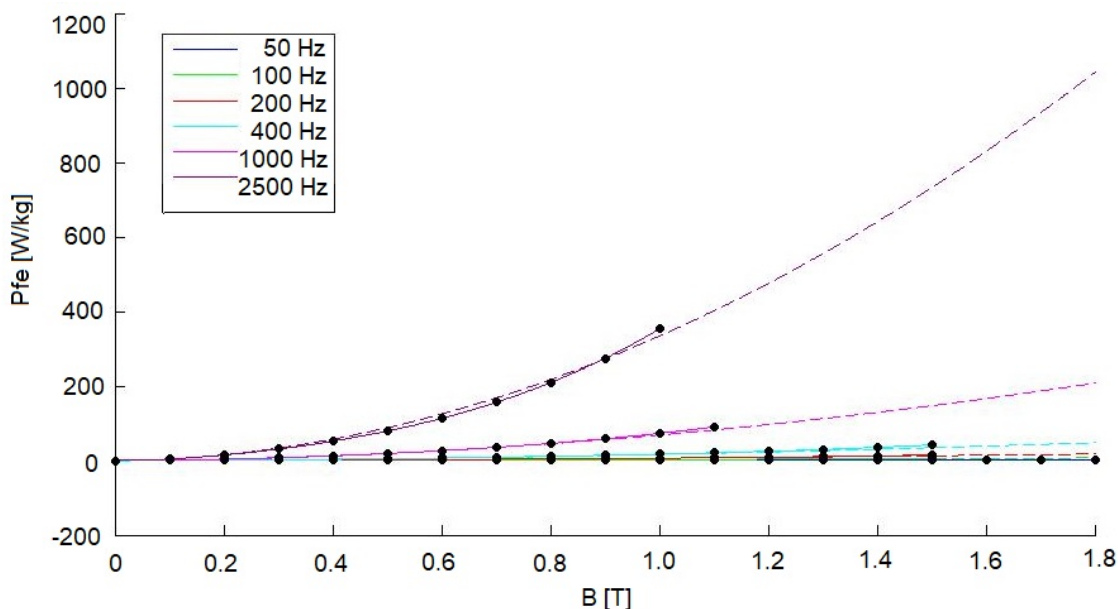
Obr. 16: B-H charakteristika materiálu M270-35A

Ztráty v železe jsou získány pomocí rovnice založené na Steinmetzově vztahu jako kombinace ztrát hysterezi a ztrát pro vířivé proudy. Rovnice byla uvedena v bodě 5.1.6. Tato rovnice obsahuje několik koeficientů, které jsou závislé na frekvenci a typu materiálu. Hodnoty koeficientů použité pro simulaci jsou uvedeny v tabulce (Tab. 9).

k_h	0,013089
a	1,1053
k_e	$4,1505e^{-05}$
b	1,6896

Tab. 9: Hodnoty koeficientů pro výpočet ztrát v železe pro materiál M270-35A

Graf (Obr. 17) znázorňuje závislost ztrát v železe P_{fe} na magnetické indukci B pro materiál statoru při frekvencích od 50 Hz do 2500 Hz. Čárkovaně jsou v grafu zobrazeny extrapolované aproximace průběhů pro vyšší hodnoty magnetické indukce. Z grafu jasně vyplývá, že k výraznému nárůstu ztrát dochází pro frekvenci 1000 Hz a výše.



Obr. 17: Průběh ztrát v železe v závislosti na indukci pro různé frekvence

6 Simulace stroje s kovovým rotorem

Pomocí softwaru s FEM byly nasimulovány různé varianty velikosti magnetů na rotoru pro variantu rotoru z kovu. Z chování stroje pak bude vybrána nejvhodnější varianta pro skutečnou konstrukci kovového rotoru. Simulace je vytvořena pomocí výše popsaného volně dostupného programu pro design elektrických strojů MotorAnalysis-PM.

6.1 Magnetostatická analýza stroje s rozdílnými šířkami magnetů

Cílem magnetostatické simulace je ověřit, jak se mění základní vlastnosti stroje v závislosti na šířce magnetů na rotoru tj. na procentu pokrytí povrchu rotoru permanentními magnety. Na základě získaných poznatků bude možno zvolit konečnou variantu pro konstrukci reálného funkčního vzorku stroje. Simulace byla provedena pro šířky magnetů 12, 14, 15, 16 a 18 mm, což odpovídá pokrytí povrchu rotoru mezi 67–97 %. Výsledky simulací jsou shrnuty v tabulce (Tab. 10).

Varianta	1	2	3	4	5
Šířka magnetů (mm)	12	14	15	16	18
Výška magnetů (mm)	5	5	5	5	5
Plocha pokrytí (%)	67	77	82	87	97
Zvlnění momentu (%)	58,4	58,1	57,2	64,9	60,5
Mechanický výkon (W)	2337	2495	2517	2538	2554
Účinnost stroje (%)	94,3	94,1	94,2	94,0	94,6
Chyba výpočetní sítě (%)	1,11	1,11	1,22	0,82	0,96

Tab. 10: Shrnutí základních vlastností jednotlivých variant rotorů

6.2 Shrnutí výsledků simulací s různými velikostmi magnetů na rotoru

Cílem simulace bylo určit ideální plochu magnetů na povrchu kovového rotoru. V literatuře se informace o ideální ploše pokryté magnety liší. Pro správné určení ideální plochy rotoru pokryté magnety je potřeba brát v úvahu i geometrii statoru. Z výše uvedených výsledků simulací bylo možno určit optimální variantu.

Varianta 1 s pokrytím rotoru 67 % vykazuje velké zvlnění točivého momentu 58,4 %. Pro výše uvedené parametry je výstupní mechanický výkon 2337 W a účinnost 94,3 %. Chyba způsobená diskretizací výpočetní sítě je 1,11 %.

Ve variantě 2 s šířkou magnetů 14 mm, která odpovídá pokrytí 77 % povrchu rotoru, došlo k mírnému snížení zvlnění točivého momentu.

Zvětšením šířky magnetů o 2 mm, ve variantě 3, se zvlnění momentu snížilo na 58,1 %. Mechanický výkon vzrostl na 2495 W a účinnost klesla na 94,1 %. Chyba způsobená diskretizací výpočetní sítě je 1,11 %.

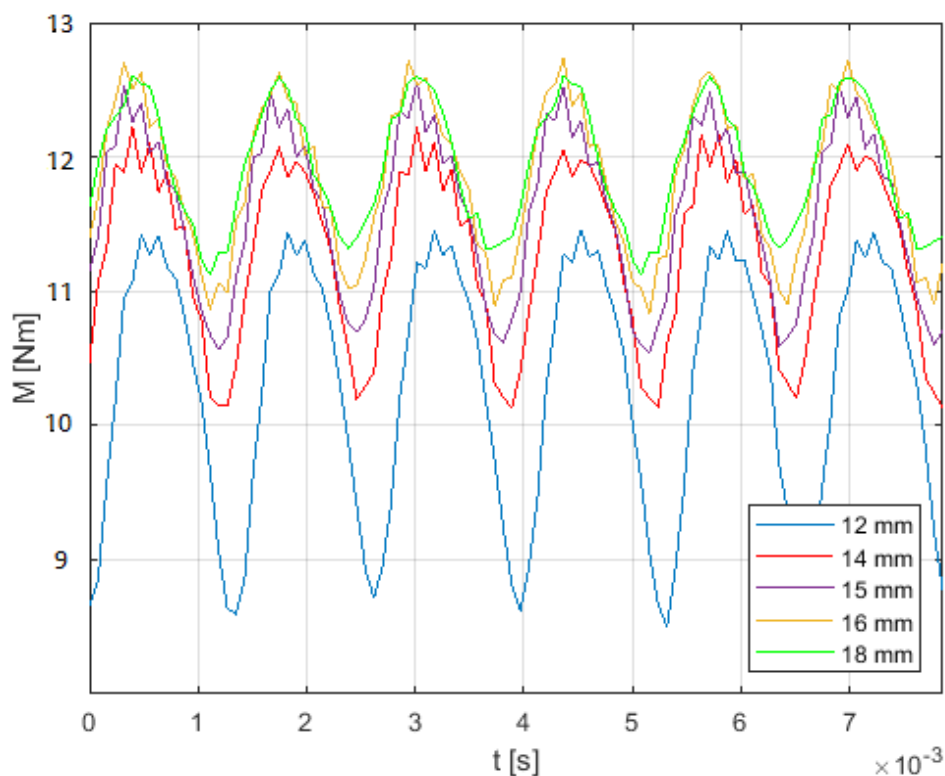
Následovala varianta 4 se 16 mm magnety, která odpovídá 87 % pokrytí povrchu rotoru. Zvětšením magnetů došlo ke zvýšení zvlnění točivého momentu na 64,9 %. Mechanický výkon vzrostl o dalších téměř 40 W na 2538 W. Účinnost stroje klesla na 94 %. Chyba způsobená diskretizací výpočetní sítě je 0,82 %.

Poslední simulovanou variantou číslo 5 je šířka magnetů 18 mm. Toto rozložení magnetů odpovídá 98% pokrytí rotoru. Zde je zvlnění točivého momentu 60,5 %. Mechanický výkon je 2554 W a účinnost 94,6 %.

Z výše uvedených simulací vyplývá, že zvětšením povrchu magnetů na rotoru z 67 % (12 mm) na 87 % (16 mm) bylo dosaženo navýšení mechanického výkonu o 200 W. Točivý moment vzrostl o 13 %.

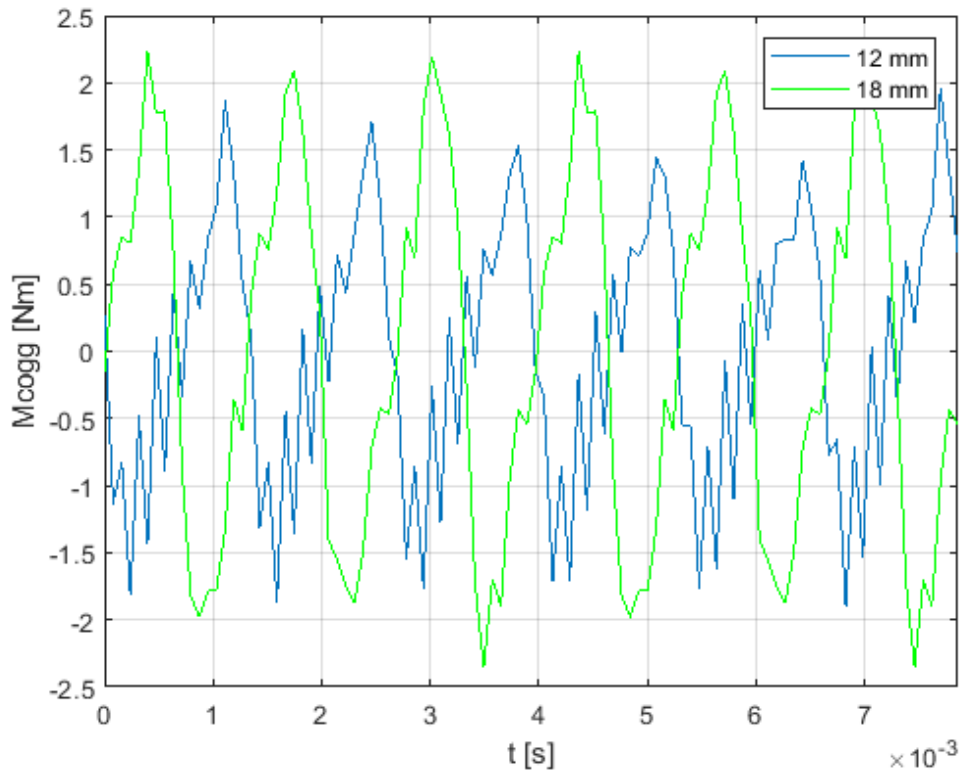
Z porovnání simulací pro šířky magnetů 16 mm a 18 mm vyplývá, že výkon stroje vzrostl ještě o dalších 16 W. Točivý moment vzrostl o 0,5 Nm. Z nákresů geometrií rotoru, bylo zjištěno, že pokrytí 98 % plochy rotoru by bylo technologicky velmi náročné na umístění magnetů a magnety by se na rotor vešly velmi obtížně. Také nárůst výkonu a točivého momentu je oproti magnetům s šířkou 16 mm zanedbatelný. Naproti tomu hmotnost rotoru s magnety o šířce 18 mm je vyšší o 80 g.

V grafu (Obr. 18) jsou zobrazeny průběhy točivého momentu pro jednotlivé šířky permanentních magnetů. Lze si povšimnout, že maximální hodnota momentu již pro šířky magnetů 15 – 18 mm téměř nevzrůstá. Avšak je vidět, že se vzrůstající šířkou magnetů se výrazně zvyšuje minimální moment stroje a tudíž klesá zvlnění točivého momentu. Tento jev byl zobrazen i v tabulce (Tab. 10). Pokles zvlnění momentu pro šířku magnetů 12 mm a 18 mm je z 41,6 % na 18,5 %.



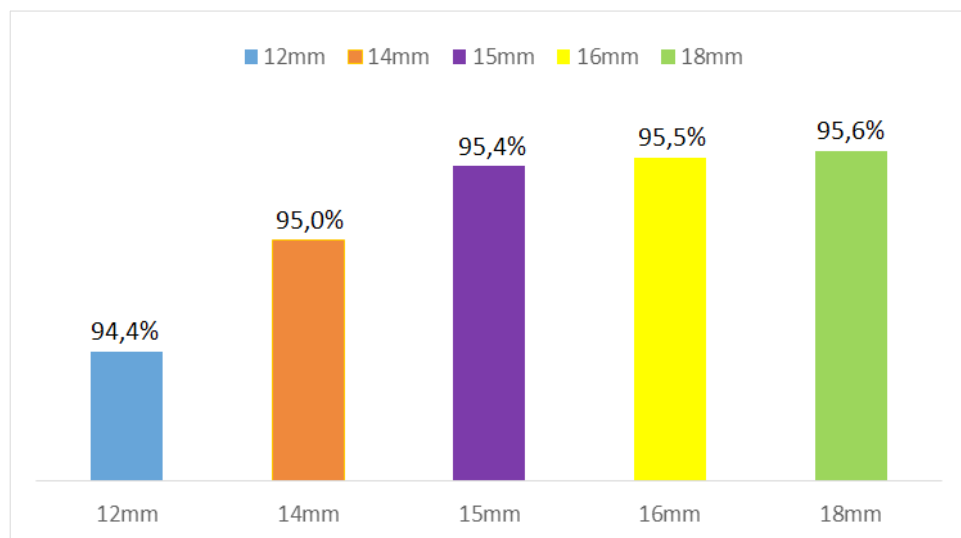
Obr. 18: Průběh točivého momentu pro jednotlivé šířky magnetů

Graf (Obr. 19) porovnává pulzační moment v čase pro šířku magnetů 12 mm a 18 mm. Z grafu je patrné, že velikost pulzačního momentu se zvětšila minimálně. Avšak je vidět, že vlivem rozdílné šířky permanentních magnetů dochází k časovému posunu těchto dvou průběhů.



Obr. 19: Pulzační moment strojů s magnety 12 a 18 mm

Účinnost stroje s rotorem z feromagnetické oceli pro jednotlivé šířky permanentních magnetů je zachycena v grafu (Obr. 20). Při bližším pohledu je patrné, že pro šířky magnetů 15 – 18 mm účinnost stroje vzrůstá již jen v řádu desetin procent.



Obr. 20: Porovnání účinnosti strojů

Z důvodu jednodušší dostupnosti a výrazně nižší ceně magnetů o šířce 15 mm oproti šířkám 16 a 18 mm (nejsou standardní) byly pro konstrukci stroje zvoleny magnety o šířce 15 mm. Tato varianta proto bude v další podkapitole práce podrobena důkladnější analýze pomocí metody konečných prvků.

6.3 Analýza stroje s kovovým rotorem s 15 mm magnety

Obrázek (Obr. 21) ukazuje uživatelské rozhraní programu MotorAnalysis, kde jsou po provedení simulace přehledně zobrazeny veškeré parametry motoru s 15 mm magnety.

Magnetostatic Analysis

Solver type: Nonlinear Convergence tolerance: 0.001
 Current waveform: Square Number of points: 100
 Current input method: RMS phase current
 RMS phase current: 20 <-rated A
 Advance angle: 0⁰ (el.deg.) Supply frequency: 630 Hz
 Mechanical speed: 3150 <-rated RPM Number of pole pairs: 12

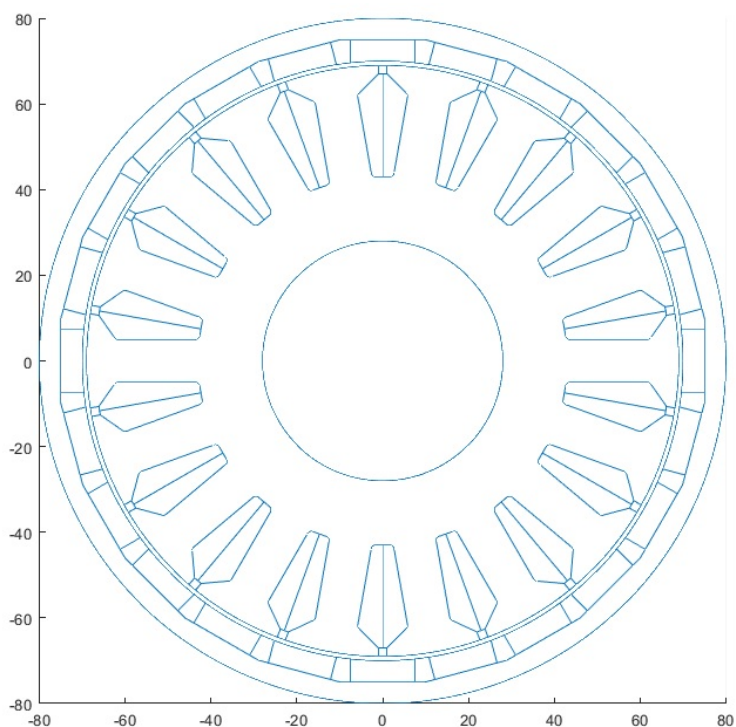
Compute cogging torque
 Save each field solution in folder: SimFiles\test_muj_MSdata

Results:

Rotor speed:	3150	RPM	RMS phase back-EMF:	40.8907	V
Advance angle:	-0.63943	⁰ (el.deg.)	Input electrical power:	2465.4	W
Supply frequency:	630	Hz	Output mechanical power:	2417.17	W
Total torque:	7.32771	N*m	Efficiency:	94.2101	%
Reluctance torque:	-0.00196254	N*m	Power factor:	0.960155	
Magnet torque:	7.32967	N*m	Stator winding loss:	18.1275	W
Torque ripple:	57.2877	%	Total iron core loss:	124.442	W
RMS phase current:	20.0231	A	Eddy current iron core loss:	63.0182	W
RMS phase voltage:	42.2238	V	Hysteresis iron core loss:	61.4233	W
RMS current density:	5.04334	A/mm ²	Magnet eddy current loss:	5.98357	W
Average d-axis current:	0.315598	A	Other eddy current loss:	0	W
Average q-axis current:	27.9549	A	Max. demag. field:	370220	A/m
Average d-axis voltage:	-7.51523	V	Max. demag. field (% of Hcj):	38.7665	%
Average q-axis voltage:	58.6171	V	Discretization error:	1.2211	%

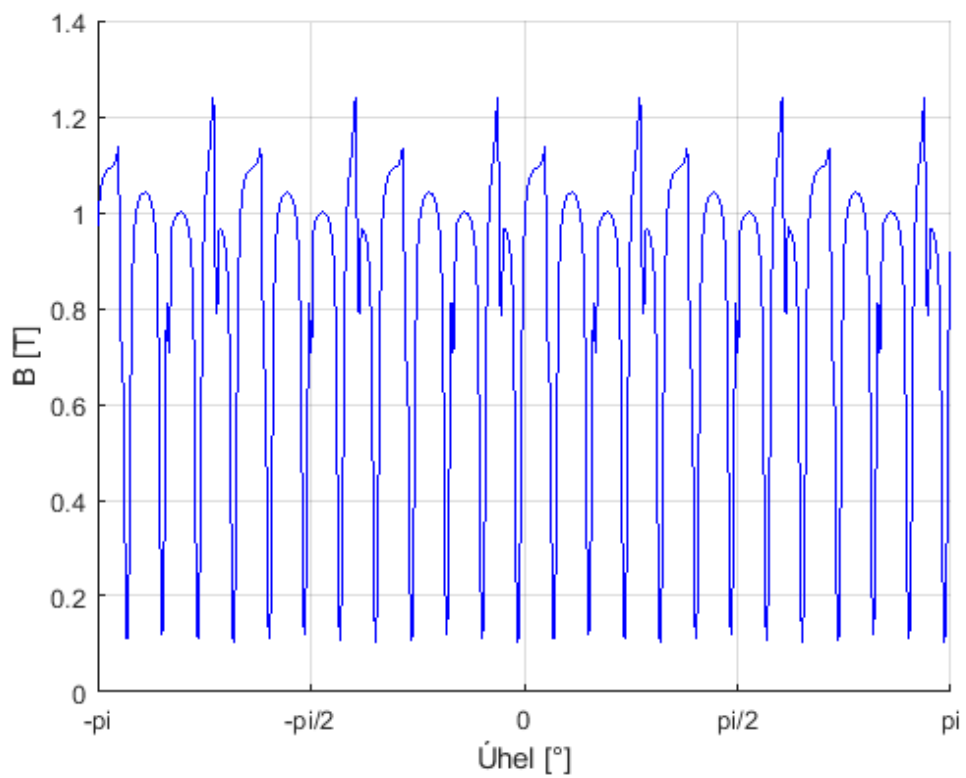
Obr. 21: Kompletní výsledky magnetostatické analýzy stroje s feromagnetickým rotorem se šířkou magnetů 15 mm

Na obrázku (Obr. 22) je zobrazena simulovaná geometrie rotoru z feromagnetické oceli s šířkou magnetů 15 mm. Šířka magnetů 15 mm odpovídá pokrytí 82 % povrchu rotoru. Tato varianta s pokrytím rotoru 82 % vykazuje zvlnění točivého momentu 57,3 %. Pro výše uvedené parametry je výstupní mechanický výkon 2417 W a účinnost 94,2 %. Chyba způsobená diskretizací výpočetní sítě je 1,22 %.



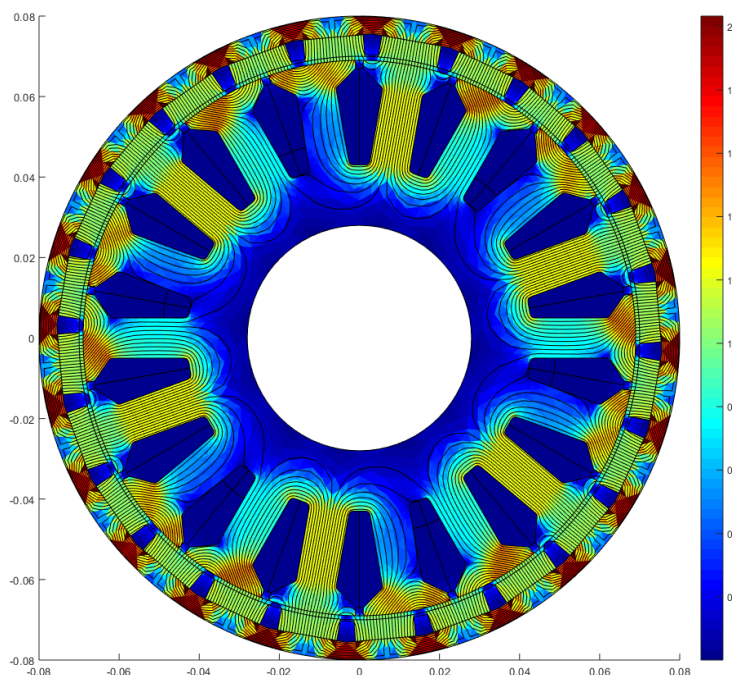
Obr. 22: Geometrie stroje s magnety 15 mm

Graf (Obr. 23) ukazuje průběh magnetické indukce ve vzduchové mezeře v závislosti na potočení rotoru.



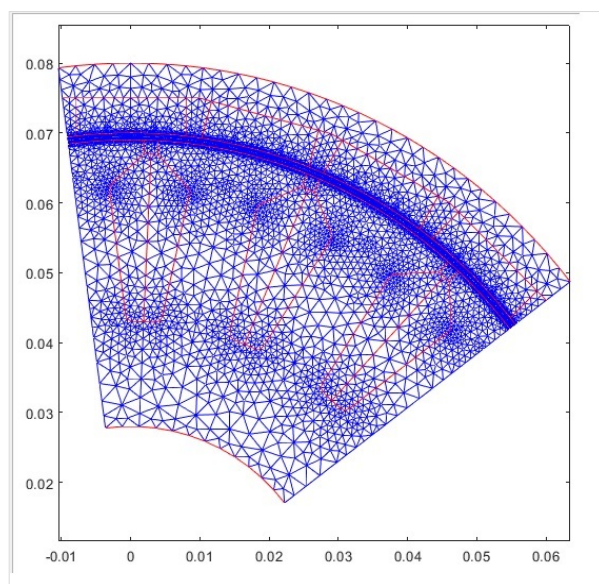
Obr. 23: Průběh indukce ve stroji s feromagnetickým rotorem s magnety 15 mm

Na obrázku (Obr. 24) je zobrazeno rozložení magnetické indukce v motoru a také siločáry magnetického toku.



Obr. 24: Průběh magnetické indukce ve stroji s feromagnetickým rotorem s magnety 15 mm

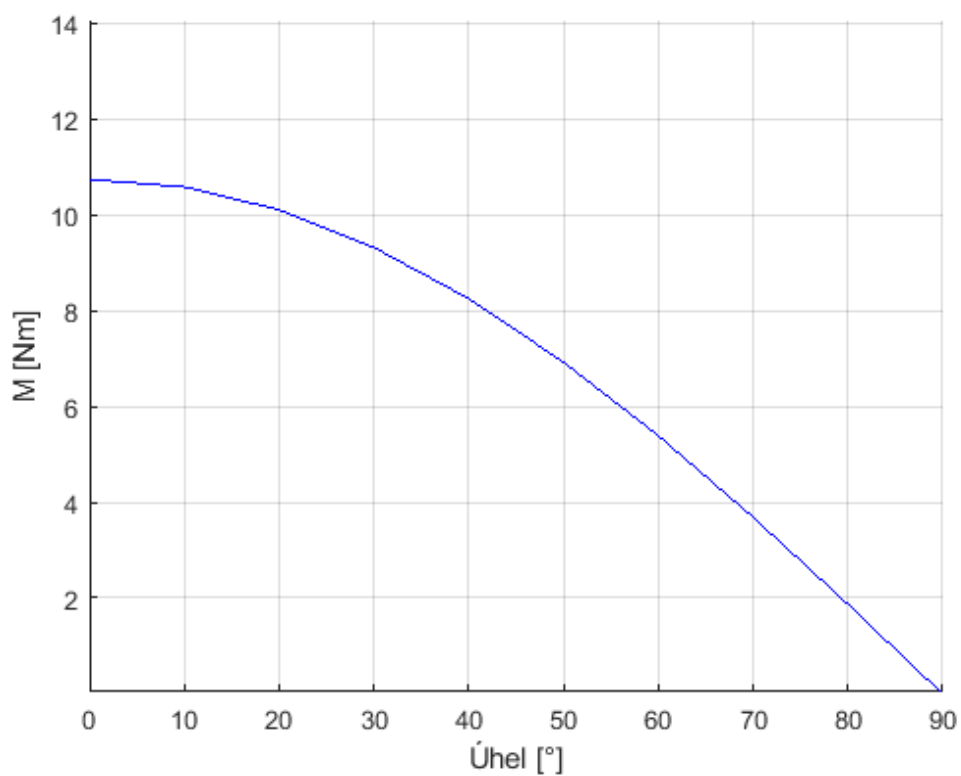
Pro podrobnější analýzu stroje byla vytvořena jemnější výpočetní síť. Vzduchová mezera byla rozdělena namísto původních tří vrstev na sedm vrstev. Poměr nárůstu výpočetní sítě byl zmenšen z 1,4 násobku na 1,1 násobek. Počet trojúhelníkových prvků v modelu je 6362 (původně 1937) a počet uzlů je 12116 (původně 3556). Pro urychlení simulace byl stroj rozdělen na šestiny a model je počítán pouze pro tuto 1/6 stroje (Obr. 25).



Obr. 25: Výpočetní síť modelu – zjemněná

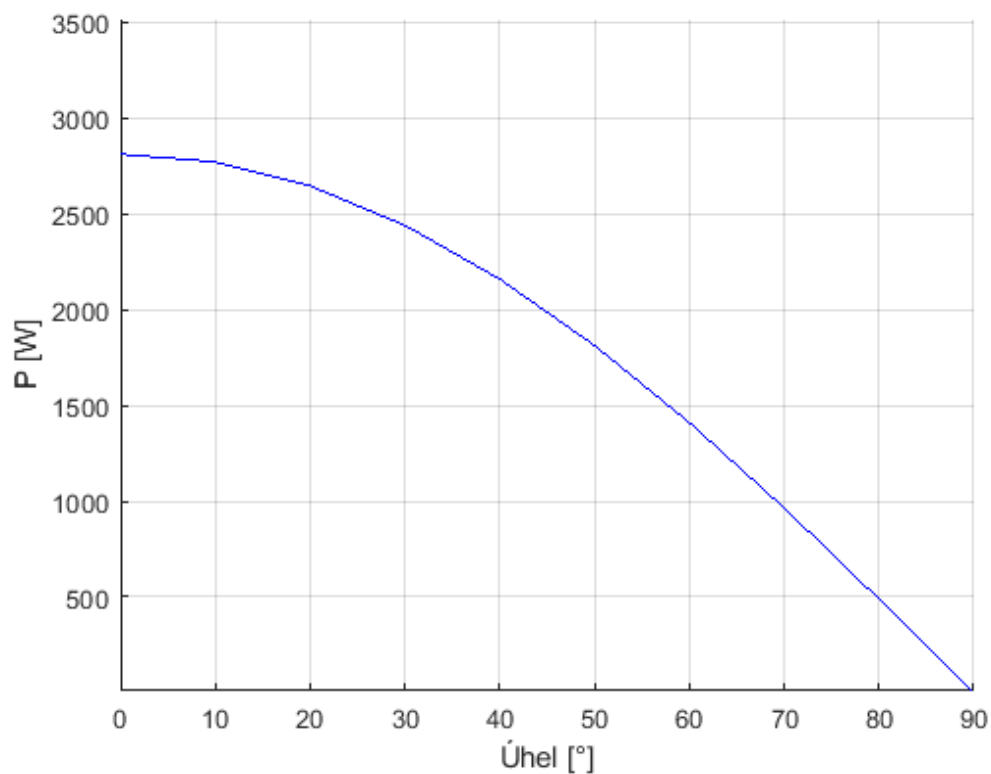
Výše popsaným zpřesněním modelu bylo dosaženo snížení diskretizační chyby pouze o 0,2 %. Výpočetní doba modelu se však více než ztrojnásobila (ze 4 minut na 14 minut). Proto lze bez problému považovat za dostatečně přesný i model s menší hustotou diskretizační sítě. Tímto se výrazně zkrátí čas potřebný pro výpočty, aniž by výrazně utrpěla přesnost simulace.

Dále byl vytvořen model D-Q a provedena analýza podle tohoto modelu. Na grafu (Obr. 26) je zobrazen pokles točivého momentu v závislosti na řídicím úhlu. Ideální komutace s maximálním točivým momentem probíhá při řídicím úhlu 0° elektrických.



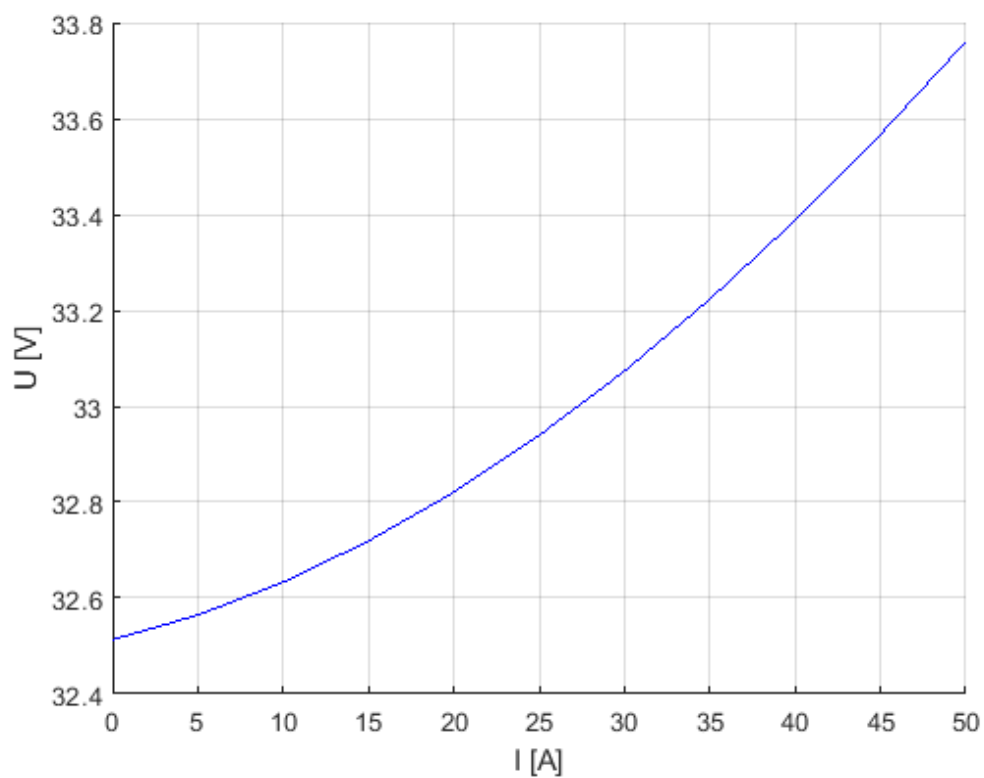
Obr. 26: Závislost momentu na úhlu komutace pro feromagnetický rotor s magnety 15 mm

Obdobný průběh má také křivka mechanického výkonu (Obr. 27). Maximální mechanický výkon při komutaci při úhlu 0° elektrických je 2850 W. Při zvyšování úhlu klesá k nule.



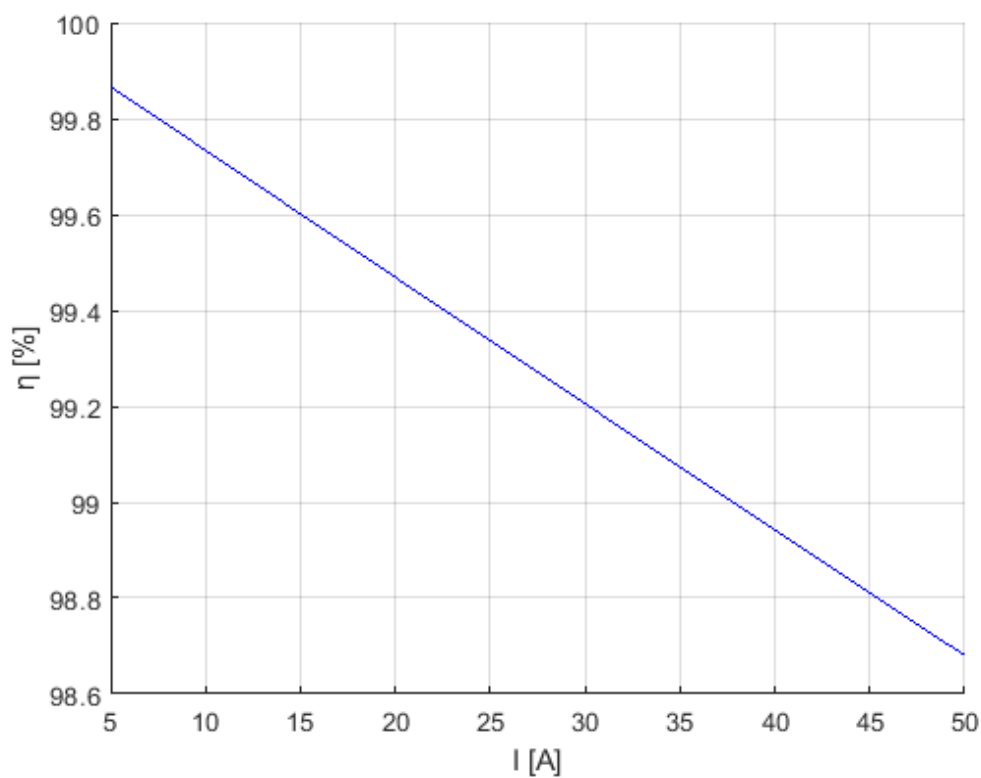
Obr. 27: Závislost mechanického výkonu na úhlu komutace pro feromagnetický rotor s magnety 15 mm

Obrázek (Obr. 28) ukazuje, velikost fázového napětí v závislosti na odebíraném proudu stroje.

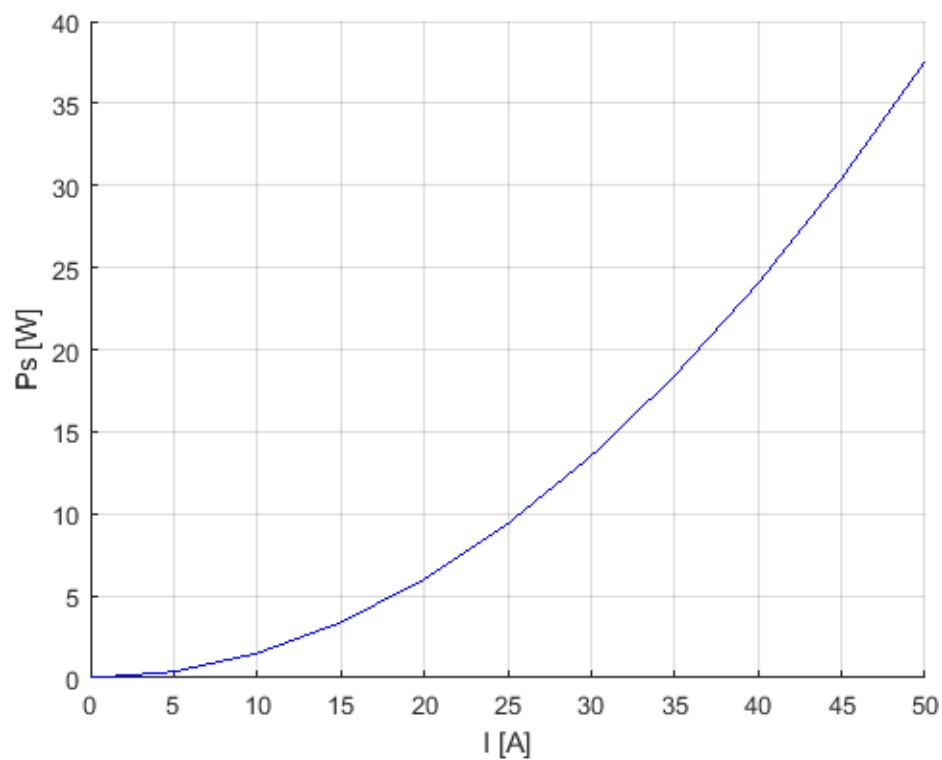


Obr. 28: Závislost fázového napětí na odebíraném proudu pro feromagnetický rotor s magnety 15 mm

Graf (Obr. 29) zobrazuje závislost účinnosti stroje na proudu vinutím. S tím jsou spojeny ztráty ve vinutí statoru. Ty jsou zobrazeny v následujícím grafu (Obr. 30). Ztráty ve vinutí rostou s druhou mocninou procházejícího proudu. Pro napájecí proud 50 A se tyto ztráty pohybují okolo 40 W.



Obr. 29: Účinnost v závislosti na napájecím proudu pro feromagnetický rotor s magnety 15 mm



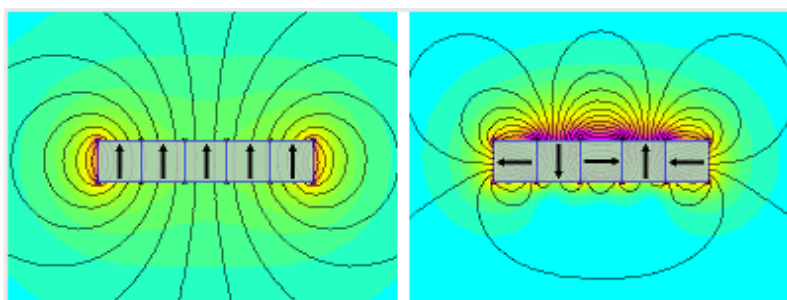
Obr. 30: Závislost ztrát ve vinutí statoru na napájecím proudu pro feromagnetický rotor s magnety 15 mm

7 Simulace rotoru s Halbachovým polem

Tato kapitola práce se zabývá simulacemi i experimentálním ověřením možnosti využití Halbachova uspořádání magnetů na rotoru BLDC stroje. Halbachovo uspořádání bylo vynalezeno v roce 1980 německým fyzikem Klausem Halbachem při jeho výzkumu ohledně konstruování urychlovače částic. [36] Cílem kapitoly je ověřit, zda lze uspořádáním magnetů do Halbachova pole pozitivně ovlivnit magnetickou indukci ve vzduchové mezeře a zlepšit tak parametry BLDC motoru.

7.1 Princip Halbachova pole, uspořádání magnetů a využití v praxi

Princip Halbachova pole spočívá ve speciálním uspořádání magnetů tak, že geometrickým uspořádáním magnetů do Halbachova schématu je možno zesílit magnetickou indukci na jedné straně magnetů a potlačit ji na straně druhé. Tímto je možno částečně docílit jednostranného magnetického toku. [68] V práci bude ověřena možnost konstrukce rotoru stroje z neferomagnetického materiálu, pro který by mohlo být využití Halbachova pole výhodné z důvodu uzavírání magnetického toku přímo přes sousední o 90° pootočené magnety namísto jhem rotoru, jak je tomu v případě klasické konstrukce rotoru. Princip Halbachova pole, jeho magnetické pole a porovnání s klasickým uspořádáním permanentních magnetů je znázorněno na obrázku (Obr. 31).

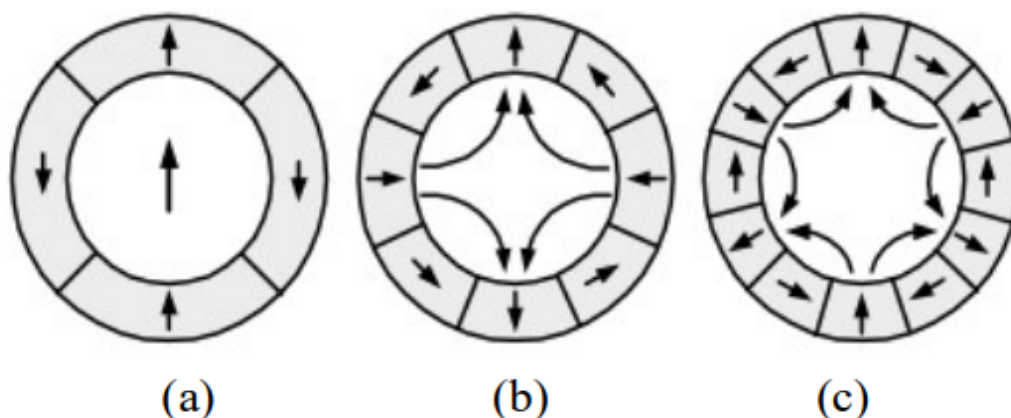


Obr. 31: Porovnání magnetického pole klasického uspořádání permanentních magnetů (vlevo) a pole v Halbachově uspořádání (vpravo) (upraveno z [36])

Hlavní problém rotoru stroje, využívajícího Halbachovo pole, zapříčiňuje neobvyklé uspořádání magnetů. Pro jeho vytvoření potřebujeme magnety vzájemně orientovat tak, aby na jedné straně byla magnetická indukce výrazně zesílena a na opačné straně

utlumena. Toho lze dosáhnout pouze konkrétním geometrickým uspořádáním magnetů.

Polarity jednotlivých permanentních magnetů jsou uspořádány tak, že vektor magnetizace se otáčí jako funkce vzdálenosti podél pole. Tento princip je znázorněn na obrázku (Obr. 32), který popisuje směr magnetizace pro různý počet pólů Halbachova pole. [69]

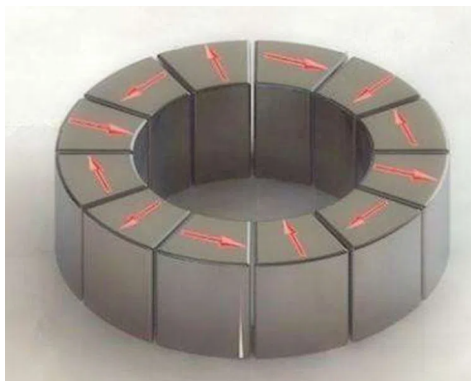


Obr. 32: Halbachovo pole pro různé počty pólů a) $p=1$ b) $p=2$, c) $p=3$ (upraveno z [69])

Vzhledem k těsné blízkosti jednotlivých magnetů a vzhledem k tomu, že je požadováno pootočení směru magnetického toku sousedních magnetů o 90° , není možné magnety namagnetovat až po usazení na svá místa. Z toho vyplývá, že jedinou možností konstrukce Halbachova pole je použití již namagnetovaných magnetů. Vzhledem k velmi vysoké přitažlivé/odpudivé síle použitých magnetů ze vzácných zemin to však je velmi komplikovaná úloha.

Variantou řešení tohoto problému je použití speciálně tvarovaných magnetů, které jsou rozděleny na menší segmenty kruhových výsečí namagnetovaných dle požadavků na vytvoření Halbachova pole. Problém tohoto řešení je, že tyto segmenty je nutno vytvořit vždy na míru požadovanému stroji a není tedy jednoduše možné změnit velikost a design BLDC stroje. Toto také výrazně ovlivňuje cenu výsledného motoru. Dalším problémem je nutnost vzájemného zafixování permanentních magnetů. K tomuto účelu se ve většině případů využívá lepení. Magnet složený ze segmentů, tvořících Halbachovo pole je

uveden na obrázku (Obr. 33).



Obr. 33: Segmenty magnetů tvořící Halbachovo pole (upraveno z [70])

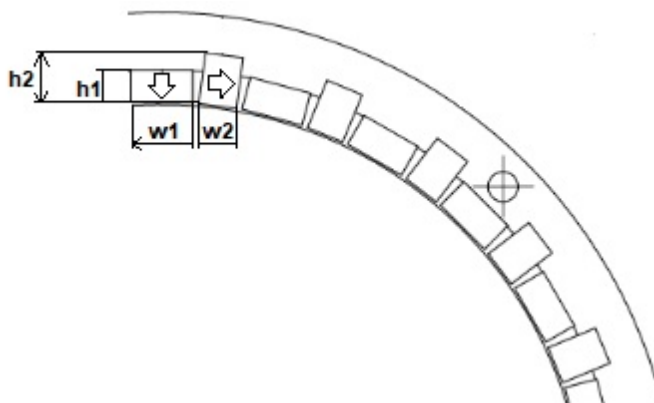
Další možností je využití standardních kvádrových magnetů. V tomto případě však nastává problém jejich uchycení na rotor BLDC motoru. Magnety na rotor stroje jsou obvykle lepeny. Toto je velmi pomalý proces, který zdržuje a prodražuje sériovou výrobu strojů s Halbachovým polem.

Jedním z cílů této práce je problém umístění magnetů do Halbachova pole výrazně zjednodušit a zefektivnit. Bude proto navržena a zkonstruována klec, fixující polohu permanentních magnetů. Díky tomu bude možno využít standardního kvádrového tvaru permanentních magnetů. Tím se výrazně zjednoduší a zefektivní případná změna rozměrů či designu výsledného stroje.

7.2 Volba rozměrů magnetů pro Halbachovo pole

Stejně jako pro rotor se standardním uspořádáním magnetů, je potřeba i pro konstrukci rotoru s Halbachovým polem zvolit vhodné rozměry permanentních magnetů. Rozměry magnetů výrazně ovlivňují klíčové vlastnosti stroje, jako indukci ve vzduchové mezeře, výsledný moment motoru a jeho průběh a zvlnění. Tomuto úkonu je tedy potřeba věnovat značnou pozornost. Pomocí FEM simulací byly ověřeny desítky variant permanentních magnetů a jejich kombinace. Výsledkem simulací je zjištění vlivu jednotlivých rozměrů magnetů na výsledné chování stroje. Obrázek (Obr. 34) zachycuje rozložení magnetů na rotoru s Halbachovým polem a ilustruje popisy rozměrů jednotlivých permanentních magnetů pro jednodušší orientaci a chápání následujících grafů. U magnetů s magnetizací

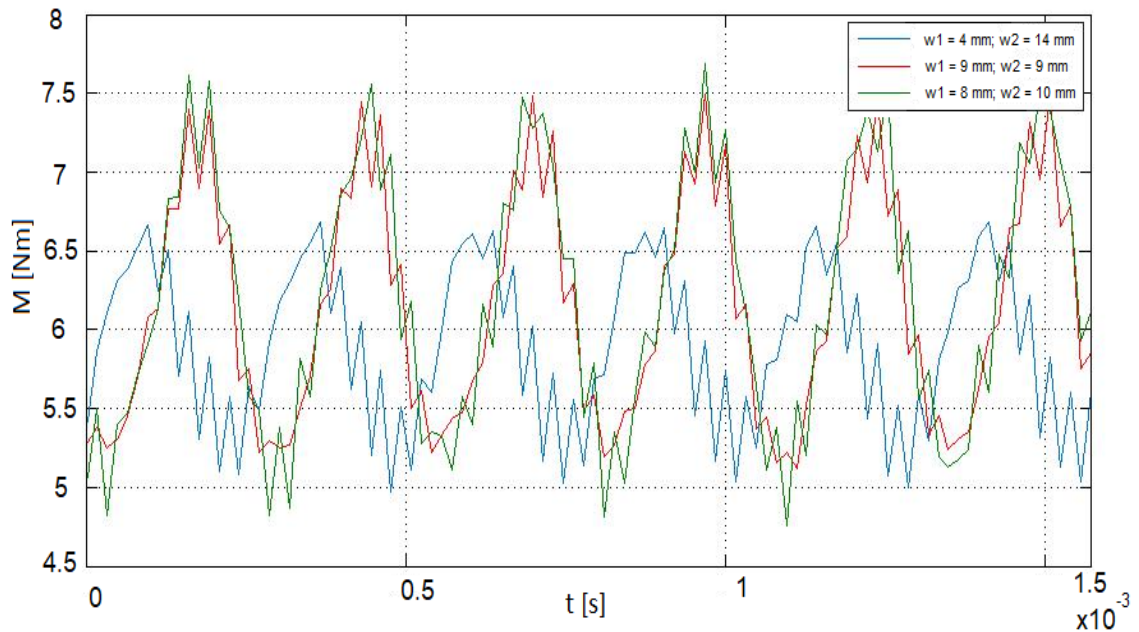
ve směru jejich výšky je šířka magnetů označena jako $w1$, a výška těchto magnetů jako $h1$. U magnetů s magnetizací ve směru jejich šířky je šířka magnetů označena jako $w2$ a výška těchto magnetů je označena jako $h2$. Směr magnetizace magnetů je v obrázku vyznačen šipkou.



Obr. 34: Značení rozměrů jednotlivých magnetů pro následující grafy, definice parametrů $w1, w2, h1, h2$

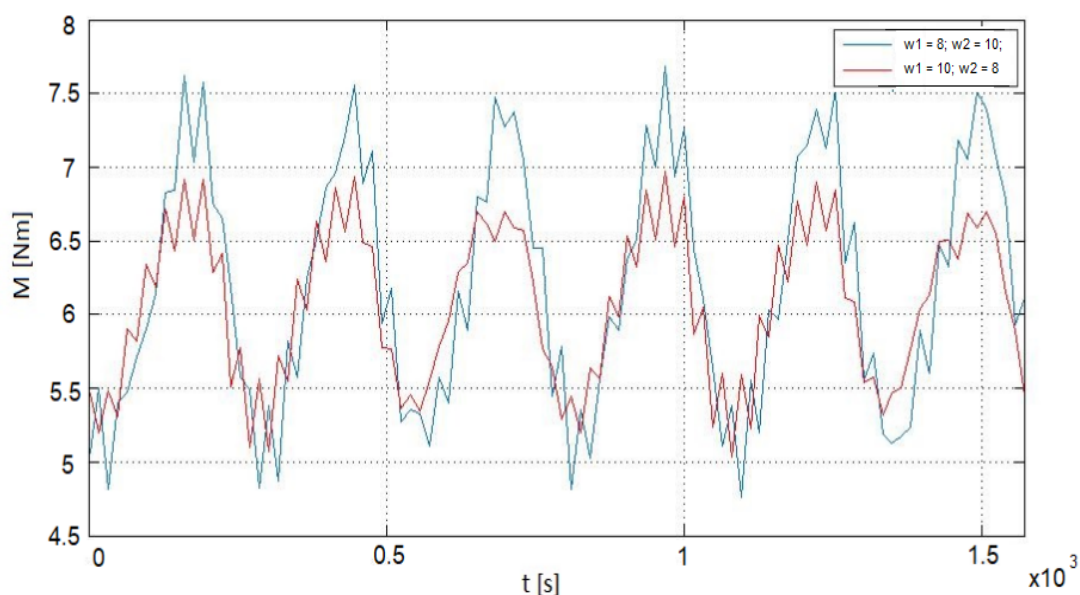
V grafu (Obr. 35) jsou znázorněny průběhy točivého momentu motoru pro vybrané poměry šířek $w1$ a $w2$ permanentních magnetů uspořádaných do Halbachova pole pro shodnou výšku magnetů $h1, h2 = 5$ mm. Z tohoto grafu je patrné, jaký vliv má poměr šířek magnetů $w1$ a $w2$ na průběh momentu stroje. Změny šířek permanentních magnetů v simulaci byly vždy voleny tak, aby objem permanentních magnetů v motoru byl stále shodný.

Z grafu je patrné, že pokud je šířka magnetů $w1$ výrazně menší, než šířka magnetů $w2$, točivý moment stroje nedosahuje vysokých hodnot a dochází k výraznému zvlnění průběhu momentu. Druhá varianta průběhu se shodnou šířkou magnetů $w1$ a $w2$ vykazuje výrazný nárůst točivého momentu stroje a zároveň snížení zvlnění momentu. Třetí průběh je pro šířku $w1$ menší než $w2$. Z průběhu je patrné, že při této konfiguraci dosahuje motor nejvyššího točivého momentu. Zvlnění průběhu momentu je však mírně vyšší než tomu bylo u varianty se shodnými šířkami magnetů.



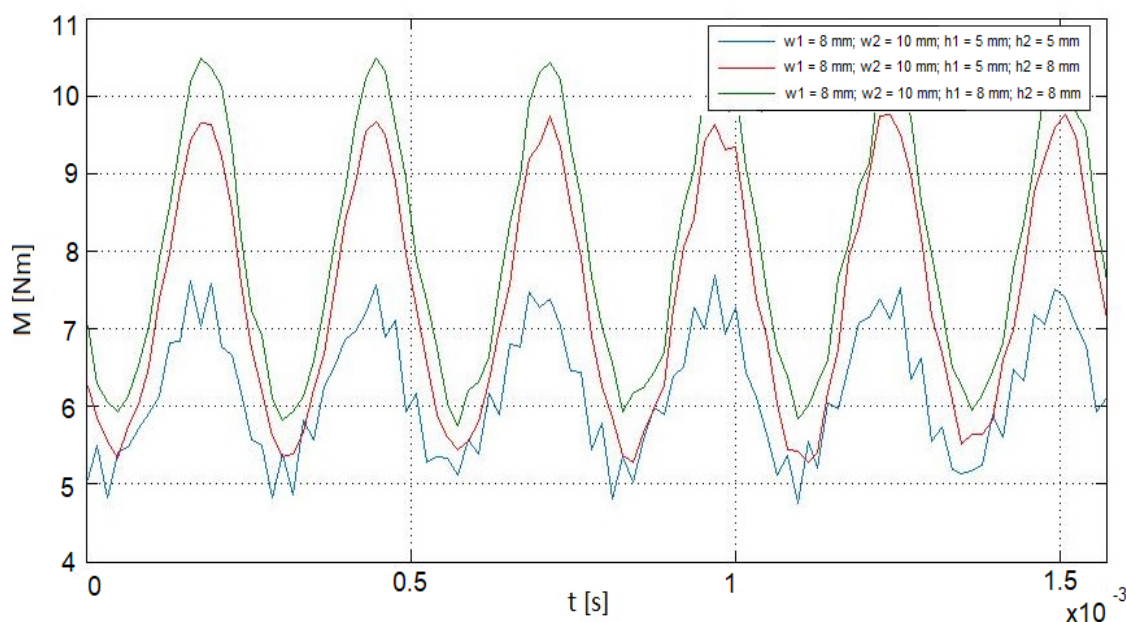
Obr. 35: Točivý moment pro různé šířky permanentních magnetů při výšce magnetů h_1 , $h_2 = 5\text{ mm}$

Jako další krok bylo simulováno, jaký vliv má směr magnetizace v závislosti na šířce magnetu na výsledný moment stroje. Výšky magnetů h_1 , h_2 byly opět ponechány shodně 5 mm. V grafu (Obr. 36) je zkoumáno, zde je výhodnější použití větší šířky w_1 (magnetů s magnetizací ve směru šířky) a či větší šířky w_2 (magnetů s magnetizací ve směru výšky). Při porovnání průběhů je velmi dobře patrné, že je výhodnější využít větší šířku w_2 (magnetů s magnetizací ve směru výšky). V tomto případě stroj vykazuje výrazně vyšší točivý moment. Rozdíl v momentu činí téměř 15 %.



Obr. 36: Rozdíl točivého momentu pro různé šířky permanentních magnetů s horizontální a vertikální magnetizací při výšce magnetů $h_1, h_2 = 5\text{ mm}$

V grafu (Obr. 37) je porovnána souvislost výšky magnetů a výsledného točivého momentu motoru. Byly porovnávány tři varianty výšky magnetů vždy pro shodnou šířku magnetů ($w_1 = 8$; $w_2 = 10\text{ mm}$). První varianta zobrazuje průběh momentu pro shodnou výšku ($h_1 = 5\text{ mm}$; $h_2 = 5\text{ mm}$) permanentních magnetů. Ve druhé variantě byla použita rozdílná výška ($h_1 = 5\text{ mm}$ a $h_2 = 8\text{ mm}$) permanentních magnetů magnetovaných ve směru šířky a ve směru výšky. Třetí varianta byla simulována se shodnou výškou ($h_1 = 8\text{ mm}$; $h_2 = 8\text{ mm}$) všech permanentních magnetů. Z grafu je patrné, že změnou výšky všech magnetů z 5 mm na 8 mm naroste moment stroje o 22,5 %. Z porovnání také vychází velice zajímavě varianta s rozdílnou výškou magnetů, kdy pouze změnou výšky h_2 tj. poloviny magnetů jsme schopni dosáhnout jen o 7,5 % nižšího točivého momentu oproti variantě s 8 mm výškou všech magnetů, při prakticky stejném zvlnění momentu. Rozdíl v hmotnosti magnetů v případě využití poloviny magnetů výšky 5 mm namísto 8 mm je 38 %. Využití této varianty může být proto v praxi velmi zajímavé u aplikací, kde klíčovou roli hraje hmotnost motoru.

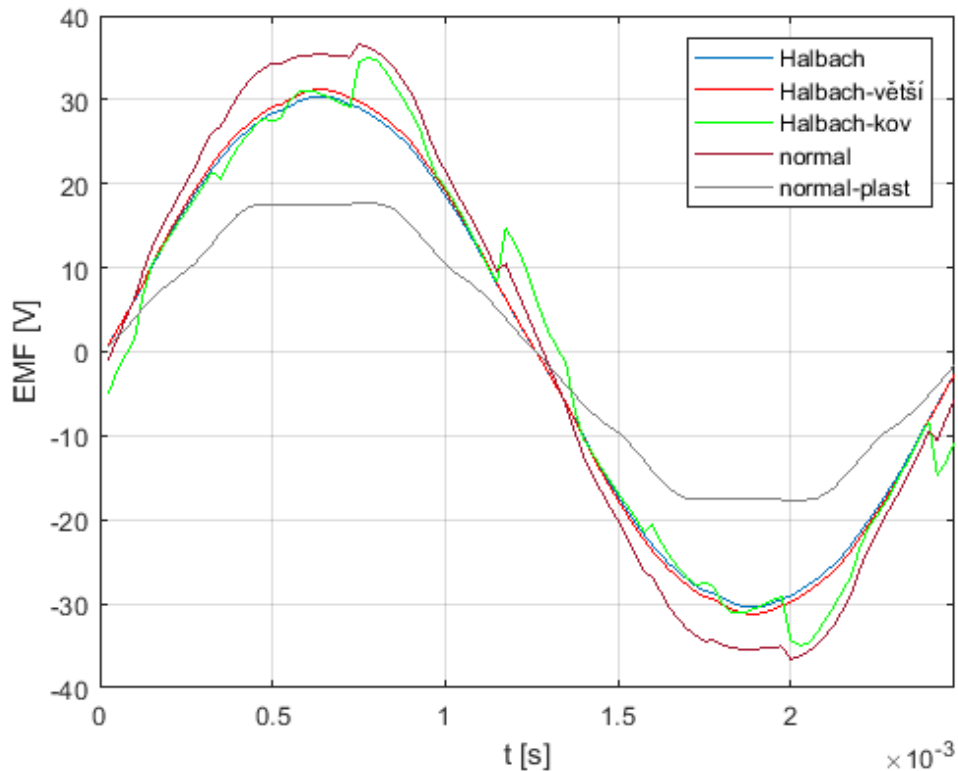


Obr. 37: Rozdíl točivého momentu pro různé výšky h_1 a h_2 permanentních magnetů

Pro konstrukci funkčního vzorku stroje bylo nutné vzít v úvahu cenu a reálnou dostupnost a permanentních magnetů. Pro funkční vzorek motoru jsem se tedy po konzultaci s vedoucím práce rozhodl využít kvádrové magnety o rozměrech 40x8x6 mm, 40x10x5 mm. Tyto rozměry jsou použity pro veškeré další simulace i následné funkční vzorky.

8 Porovnání simulací obou variant rotorů BLDC motoru

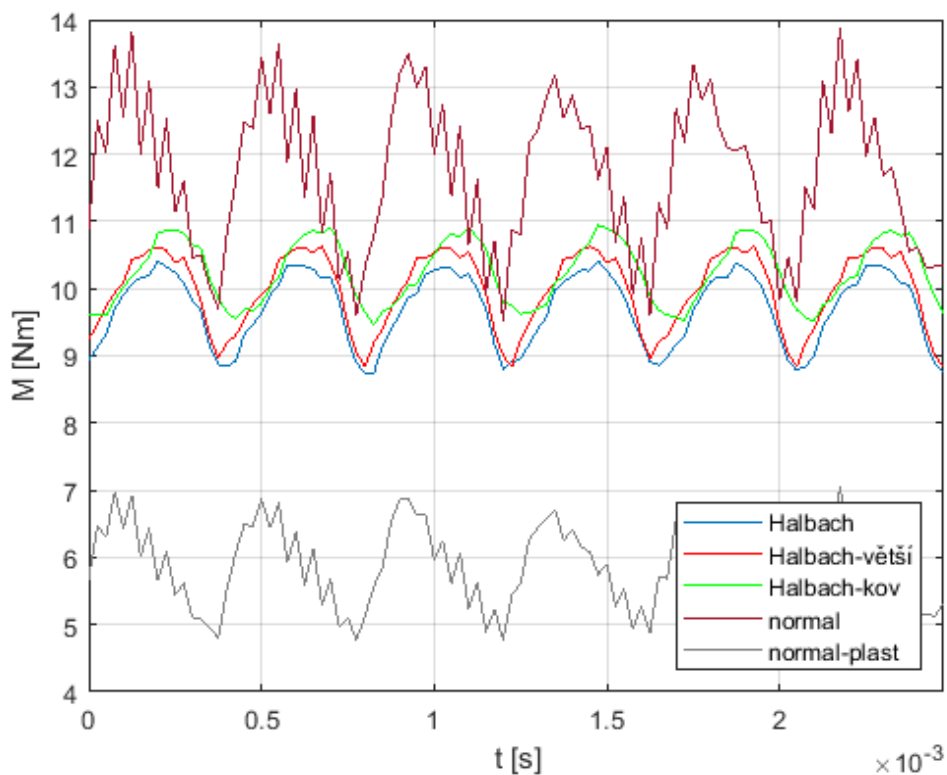
K ověření vlastností stroje s Halbachovým polem a následnému porovnání s běžnou konstrukcí rotoru byly použity varianty shrnuté v obrázku (Obr. 38). Pro ověření této hypotézy bylo vytvořeno několik variant simulací rotorů pro jeden a ten samý stator. První simulovaná varianta je rotor s normálním uspořádáním magnetů o šířce 15 mm vyrobený z feromagnetického materiálu (popsaný v předchozí kapitole). Druhá varianta rotoru je taktéž s normálním uspořádáním magnetů, avšak rotor je vyroben z nemagnetického materiálu - plastu. Třetí simulovaná varianta je rotor s Halbachovým uspořádáním magnetů vyrobený z feromagnetického materiálu. Čtvrtá a pátá simulace jsou varianty rotoru vyrobeny z nemagnetického materiálu s Halbachovým uspořádáním magnetů pouze s rozdílnou velikostí vzduchové mezery.



Obr. 38: Průběh indukovaného napětí pro jednotlivé varianty rotorů

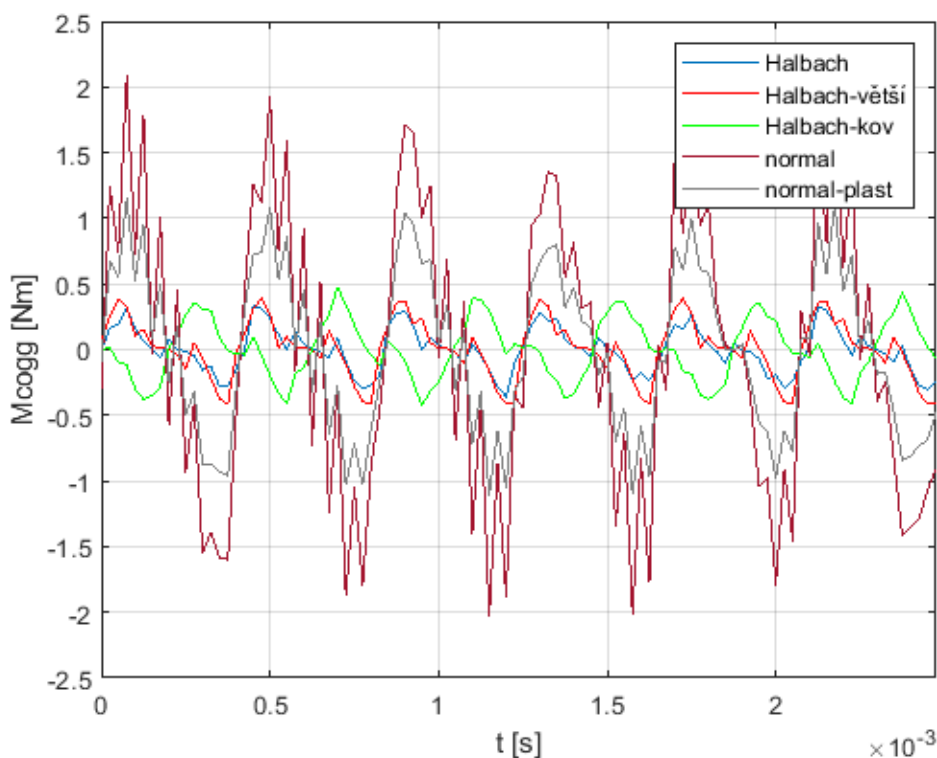
Byla provedena simulace pro průběh indukovaného napětí v čase v jednotlivých variantách. Z průběhů zobrazených v grafu vyplývá, že pro normální uspořádání magnetů je indukováno vyšší napětí do cívek statoru, avšak tento průběh v porovnání s Halbachovým uspořádáním magnetů obsahuje výrazně více vyšších harmonických. Je zřejmé, že nejnižší obsah vyšších harmonických obsahuje indukované napětí s Halbachovým uspořádáním magnetů a nemagnetickým jhem rotoru. V porovnání s Halbachovým uspořádáním s feromagnetickým jhem rotoru je zřejmé výrazně nižší zvlnění průběhu indukovaného napětí.

Následovala simulace průběhů momentu jednotlivých variant strojů. Z grafu (Obr. 39) je zřejmé, že moment stroje s normálním uspořádáním magnetů je oproti Halbachovu uspořádání téměř o 17 % vyšší. Zajímavé však je, že rozdíl mezi velikostí momentu s normálním uspořádáním magnetů mezi rotorem z feromagnetika a z nemagnetického materiálu je téměř 100 %. U Halbachova uspořádání je však rozdíl ve velikosti momentu pro feromagnetický a nemagnetický rotor pouze v řádu jednotek procent.



Obr. 39: Porovnání průběhů momentů stroje

Z grafu je také patrné, že pro varianty BLDC stroje s normálním rozložením magnetů na rotoru dochází k výrazně většímu zvlnění momentu. Tato hypotéza byla dále ověřena simulací pulzačního momentu jednotlivých strojů (Obr. 40).



Obr. 40: Porovnání průběhů pulzačních momentů stroje

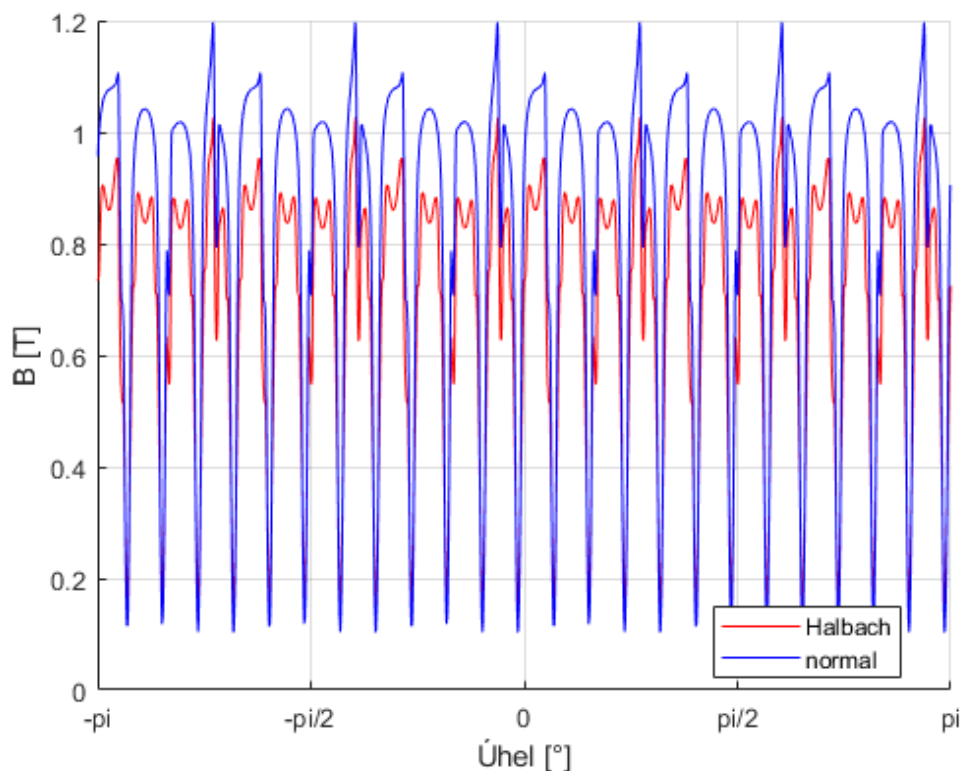
Z grafu pro simulaci pulzačního momentu vyplývá, že pulzační moment je při použití Halbachova schématu výrazně nižší, než u normálního uspořádání magnetů. Použitím Halbachova schématu poklesne pulzační moment více než třikrát.

8.1 Vzájemné porovnání simulací rotorů pro reálnou konstrukci

Pro reálnou konstrukci funkčního vzorku rotoru s Halbachovým uspořádáním magnetů byla zvolena verze s menší vzduchovou mezerou a plastovým rotorem (Obr. 38 až 40 označena „Halbach-větší“). Tato varianta přesněji koresponduje s velikostí vzduchové mezery v případě rotoru s normálním uspořádáním magnetů. Díky tomu bude možno vzájemně porovnat obě varianty rotorů a jejich případné výhody a nevýhody s vyšší přesností.

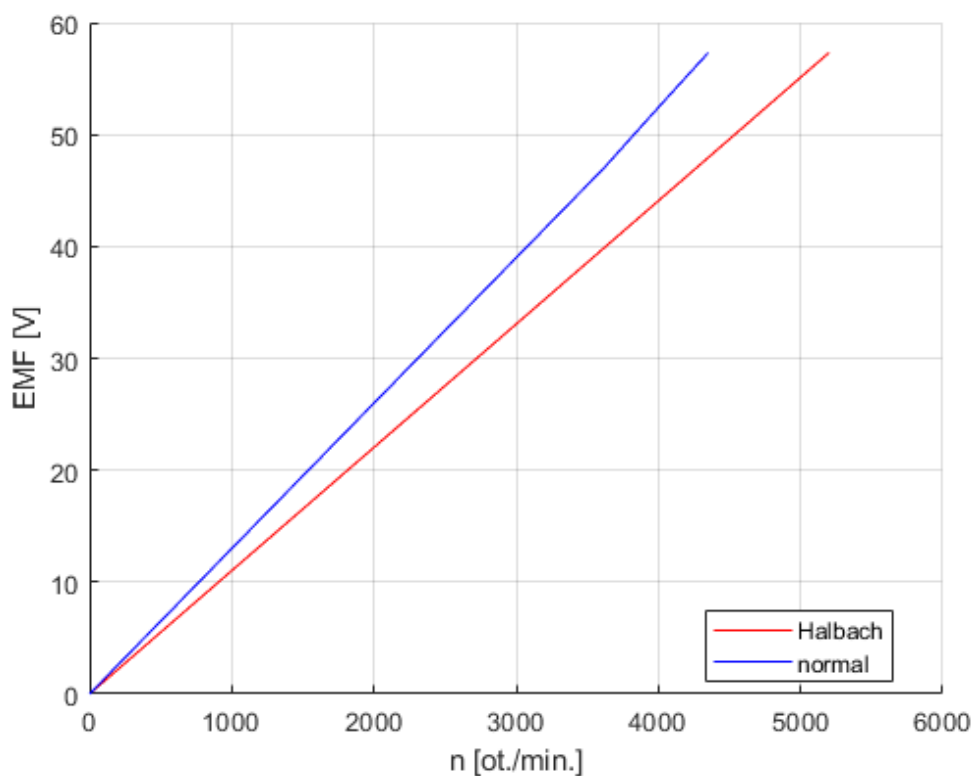
Pro prvotní porovnání byl nasimulován průběh magnetické indukce ve vzduchové mezeře pro feromagnetický rotor s normálním uspořádáním magnetů a plastový rotor

s Halbachovým uspořádáním. Z grafu (Obr. 41) je zřejmé, že maximální hodnota magnetické indukce ve vzduchové mezeře je vyšší pro stroj s normálním uspořádáním magnetů. Maximální hodnota indukce ve vzduchové mezeře je téměř o třetinu vyšší oproti hodnotě s Halbachovým uspořádáním magnetů. Avšak při bližším studiu průběhů je zřejmé, že zvlnění průběhu magnetické indukce ve vzduchové mezeře je pro stroj s Halbachovým uspořádáním magnetů výrazně nižší. To by mohlo ve výsledku pozitivně ovlivnit výsledné vlastnosti BLDC stroje.



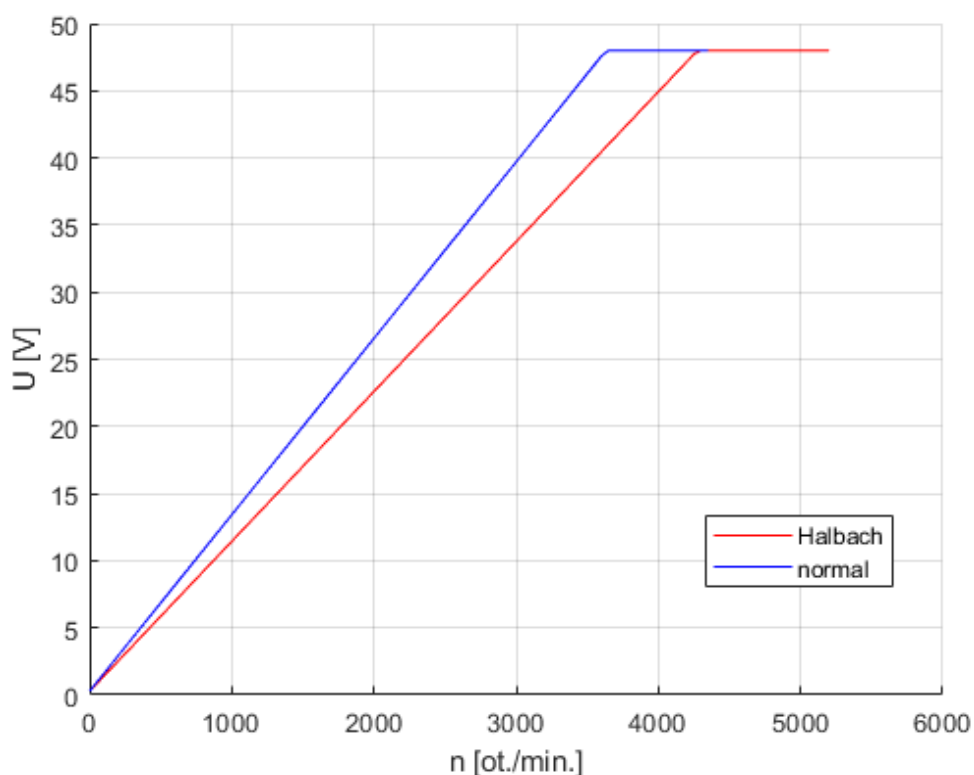
Obr. 41: Průběh magnetické indukce v závislosti na poloze rotoru

V grafu (Obr. 42) jsou porovnány efektivní hodnoty indukovaného napětí v závislosti na otáčkách rotoru. Velikost indukovaného napětí je vyšší pro stroj s normálním uspořádáním magnetů. Rozdíl v efektivní hodnotě indukovaného napětí činí přibližně 15 %.



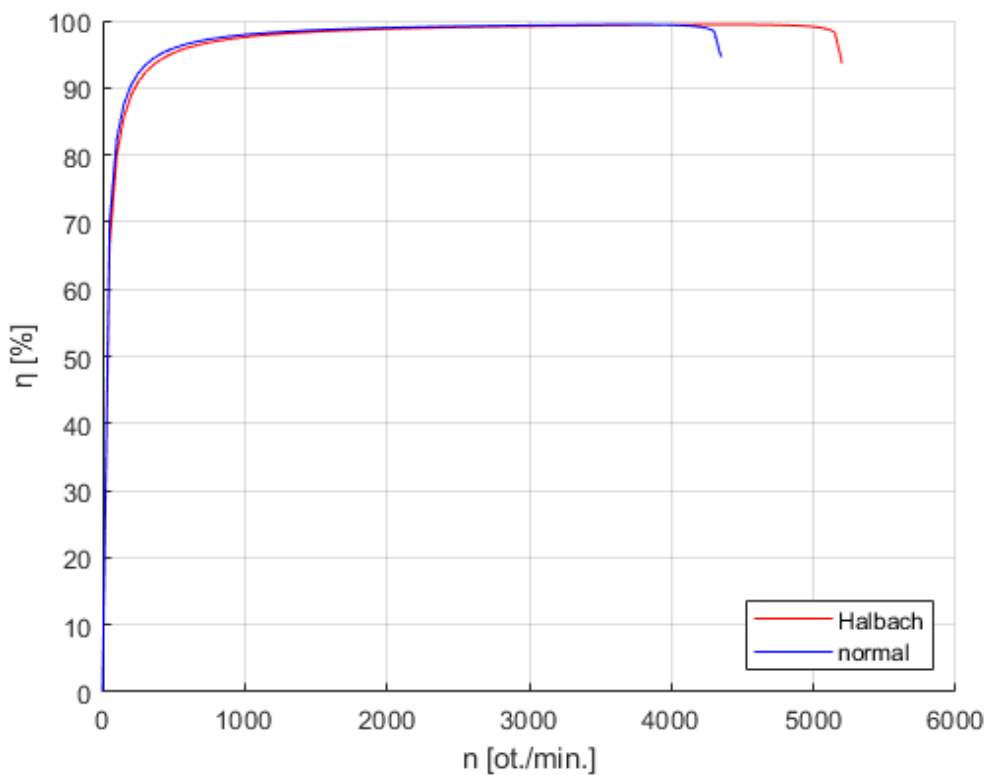
Obr. 42: Závislost efektivní hodnoty indukovaného napětí na otáčkách rotoru

Obdobný průběh má také graf napájecího napětí stroje (Obr. 43). Pro simulaci bylo zvoleno omezení maximálního napájecího napětí na 48 V a fázový proud 32 A. Z grafu vyplývá, že pro toto napětí dosáhne stroj s normálním uspořádáním magnetů rychlosti 3600 ot./min. Oproti tomu stroj s Halbachovým uspořádáním magnetů dosáhne pro napětí 48 V rychlosti 4300 ot./min. Tyto hodnoty korespondují s hodnotami indukovaného napětí od permanentních magnetů na rotoru.



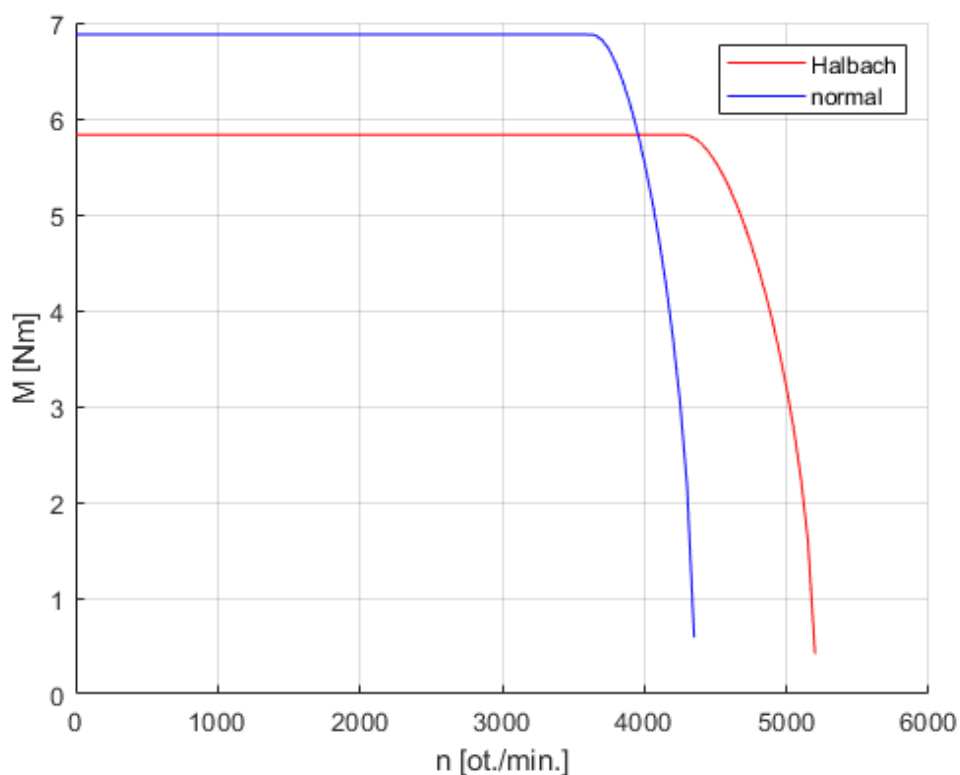
Obr. 43: Závislost efektivní hodnoty napájecího napětí na otáčkách rotoru

Účinnost obou strojů je téměř totožná. Stroj s Halbachovým uspořádáním vykazuje po celou dobu průběhu účinnost mírně vyšší. Toto je dáno zejména nižšími ztrátami v železe. Pro normální uspořádání magnetů jsou celkové ztráty v železe 66 W. Naproti tomu celkové ztráty v železe pro stroj s Halbachovým uspořádáním magnetů jsou pouze 50 W. Tento rozdíl vzniká absencí železa na rotoru a tudíž rozdílnému směru uzavírání magnetického toku ve stroji. Celková účinnost stroje je však vyšší pouze o desetiny procenta (Obr. 44).



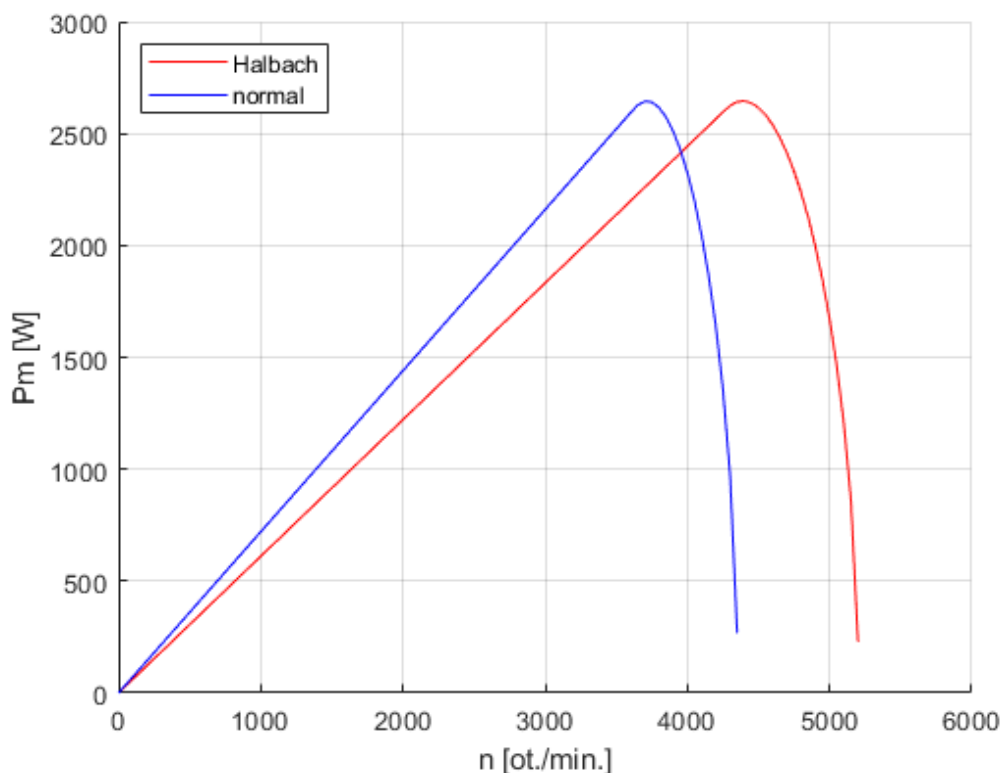
Obr. 44: Porovnání účinnosti strojů

Graf (Obr. 45) ukazuje průběh točivého momentu v obou strojích pro fázový proud 32 A a napájecím napětím 48 V. Z grafu je patrné, že motor s normálním uspořádáním magnetů dosahuje vyššího točivého momentu. Rozdíl momentů je téměř 17 %. Avšak jak již bylo uvedeno výše, zvlnění točivého momentu pro stroj s normálním uspořádáním magnetů je 37 %. Oproti tomu zvlnění momentu pro Halbachovo uspořádání magnetů je pouze 18 %. Tento rozdíl může mít výrazný vliv na plynulost chodu stroje a také na hlučnost a vibrace.



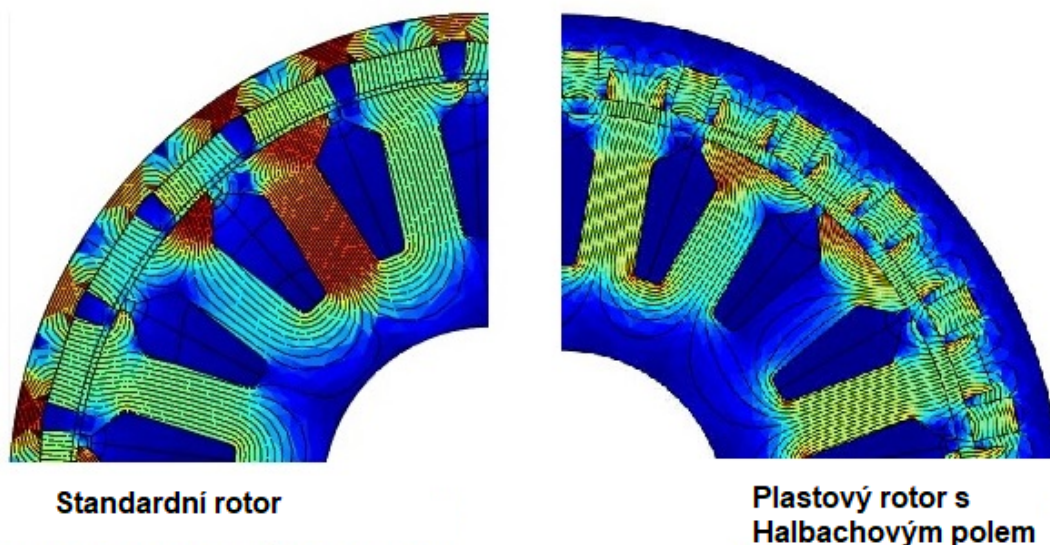
Obr. 45: Porovnání momentu strojů

Průběh mechanického výkonu (Obr. 46) obou strojů je shodný, jen vzájemně posunutý o cca. 700 ot./min. Toto je dáno rozdílným napájecím napětím obou strojů pro shodné otáčky. Jak již bylo uvedeno, stroj s Halbachovým uspořádáním dosahuje o několik desetin procenta vyšší účinnosti.



Obr. 46: Porovnání průběhů mechanického výkonu strojů

Z principu funkce Halbachova pole a provedených FEM simulací je zřejmé, že magnetický tok se v případě Halbachova uspořádání magnetů na rotoru stroje uzavírá jinou cestou, než je tomu u klasické konstrukce rotoru. Z obrázku (Obr. 47) je vidět, že v případě Halbachova pole se velká většina magnetického toku uzavírá přímo přes sousední, o 90° pootočený magnet (levá polovina obrázku), nikoli přes feromagnetické jho rotoru, jak je tomu ve standardním uspořádání permanentních magnetů na rotoru (pravá polovina obrázku). Zjednodušeně řečeno, v případě uspořádání permanentních magnetů do Halbachova pole nehraje permeabilita jha rotoru tak velkou roli, jak je tomu při standardním uspořádání magnetů na rotoru.



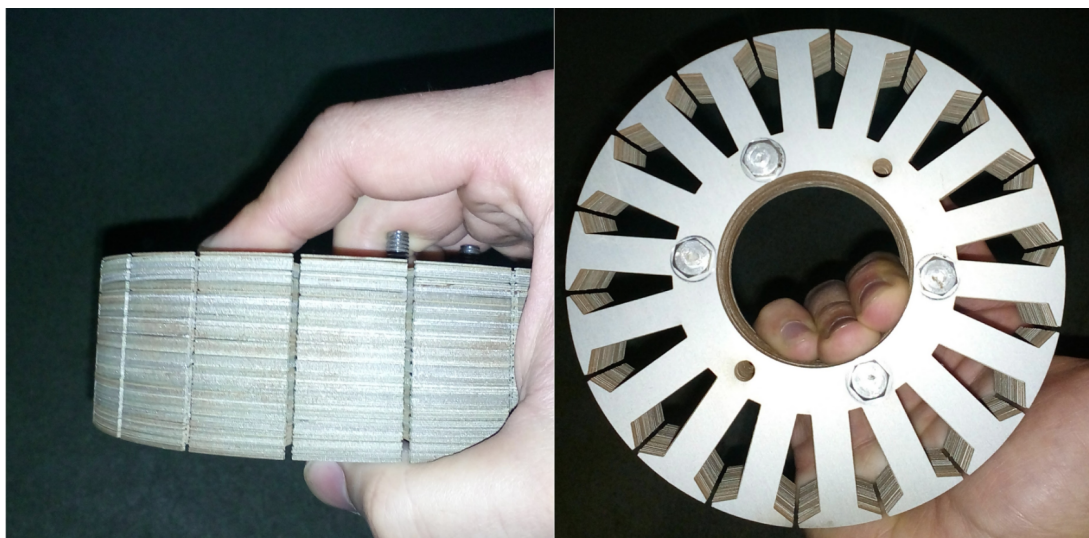
Obr. 47: Porovnání magnetické indukce stroje pro klasický a Halbachův rotor

9 Reálná konstrukce funkčního vzorku BLDC stroje

Tato kapitola má za úkol shrnout reálnou konstrukci jednotlivých komponentů BLDC stroje. Technologií jednotlivých podsystémů BLDC strojů jsem se podrobněji zabýval v kapitole 3 této práce. V této kapitole tedy budou pouze shrnuty konkrétní vlastnosti jednotlivých součástí a také použité konstrukční postupy zhotoveného funkčního vzorku.

9.1 Stator

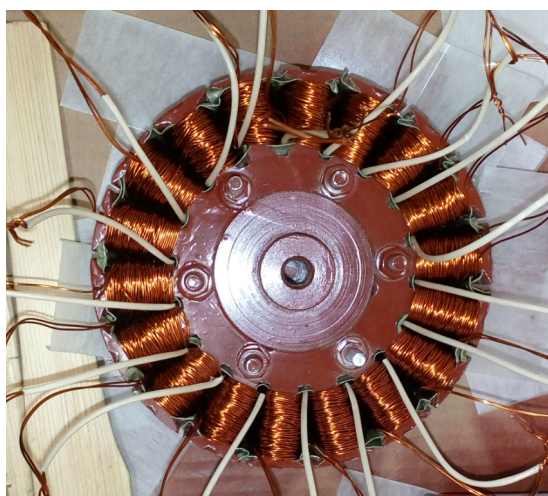
Stator BLDC stroje je klasické konstrukce ze 115 kusů vzájemně izolovaných plechů o tloušťce 0,35 mm. Tyto plechy byly vyřezány na požadovaný tvar za pomoci vodního paprsku. Následně byly vzájemně svařeny a obrobena na požadovaný průměr. Celý stator byl dále nastříkán červeným izolačním lakem, opatřen konstrukčními prvky a drážkovou izolací. Po navinutí byl stator vakuově impregnován izolačním lakem a osazen Hallovými sondami. Tento stator byl poté využíván pro všechna měření s oběma typy rotorů. Pohled na plechy statoru je zobrazen na obrázku (Obr. 48).



Obr. 48: Plechy statoru funkčního vzorku BLDC stroje

9.2 Vinutí

Vinutí stroje bylo provedeno dvěma paralelními vodiči o průměru 0,63 a 0,67 mm. Jednotlivé póly statoru byly separátně navinuty požadovaným počtem závitů. Celý stroj byl navinut ručně. Následně byly oba konce každé cívky opatřeny izolační bužírkou, která zabraňuje mechanickému poškození izolace. Poté byly pájením natvrdo vytvořeny tři měděné kruhy, sloužící ke spojení jednotlivých fází a cívek. Celé vinutí je zapojeno do trojúhelníka a cívky jednotlivých fází jsou spojeny paralelně. Do vinutí byly přidány dva termistory KTY84-130 pro kontrolu teploty uvnitř vinutí. Stroj byl také opatřen třemi Hallovými sondami, pro získávání informací o poloze rotoru.



Obr. 49: Vinutí statoru funkčního vzorku BLDC stroje

9.3 Rotor klasické konstrukce z feromagnetické oceli s 15 mm magnety

Pro konstrukci jha rotoru BLDC stroje je využita trubka z oceli 11 500. Tato trubka byla obrobena na tloušťku 5 mm a upravena na přesný vnitřní průměr. Po obvodu vnitřního průměru jha rotoru byly umístěny magnety vždy se střídající se polaritou. Magnety byly vzájemně odděleny pomocí dřevěných hranolů 3x5 mm. Poloha magnetů byla fixována pomocí epoxidového lepidla. Dále byl rotor vybaven konstrukčními nosníky, které slouží k upevnění rotoru ke statoru BLDC stroje. Celková hmotnost kovového rotoru je 2779 g.



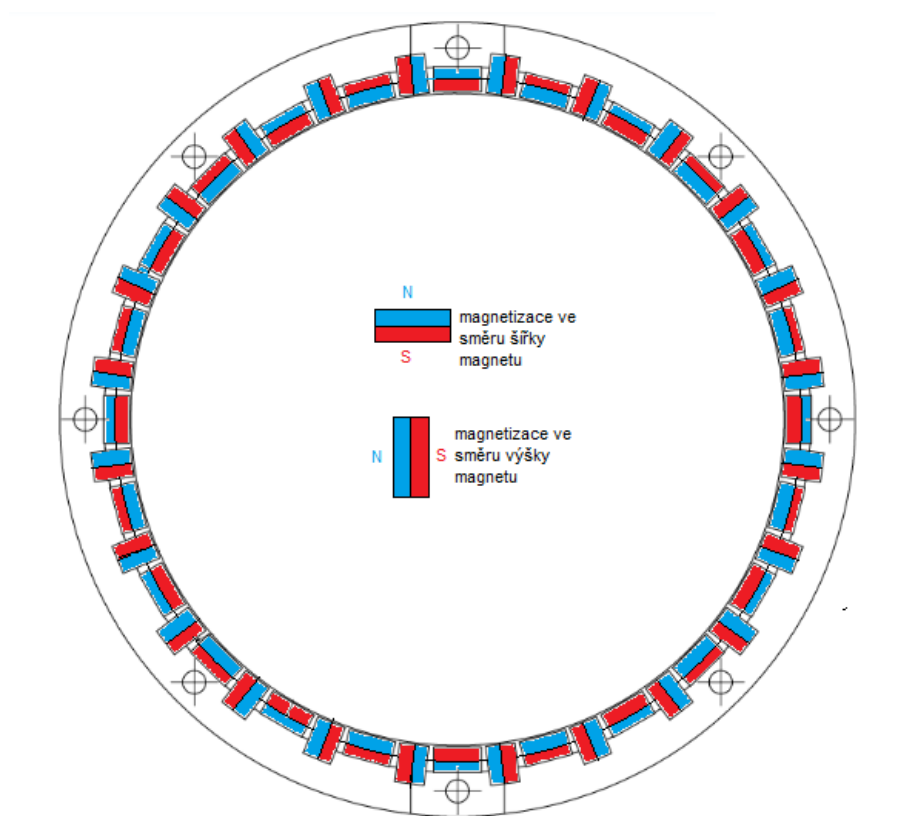
Obr. 50: Klasický rotor funkčního vzorku BLDC stroje

9.4 Rotor s Halbachovým polem vyrobený z nemagnetického materiálu

Jak již bylo v této práci několikrát zmíněno, další variantou rotoru je plastový rotor s uspořádáním magnetů do Halbachova pole. Vzhledem k ojedinělosti tohoto typu rotoru a jeho konstrukce je tomuto tématu věnována samostatná kapitola.

10 Konstrukce rotoru s Halbachovým polem metodou 3D tisku

Dle výsledků získaných simulací by mělo použití rotoru s Halbachovým polem dále vylepšit vlastnosti stroje. Jak již bylo uvedeno výše, Halbachovo pole bude složeno ze dvou velikostí kvádrových permanentních magnetů 40x8x6 mm, 40x10x5 mm. Tyto rozměry nejsou ideální varianta. Byly zvoleny z důvodu snadné dostupnosti a jejich nízké ceny jsou proto použity pro veškeré simulace i následný funkční vzorek. Uspořádání permanentních magnetů ve stroji včetně jejich magnetizace je zobrazeno na obrázku (Obr. 51).



Obr. 51: Skutečné uspořádání magnetů na rotoru do Halbachova pole

Na základě získaných poznatků z provedených simulací rotoru s uspořádáním magnetů do Halbachova pole jsem se rozhodl využít a vytvořit konstrukci rotoru z nemagnetického materiálu – plastu. K tomu se velice vhodně jeví využití technologie 3D tisku. Tato technologie se v posledních letech těší obrovské popularitě a velmi rychle se vyvíjí.

Největšími výhodami této metody je velmi vysoká variabilita konstrukce, možnost prototyp velmi rychle a jednoduše upravit za pomoci 3D modelování a nízká cena materiálu prototypu. Pořizovací cena 3D tiskáren začíná již pod deseti tisíci Kč. Pro vytvoření prototypu je tedy tato technologie opravdu ideální. Pro sériovou výrobu by pak bylo vhodné využít jinou technologii pro zpracování plastu (např. vstřikování, lisování...). Tyto technologie by umožnily mnohonásobně navýšit rychlost výroby a také snížit náklady na vyrobený kus.

10.1 Výběr materiálu pro funkční vzorek 3D tištěného rotoru

Důležitým aspektem pro 3D tisk je výběr vhodného materiálu. Tisknout lze z mnoha různých materiálů s rozdílnými vlastnostmi. Existují filameny, které jsou pevné, pružné, existují dokonce filameny feromagnetické, filameny s příměsí dřeva, uhlíku a mnoho dalších variant.

Ideální materiál pro konstrukci rotoru musí být dostatečně pevný a tvarově stálý, zároveň jednoduše tisknutelný, lehký a cenově přijatelný. Další důležitou vlastností materiálu je dostatečná teplotní odolnost. V úvahu připadají například materiály ABS, PLA, PETG. Pro plastovou konstrukci rotoru je použitý materiál klíčový, aby stroj zvládl požadované namáhání jak mechanické, tak například teplotní. Následující přehled proto uvádí materiály, které připadají v úvahu pro konstrukci plastového rotoru.

PLA (polylactic acid – kyselina polymléčná)

Syntetické PLA vlákno bylo objeveno v roce 1932. Později bylo PLA vlákno testováno pro výrobu chirurgických nití a implantátů. V roce 2020 se počítá s výrobou 800 000 tun PLA. Ze škrobu (nejčastěji obilného) se vyrábí enzymatickou hydrolýzou glukózy, ze které se fermentací získává kyselina mléčná. [2] Tento materiál je vyroben z obnovitelných zdrojů, a proto není závislý na ropě a jejích příměsích. PLA je možno biologicky degradovat, zkompostovat a přeměnit na kvalitní biomasu či humus, čímž nepředstavuje ekologickou zátěž. Výrobky z tohoto bioplastu jsou chuťově neutrální a bez alergenů. Je celosvětově uznán a certifikován pro použití v potravinářství a je u něj garantována zdravotní nezávadnost. Pro výrobu tohoto materiálu se dají použít stejné přístroje jako pro výrobu klasických plastů, s tím rozdílem, že výroba bioplastů je až

o 65% energeticky méně náročná. [3]

ABS (Akrylonitril-butadien-styren)

ABS patří mezi nejpoužívanější technické plasty vůbec. Tento materiál vyniká velmi vysokou mechanickou i chemickou odolností. V porovnání s ostatními plasty má také vysokou teplotní odolnost. Oproti PLA není ABS biologicky rozložitelné a je vyráběno z ropy. Je však možno ho recyklovat. [4] Teplota tisku pro ABS je výrazně vyšší oproti PLA. Tisk materiálu ABS je náročnější a je zapotřebí tisknout v boxu se stálou teplotou. [3, 4]

PETG (polyetylén tereftalát-glykol)

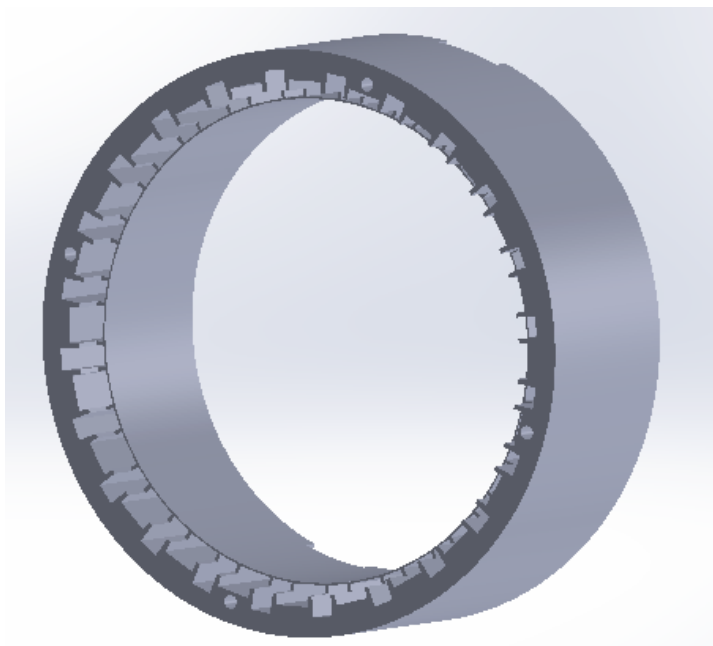
PETG vyniká dobrou odolností vůči mechanickému poškození. Je lesklý, tuhý, houževnatý, odolný proti nízkým i vysokým teplotám, minimálně nasákavý, zdravotně nezávadný. Je odolný vůči zředěným roztokům kyselin, zásad, mýdel i solí. V mnoha případech je PETG využíváno jako náhrada ABS. [4] Nevýhodou pro využití PETG pro tisk rotoru by mohla být větší flexibilita tohoto materiálu.

Skutečný materiál pro první funkční vzorek

Pro výrobu prvního funkčního vzorku rotoru s Halbachovým uspořádáním magnetů byl zvolen materiál PLA. Tento materiál je velmi jednoduše tisknutelný, dostatečně mechanicky i chemicky odolný a navíc je vyroben z obnovitelných zdrojů a z výše uvedených materiálů je nejekologičtější. Je také velmi jednoduše dostupný, lehký a levný. Největší nevýhodou tohoto materiálu, pro konstrukci 3D rotoru BLDC motoru, je jeho nízká teplotní odolnost, která se pohybuje okolo 60 °C. V reálném použití by tedy tento materiál mohl být nahrazen například moderním materiálem ASA. Tento materiál vyniká vysokou teplotní odolností (téměř 100 °C).

10.2 Parametry modelu pro 3D tisk

Model pro 3D tisk byl vytvořen pomocí programu Solidworks a byl uložen ve formátu *STL. Model se skládá z 18784 trojúhelníkových prvků.



Obr. 52: Model prstence rotoru stroje s Halbachovým uspořádáním

Následně byl model pomocí programu Ultimater Cura převeden na konkrétní pokyny pro tiskárnu, takzvaný G-code. Model ve formátu *gcode byl poté vytištěn pomocí tiskárny Creality Ender 3D. Celkový čas pro tisk modelu byl 18 hodin a 36 minut při zachování dostatečné kvality. Bylo spotřebováno 170 g materiálu PLA a 1,6 kWh elektrické energie. Cena materiálu je cca. 68 Kč. Základní parametry modelu jsou přehledně shrnuty v následující tabulce (Tab. 11).

Počet vnějších perimetrů	3
Počet spodních/vrchních pevných vrstev	4
Teplota tisku první vrstvy	205 °C
Teplota tisku ostatních vrstev	195 °C
Teplota tiskové podložky	50 °C
Výplň	20 %
Typ výplně	kubický
Rychlost tisku	60 mm/s
Retrakce	5 mm
Rychlost retrakce	45 mm/s
Ofuk	100 %

Tab. 11: Základní parametry tisku použité pro 3D tisk rotoru

Použitá tiskárna Creality Ender 3 je sestavena z hliníkových profilů. Osa X a Y má lineární vedení pomocí párů gumových koleček. Osa Z je tvořena šroubovicí s trapézovým závitem. Tiskárna disponuje vyhřívanou podložkou, extrudérem s nastavitelným ofukem. Ten je spojen pomocí PTFE trubičky s hotendem, který je ukrytý pod silikonovou krytkou. Maximální využitelný rozměr tiskové plochy je 235x235x270 mm.

10.3 Reálná konstrukce rotoru BLDC stroje s Halbachovým polem

Vhodným návrhem konstrukce rotoru za pomoci 3D tisku je také možno elegantně vyřešit problém s fyzickým uspořádáním permanentních magnetů do Halbachova pole, kdy lze pevným uložením jednotlivých magnetů mechanicky zabránit jejich vzájemnému přitažení/odpuzení. Toho bylo dosaženo vytištěním slotů pro permanentní magnety s přesností na jednu desetinu milimetru. Díky vysokému tření jsou tedy magnety pevně fixovány proti posunutí či vypadnutí. Zajištění lepidlem na bázi epoxidové pryskyřice slouží pouze jako pojistka a zaručuje stoprocentní fixaci polohy magnetů. Po otestování několika variant slotů byly nakonec využity sloty, které jsou pevně spojené tenkou vrstvou vytištěného materiálu i na vnitřním povrchu rotoru. Tato varianta ukázala dvě velké výhody. Za prvé napomáhá pevnosti rotoru a za druhé je zajištěn perfektně homogenní povrch na vnitřním průměru rotoru. Díky tomu je možno snížit velikost vzduchové mezery na minimum.

10.4 Konstrukce klece plastového rotoru

Jako první byla využita již výše popsaná varianta rotoru, kdy všechny sloty magnetů byly vzájemně spojeny plastovou konstrukcí (Obr. 53). Tím byla zajištěna dostatečná tuhost rotoru a také maximální fixace magnetů uvnitř slotů. Nevýhodou této konstrukce je zvětšení vzduchové mezery mezi rotorem a statorem o 0,25 mm vlivem přidaného konstrukčního materiálu. Celý prstenec rotoru tvoří klec pro permanentní magnety. Tento prstenec může fungovat samostatně jako rotor. Pro aplikace s vysokým namáháním rotoru je rovněž možno prstenec vložit do obalu z oceli, hliníku nebo kompozitu, a tím zajistit vyšší pevnost a odolnost rotoru. Tato úprava má minimální vliv na Halbachovo pole a elektromagnetické vlastnosti stroje. Jedná se pouze o mechanické zpevnění konstrukce.



Obr. 53: Plastový rotor částečně osazený permanentními magnety

Po praktickém odzkoušení tohoto funkčního vzorku byla tuhost rotoru shledána jako dostatečná, stejně tak fixace magnetů. Následovala tedy optimalizovaná konstrukce rotoru, kde sloty magnetů jsou tvořeny pouze „kolejnicemi“ po stranách slotů. Tímto konstrukčním uspořádáním bylo dosaženo výrazného zmenšení vzduchové mezery o 0,1 mm. Po prvních testech sejevila i tato konstrukce rotoru jako dostatečně pevná a magnety byly dostatečně zafixovány proti pohybu. Pro další měření byla tedy využívána tato konstrukce, protože lze díky menší vzduchové mezeře očekávat lepší vlastnosti stroje.

10.5 Konstrukční součásti plastového rotoru

První verze funkčního vzorku plastového rotoru byla zkonstruována s využitím konstrukčních částí z rotoru klasické konstrukce. Byl tedy využit shodný konstrukční kříž pro uchycení rotoru na stator a také stejný konstrukční čep pro usazení do ložisek statoru. V následující tabulce (Tab. 12) jsou porovnány základní vlastnosti

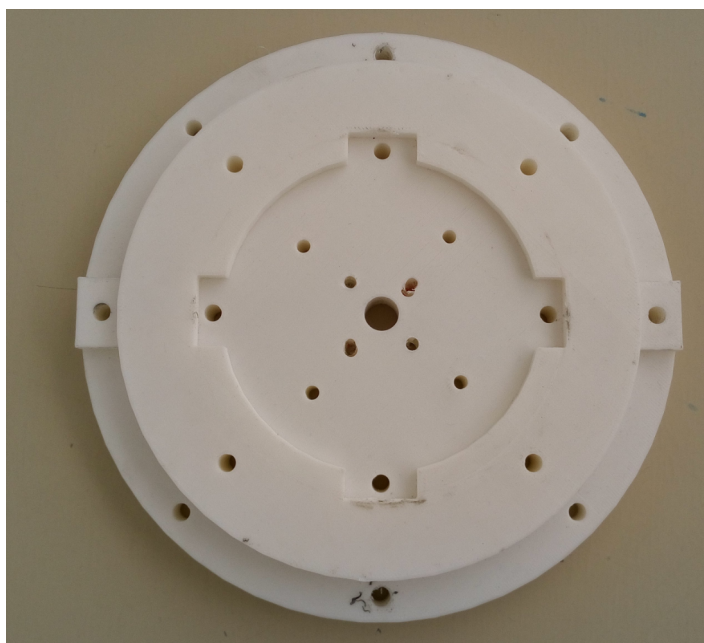
rotoru z feromagnetické oceli a rotoru z nemagnetického materiálu s magnety uspořádanými do Halbachova pole. Oba rotory využívaly stejné konstrukční součásti pro uchycení rotoru na stator. Z tabulky vyplývá výrazné snížení hmotnosti rotoru v případě použití nemagnetického rotoru. Dále pak mírně vyšší účinnost stroje.

	Feromagnetický rotor	Nemagnetický rotor
Indukce ve vzduchové mezeře	0,9	0,86
Počet magnetů	24	48
Rozměry magnetů	40x15x5 mm	40x8x6 mm, 40x10x5 mm
Celková hmotnost magnetů	548 g	720 g
Celková hmotnost rotoru	2779 g	1206 g
Max. pracovní teplota magnetů	80 °C	80 °C
Povrchová úprava magnetů	Ni-Cu-Ni	Ni-Cu-Ni
Magnetizace	N42	N42
Procento pokrytí povrchu rotoru	82 %	87 %
Celková účinnost	94,2 %	95,4 %

Tab. 12: Shrnutí základních parametrů pro oba rotory BLDC stroje

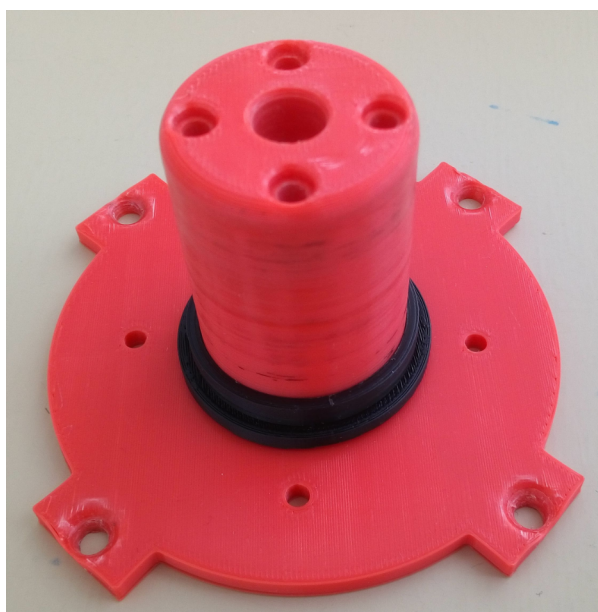
Po ověření základní funkčnosti stroje následoval pokus o nahrazení ocelových konstrukčních součástí konstrukčními součástmi vyrobenými z plastu rovněž použitím metody 3D tisku. Cílem bylo vyrobení kompletního rotoru bez použití jakéhokoli obráběcího stroje. Zároveň by bylo pravděpodobně možno dosáhnout dalšího výrazného snížení hmotnosti rotoru.

Bylo tedy navrženo a vytvořeno plastové čelo rotoru (Obr. 54), které nahrazuje ocelový kříž (Obr. 50). Konstrukce čela je navržena tak, aby byla schopná odolat jak namáhání od permanentních magnetů, tak namáhání, které na čelo působí přenášením točivého momentu stroje.



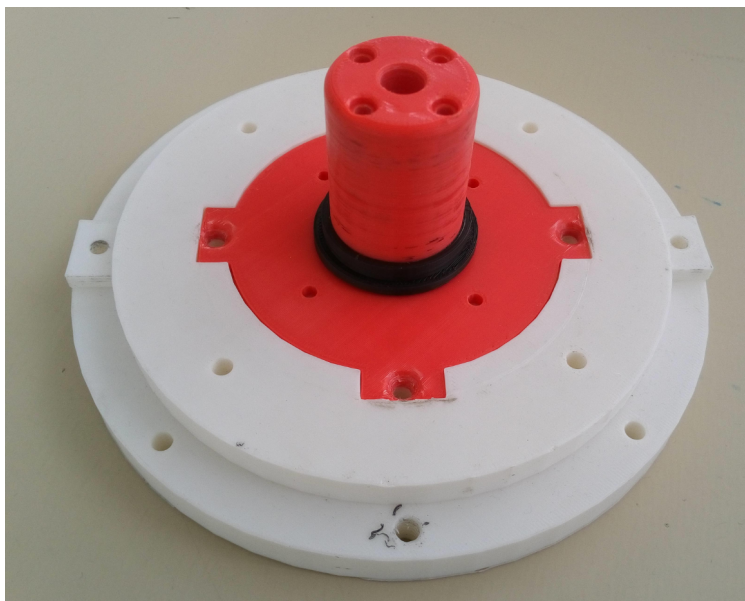
Obr. 54: Čelo rotoru vytištěné z PLA

Do plastového čela rotoru je následně možno vsadit čep, který slouží pro usazení rotoru do ložisek statoru. Čep byl rovněž vyroben z materiálu PLA pomocí 3D tisku (Obr. 55).



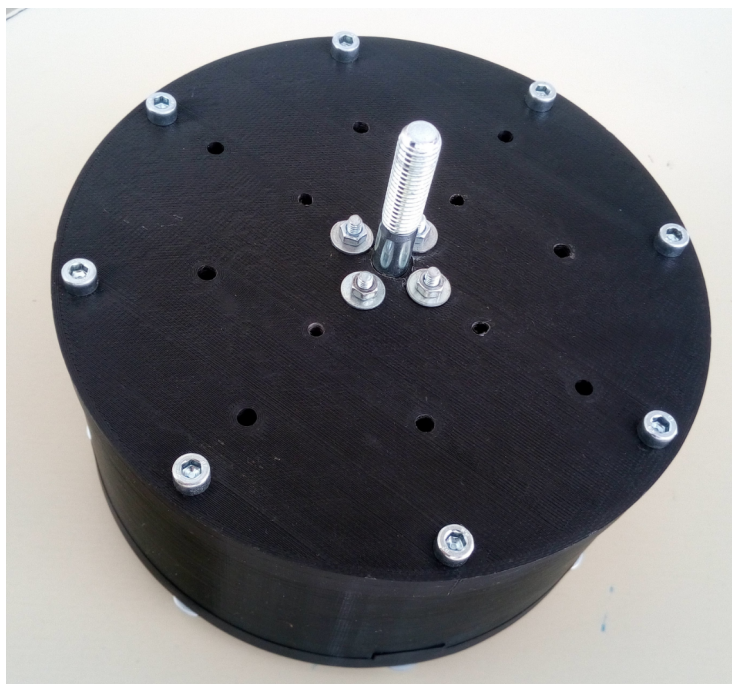
Obr. 55: Plastový čep pro usazení do ložisek statoru

Základna čepu byla navržena tak, aby natěsno lícovala do připraveného otvoru v čele rotoru. Díky kruhovému tvaru s výstupky je čep schopen přenést vysoké namáhání v krutu. Na obrázku (Obr. 56) je vidět sestava čepu a předního čela rotoru. Černá kruhová podložka, která je nasazená na čepu rotoru slouží k vymezení vůle mezi navinutými cívkami statoru a čelem rotoru.



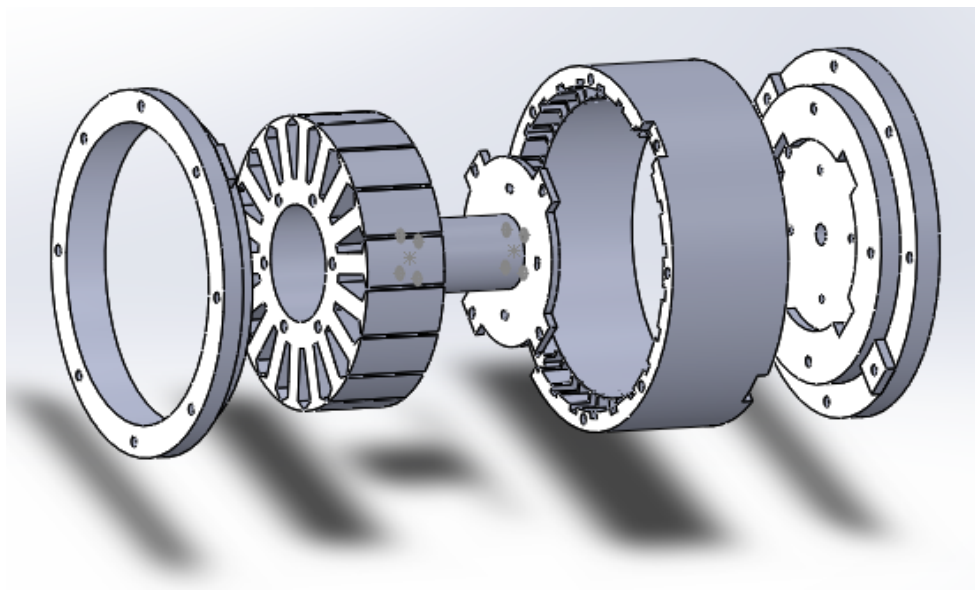
Obr. 56: Sestava čela rotoru s čepem pro uložení do ložisek statoru

Pevnost všech plastových dílů rotoru zajišťuje kombinace dostatečně naddimenzované plastové konstrukce a ocelových šroubů, které napomáhají k přenesení namáhání v krutu, tlaku a tahu. Reálný rotor je zachycen na obrázku (Obr. 57).



Obr. 57: Kompletní plastový rotor vyztužený pomocí ocelových šroubů

Celková sestava rotoru se skládá ze čtyř dílů. Kompletaci sestavy zachycuje obrázek (Obr. 58). Zcela vpravo je přední čelo rotoru, které je zafixováno pomocí obdélníkových výstupků do prstence rotoru (druhý zprava). Do čela rotoru je následně vložen čep rotoru. Pomocí tohoto čepu je celý rotor usazen do ložisek na statoru BLDC stroje. Poslední součástí rotoru je kruhový prstenec (zcela vlevo), který fixuje magnety na rotoru a brání jim v posunu v axiálním směru. Zároveň zajišťuje dostatečnou tuhost prstence rotoru.



Obr. 58: Kompletní sestava plastového BLDC rotoru

Na obrázku sestavy rotoru není vyznačeno 48 kusů permanentních magnetů. Zároveň nejsou vyznačeny šrouby, které zvyšují celkovou odolnost rotoru při přenášení točivého momentu a drží kompletní rotor pohromadě. Díky nahrazení kovových konstrukčních součástí rotoru plastovými se podařilo ušetřit dalších 127 g hmotnosti rotoru. Další nespornou výhodou plastových součástí je jejich velmi nízká cena a jednoduchá vyrobiteľnost bez potřeby obráběcích strojů. Veškerá měření nadále probíhala již s plastovými konstrukčními součástmi rotoru.

11 Reálná měření BLDC stroje s oběma variantami rotorů

Po zkonstruování BLDC motoru s rotorem z materiálu PLA a permanentními magnety v Halbachově uspořádání bylo možno přistoupit k reálným měřením stroje s oběma typy rotorů a jejich vzájemnému porovnání. Pro možnost co nejpřesnějšího vyhodnocení, vzájemného porovnání výsledků a minimalizaci chyby měření byly pro všechna provedená měření použity stejné měřicí přístroje. Přístroje jsou uvedeny v tabulce (Tab.13). Další parametry použitých měřících přístrojů lze dohledat v jejich technických specifikacích v příloze. Měření byla prováděna vždy na stejném místě za dodržení shodných hodnot teploty a vlhkosti okolního prostředí.

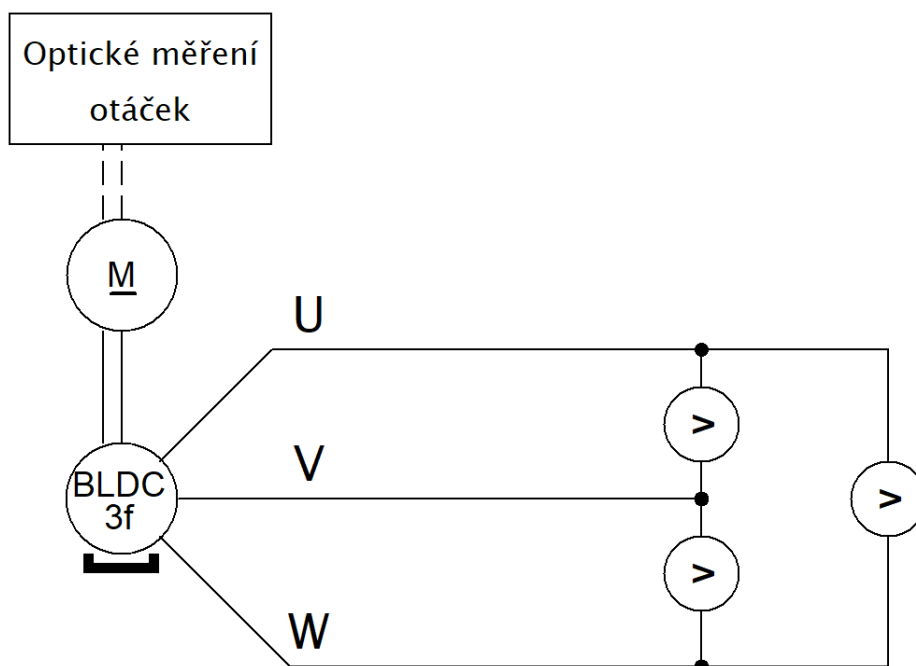
Měřicí přístroj	Měřená veličina	Použitý rozsah
multimetr DT 3343T	napětí TRMS	0 – 600V
klešťový multimetr DT 3343T	proud TRMS	40 A; 400 A
optický měřič otáček DT2234C	otáčky za minutu	0 – 5000 ot./min.
IR teploměr JHK-6606	Teplota	0 – 100 °C

Tab. 13: Seznam použitých měřících přístrojů

Pro zajištění maximální přesnosti a snížení chyby měření byla všechna měření opakována třikrát. Tím byl nashromážděn dostatek dat, aby bylo možno předejít hrubým chybám v měření, které mohly být díky dostatku dat odhaleny a vyloučeny. Po statistickém vyhodnocení měření bylo možno také částečně eliminovat náhodné chyby měření. To bylo provedeno tak, že po odstranění hrubých chyb měření byly naměřené výsledky zprůměrovány. V grafech jsou již zobrazeny hodnoty aritmetických průměrů výsledků.

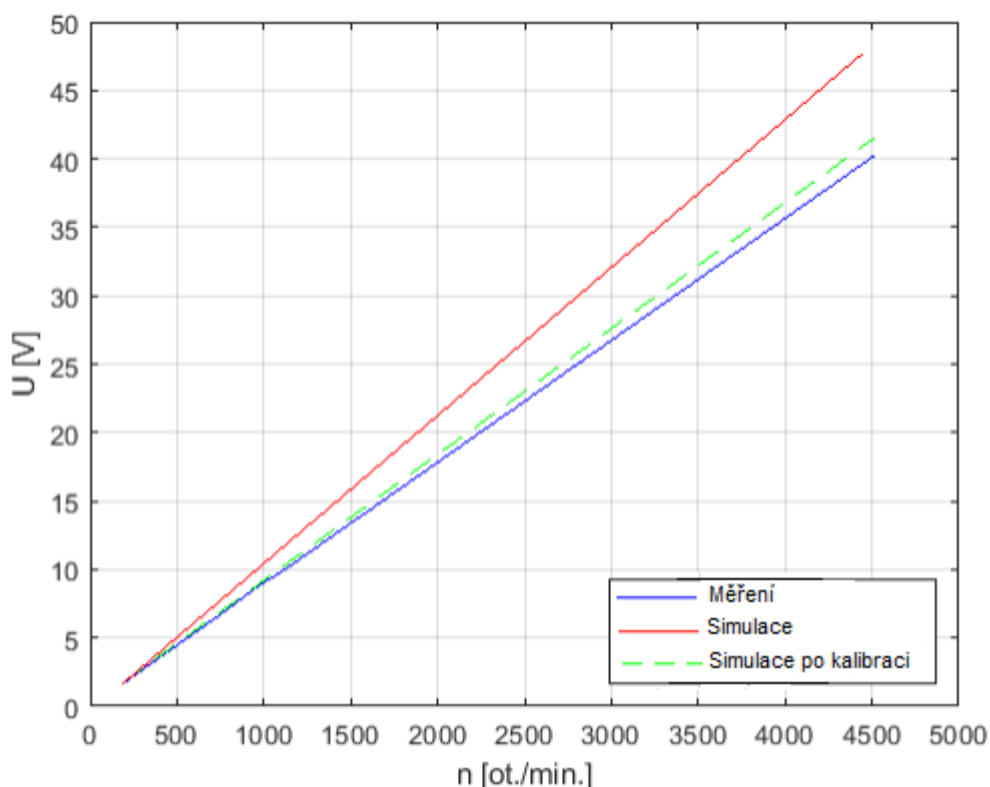
11.1 Měření stroje jako generátoru

Funkční vzorek byl nejprve zapojen a otestován jako elektrický generátor s permanentními magnety, který byl roztáčen pomocí dalšího motoru. Průběh indukovaného napětí uvnitř stroje byl zvolen jako referenční veličina pro ověření správnosti provedených simulací. Na obrázku (Obr. 59) je uvedeno schéma měření. Pro roztáčení funkčního vzorku BLDC stroje byl použit druhý BLDC motor, kterým byl generátor roztáčen. Otáčky soustrojí byly snímány pomocí optického měřiče otáček na společném hřídeli soustrojí.



Obr. 59: Schéma zapojení pro měření stroje jako generátoru naprázdno

V grafu (Obr. 60) je porovnán průběh efektivní hodnoty indukovaného napětí, získaný ze simulace stroje a průběh indukovaného napětí, který byl změřen na reálném stroji s plastovým rotorem a Halbachovým uspořádáním permanentních magnetů.



Obr. 60: Porovnání indukovaného napětí z měření a simulace pro rotor s Halbachovým uspořádáním permanentních magnetů

Z grafu je patrné, že odchylka indukovaného napětí se zvyšuje s nárůstem otáček. Maximální odchylka reálného měření od simulace je 17 % při 4500 ot./min. Na základě tohoto zjištění je možno simulaci dále kalibrovat.

KALIBRACE SIMULACE

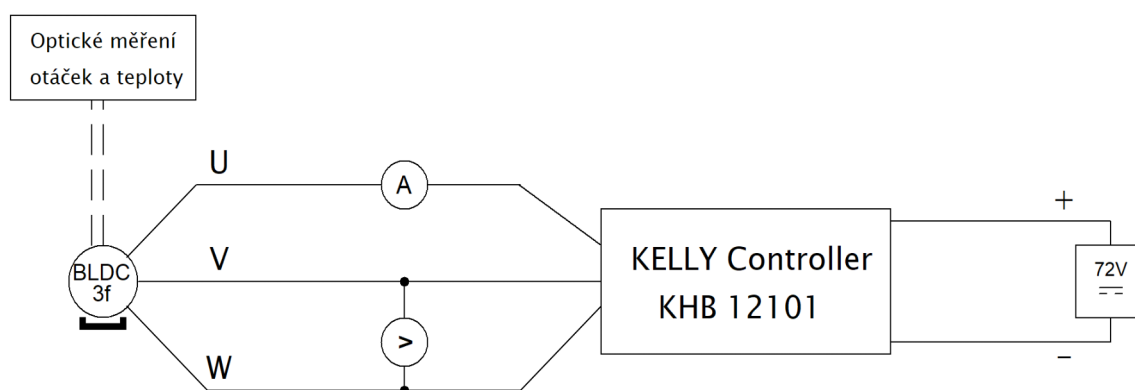
Pro maximální snížení chyby simulace vůči reálnému měření a přiblížení se k reálným výsledkům bylo nutno upravit geometrii modelu stroje pro simulaci. Tolerance rozměrů u rotoru vyrobeného 3D tiskem je 0,2 mm a nelze ji dále snížit, jelikož je dána vlastnostmi 3D tiskárny. V modelu byla proto zvětšena vzduchová mezera mezi státorem a rotorem stroje o 0,2 mm, což odpovídá výrobní toleranci. Dále byla upravena délka statorového paketu, kde bylo měřením paketu zjištěno, že se při výrobě statoru po obrobení svařených plechů statoru snížila o 4 mm. Hodnota funkční délky plechu v modelu proto byla snížena o 4 mm. Díky těmto dvěma úpravám geometrie modelu tak, aby více odpovídal realitě, bylo možno dosáhnout maximální odchylky od skutečně naměřených hodnot pouhé 3 %.

Díky úpravě simulace tedy bylo možno snížit chybu simulací o celých 14 %. Pro porovnání dalších výsledků měření byl nadále využíván zkalibrovaný model stroje, který přinášel velice dobré výsledky. Vzhledem k využití stále stejného statoru i pro variantu rotoru z feromagnetické oceli, bylo možno tento postup kalibrace modelu ověřit na modelu s klasickým rotorem, kde bylo po úpravách dosaženo obdobného zpřesnění výsledků. Postup kalibrace a úpravy geometrie lze tedy považovat za správné.

11.2 Měření stroje jako motoru bez zátěže

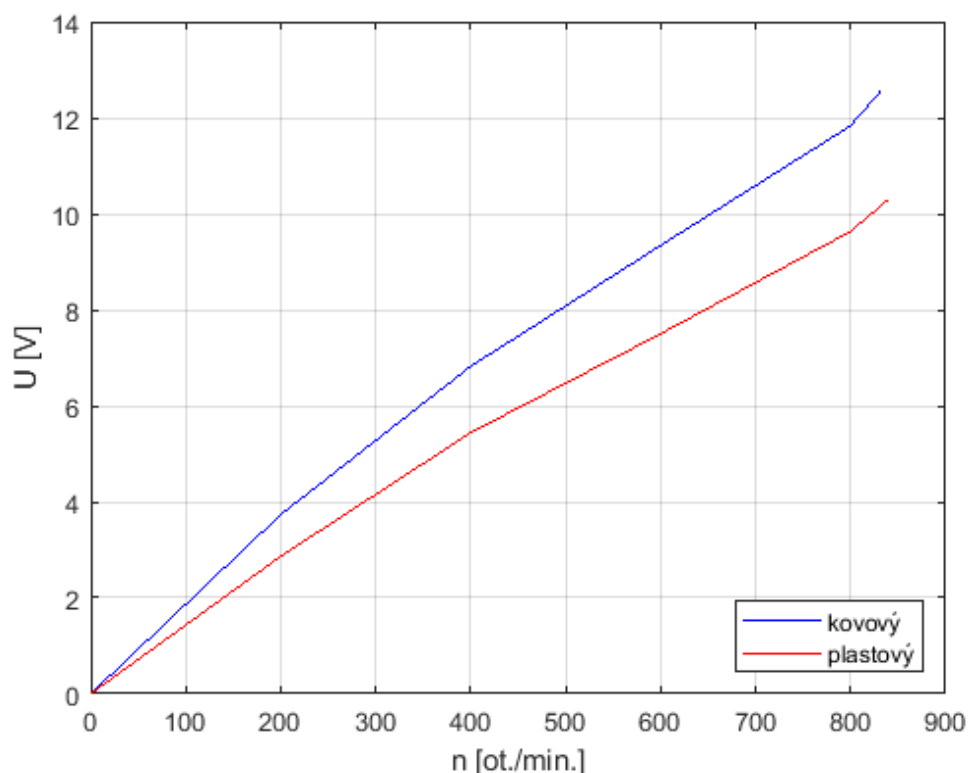
Následovalo měření stroje v zapojení jako motor pro obě varianty rotorů. Nejprve bylo otestováno chování stroje v celém průběhu otáček. Bylo zjištěno, že stroj je v obou variantách bez problému možno provozovat až do 3000 ot./min. I pro takto vysoké otáčky se stroj chová stabilně a nevibruje a to i přes to, že vyvážení rotoru nebyla věnována zvláštní pozornost. První měření probíhala z důvodu bezpečnosti v rozsahu otáček 0 až 900 ot./min.

Pro napájení stroje byla použita lithiová baterie o jmenovitém napětí 72 V. Kontrolér byl použit, jako v předchozích případech, Kelly KHB12401 s šestikrokovou komutací. Motor byl nejprve testován v bezsenzorovém režimu a následně v režimu s Hallovými sondami pro určení polohy rotoru. Oba režimy vykazovaly prakticky shodné výsledky pro měření bez zátěže. Vzhledem k plánovanému použití motoru jako pohonu například letecké vrtule či elektroskútru probíhalo nadále měření se sensorovým řízením. Schéma zapojení pro měření stroje jako motoru je zobrazeno na obrázku (Obr. 61).



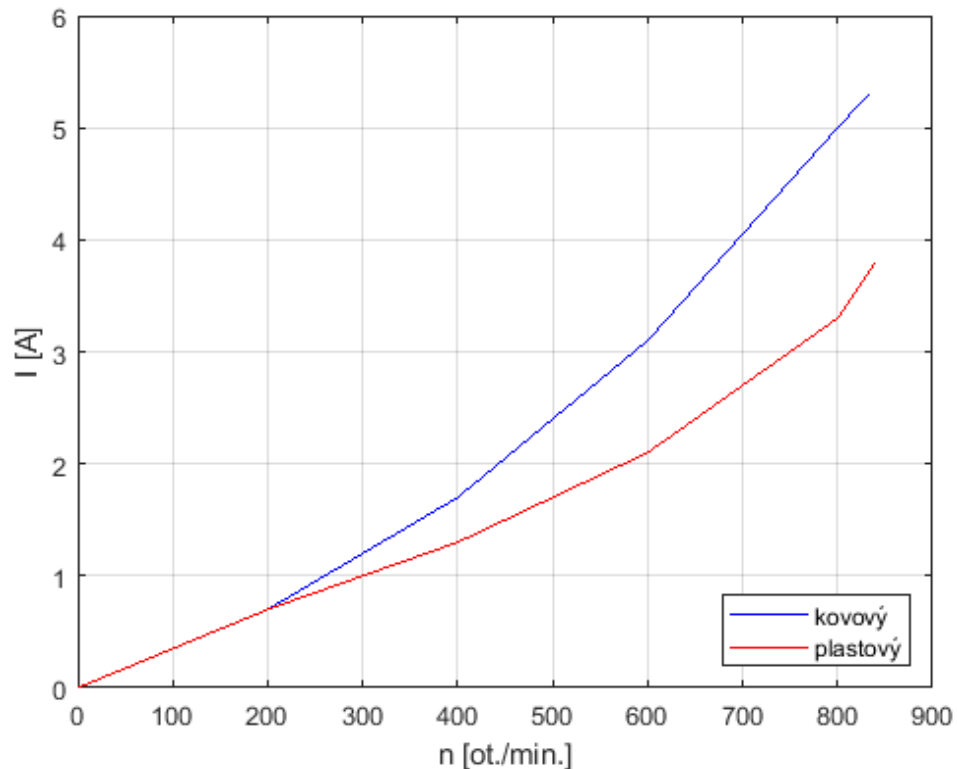
Obr. 61: Schéma zapojení pro měření stroje jako motoru

Nejprve byl otestován průběh otáček v závislosti na statorovém napětí BLDC stroje. To odpovídalo simulacím a teoretickým předpokladům. Napětí lineárně vzrůstalo v závislosti na otáčkách. Průběh statorového napětí pro obě varianty rotorů zobrazuje graf (Obr. 62).



Obr. 62: Průběh statorového napětí pro jednotlivé typy rotorů

Dále byl změřen fázový proud naprázdno tekoucí do motoru v závislosti na otáčkách. Průběh tohoto proudu je zobrazen v grafu (Obr. 63). Proud tekoucí motorem bez zátěže slouží ke krytí ztrát v motoru. Pro rychlost otáčení 3150 ot./min. dosahují ztráty ve stroji hodnot kolem 300 W. Tato hodnota je pro BLDC stroje s obdobnou konstrukcí a výkonem odpovídající.



Obr. 63: Průběh proudu naprázdno pro jednotlivé typy rotorů

11.3 Měření stroje jako motoru se zátěží

Po úspěšném otestování funkčnosti motoru následovalo měření stroje se zátěží. Zátěž stroje byla realizována pomocí druhého BLDC motoru o jmenovitém výkonu 2,5 kW.

Tento motor byl provozován v generátorickém režimu. Kroučící moment měřeného motoru byl na hřídel generátoru přenášen pomocí dvou shodných řemenic a ozubeného řemenu. Napětí indukované na svorkách generátoru bylo následně pomocí třífázového můstku usměrněno a připojeno na 12 V baterii, která sloužila jako zátěž.

V této konfiguraci bylo dosaženo maximálního dobíjecího výkonu na baterii 205 W pro rychlost motoru 1000 ot./min. Tyto hodnoty odpovídají momentu na hřídeli téměř 2 Nm. Oteplení stroje bylo minimální a teplota uvnitř vinutí se pohybovala do 40 °C.

Dále následovalo měření motoru pro větší zátěž. Byly tedy navýšeny otáčky stroje až

na cca. 1870 ot./min. Bohužel při zvýšeném zatížení v cca. 20 minutovém provozu došlo vlivem oteplení stroje k měknutí a postupné deformaci slotů, které drží permanentní magnety. Materiál PLA, použitý pro funkční vzorek rotoru, má totiž nízkou operační teplotu cca. 50 °C. Již výrazně pod touto teplotou (od cca. 38 °C) však materiál začíná měknout a ztrácí svoji pevnost. Vlivem měknutí došlo po zastavení rotoru k tomu, že přitažlivá síla permanentních magnetů překonala pevnost slotů a magnety se přichytily na zuby statoru.

S nízkou teplotní odolností materiálu PLA bylo od začátku počítáno a tento materiál měl sloužit pouze k vytvoření a následnému otestování konstrukce prvních funkčních vzorků stroje. Velkou výhodou materiálu PLA je totiž jeho snadná dostupnost, velice jednoduchá tisknutelnost i v domácích podmínkách a v neposlední řadě biologická odbouratelnost.

11.4 Další verze funkčního vzorku BLDC stroje s plastovým rotorem

Pro skutečně funkční BLDC stroje s permanentními magnety je vhodnější použít některý z materiálů s vyšší teplotní odolností například PETG, ABS nebo ASA. Tyto materiály jsou odolné teplotám, blížícím se až 100 °C. Dalším velice vhodným materiálem pro výrobu plastového rotoru by byl například polykarbonát, který je velice pevný a odolný vysokým teplotám. To je však spojeno s obtížnější tisknutelností. Pro tento materiál by tak bylo vhodnější zvolit jinou metodu zpracování například vstřikováním či lisováním.

Po zvážení konstrukčních možností jsem se rozhodl pro tisk prstence rotoru z materiálu PETG. Tento materiál se vyznačuje jednoduchou tisknutelností a zároveň slušnou pevností a odolností. Tvarová stálost materiálu PETG je udávána minimálně do teploty 70 °C. [6]

Přední i zadní čelo rotoru bude zkonstruováno z materiálu PLA, protože tento materiál má vyšší tuhost a u těchto konstrukčních částí není potřeba tak vysoká teplotní odolnost. Dále bude upravena geometrie prstence rotoru tak, aby odolal větším teplotám

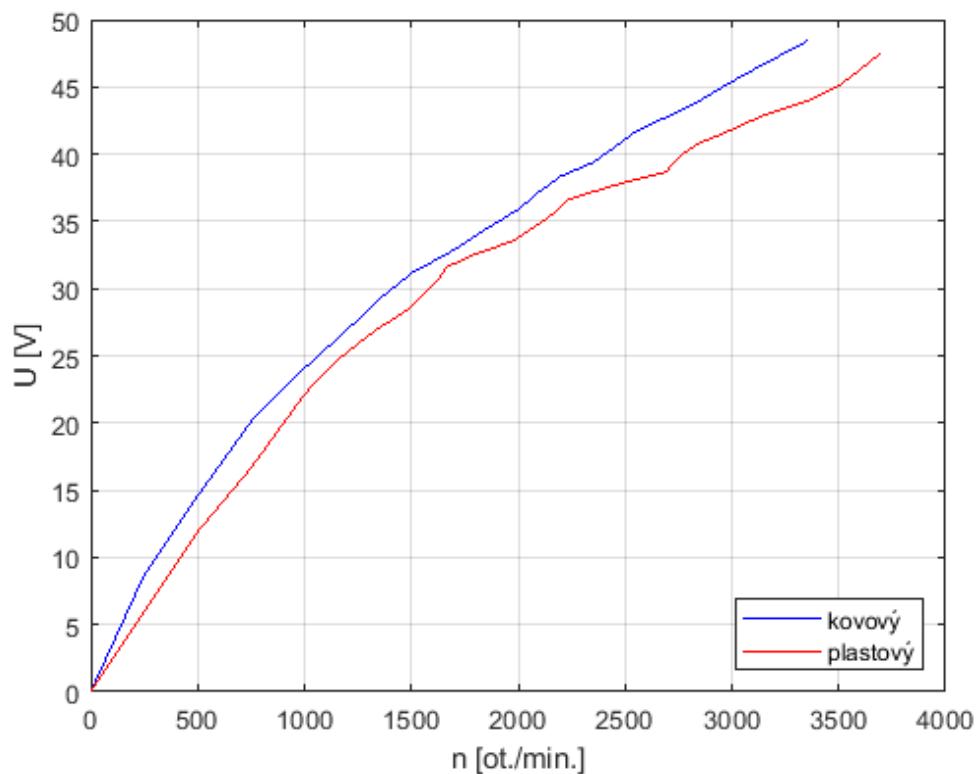
a nedošlo k poškození slotů pro uložení magnetů. Konstrukce tedy byla upravena opět na jednodušší propojení všech slotů plastovou vrstvou 0,2 mm. Tato konstrukce zajišťuje výrazně větší odolnost proti působení přitažlivé síly magnetů k železu statoru. Zároveň jsou magnety díky větší třecí ploše dostatečně pevně fixovány uvnitř slotů. Díky této konstrukci je proto možné nepoužít pro fixaci magnetů lepidlo. Magnety jsou na rotoru fixovány pouze třecí silou uvnitř slotů a zadním čelem rotoru, které brání jejich posuvu v axiálním směru. Díky absenci lepidla je možno ušetřit hmotnost, jednodušeji zautomatizovat výrobní proces (není potřeba čekat na vytvrnutí lepidla) a také je v případě potřeby možno rotor jednoduše rozebrat a vyměnit například pouze jeden poškozený magnet.

11.5 Měření stroje s vrtulovou zátěží

Vzhledem k tomu, že konstrukce plastového rotoru je výrazně lehčí než rotor s ocelovou konstrukcí, jeví se jeho použití velmi vhodné v letectví, kde hraje hmotnost komponentů velmi důležitou roli. Pro další měření byla tedy zvolena zátěž pomocí letecké vrtule 26x12“.

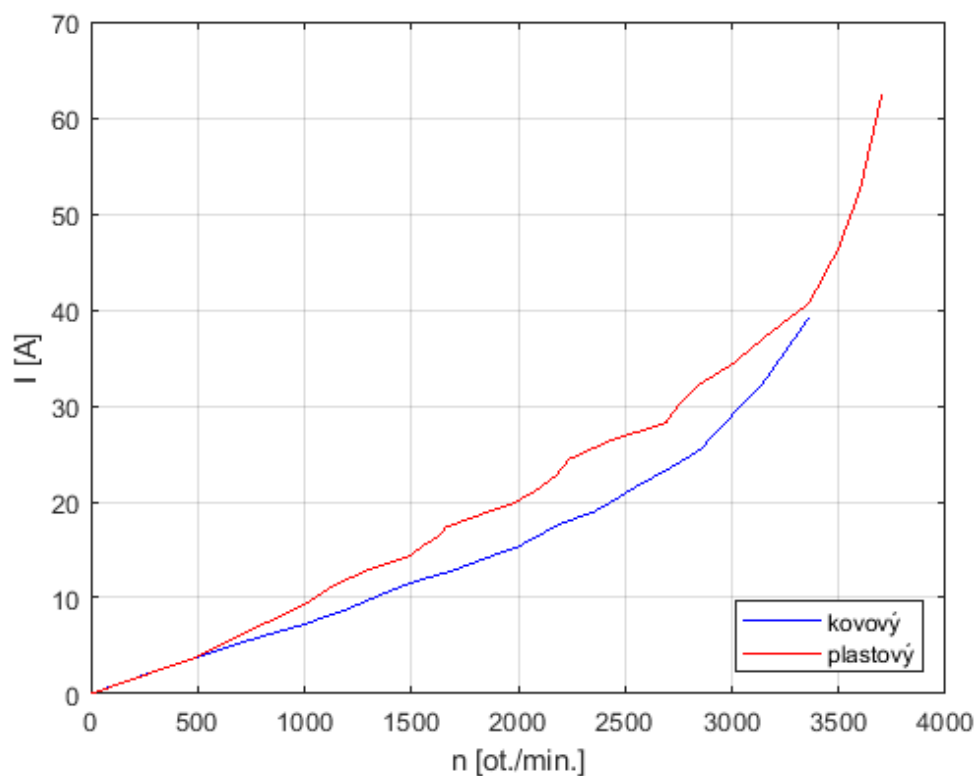
Měření probíhala vždy na stejném BLDC statoru nejprve pro rotor z feromagnetické oceli, a poté probíhalo stejné měření pro rotor s konstrukcí z plastu s Halbachovým polem. Všechny použité měřicí přístroje (TRMS multimetr, otáčkoměr...) byly stejné pro všechna měření. Tím byla zaručena odpovídající přesnost a výpovědní schopnost měření.

Graf (Obr. 64) zobrazuje průběh napájecího napětí v závislosti na otáčkách. Rozdíl napájecího napětí odpovídá velikosti rozdílu indukovaného napětí. Pro stroj s plastovým rotorem stačí vzhledem k nižšímu indukovanému napětí nižší napájecí napětí o 8 % pro 3000 ot./min.



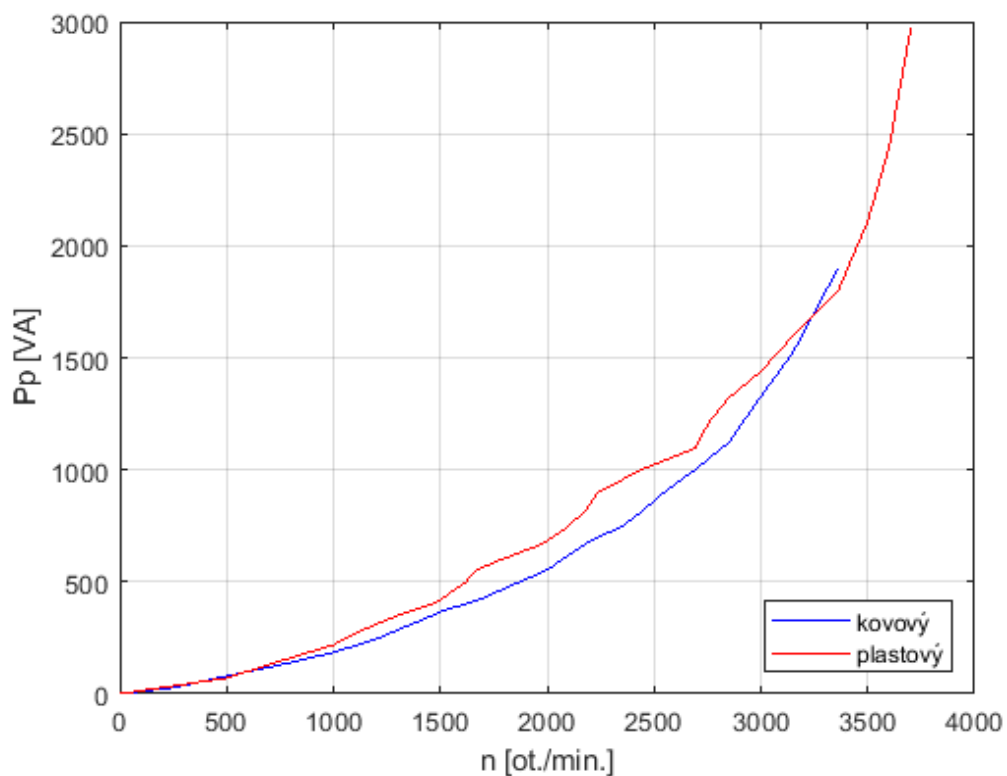
Obr. 64: Napětí stroje v závislosti na otáčkách vrtule

Další provedené měření bylo měření fázového proudu (Obr. 65). Měření opět probíhalo pro stroj s rotorem z feromagnetické oceli a poté s plastovým rotorem. Naměřené hodnoty proudu odpovídají hodnotám získaným ze simulací. Rozdíl v proudu pro 3000 ot./min. je 16 %.



Obr. 65: Fázový proud stroje v závislosti na otáčkách vrtule

Další měření, provedené s leteckou vrtulí, bylo měření příkonu BLDC stroje. Toto měření nejlépe ilustruje rozdíl mezi kovovým a plastovým rotorem vzhledem k tomu, že bere v úvahu hodnotu napájecího napětí i fázového proudu. Odchylka příkonu mezi kovovým a plastovým rotorem se pohybuje mezi 8-14 % (Obr. 66).



Obr. 66: Příkon stroje v závislosti na otáčkách vrtule

11.6 Shrnutí měření s vrtulí

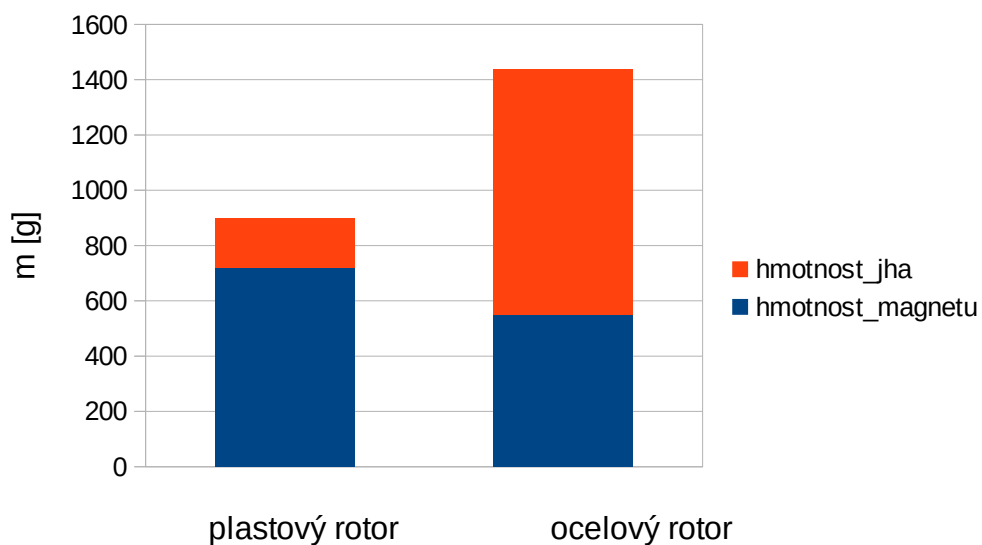
Měřením s vrtulí bylo otestováno chování funkčních vzorků stroje v reálné aplikaci. Měření potvrdilo hypotézy získané pomocí simulací strojů. Stroj s plastovým rotorem a magnety s Halbachovým uspořádáním disponuje v rozmezí pracovních otáček (0-4000 ot./min.) o 8-14 % nižším výkonem/momentem oproti stroji s kovovým rotorem. Naproti tomu, plastová konstrukce rotoru může být výrazně jednodušší a levnější na výrobu. Účinnost strojů nebyla ověřena praktickým měřením, ale z výsledků simulací vyplývá, že je prakticky shodná. Přesněji je pro plastový rotor o několik desetin procenta vyšší.

Subjektivně je chování stroje s plastovým rotorem lepší. Stroj je méně hlasitý, nevibruje a běží klidněji než s ocelovým rotorem. To je pravděpodobně způsobeno sinusovějším průběhem indukovaného napětí od permanentních magnetů, které je dáno Halbachovým uspořádáním magnetů (viz grafy v kapitole 5), a také lepšími dynamickými vlastnostmi BLDC stroje, které jsou dány výrazně nižší hmotností plastového rotoru. Snížená hmotnost je důležitá zejména pro aplikace, kde hraje hmotnost klíčovou roli - například letectví. V tabulce (Tab. 14) je porovnání hmotnosti prstence rotoru u měřeného BLDC stroje. Hmotnost plastového rotoru je snížena o 39 % a to i přesto, že je plastový rotor konstruován výrazně robustnější, než rotor kovový.

	Ocel	PETG	násobek
Hmotnost prstence rotoru	890 g	180 g	4.95
Hmotnost magnetů	548 g	720 g	0.76
Celková hmotnost	1438 g	900 g	1.60

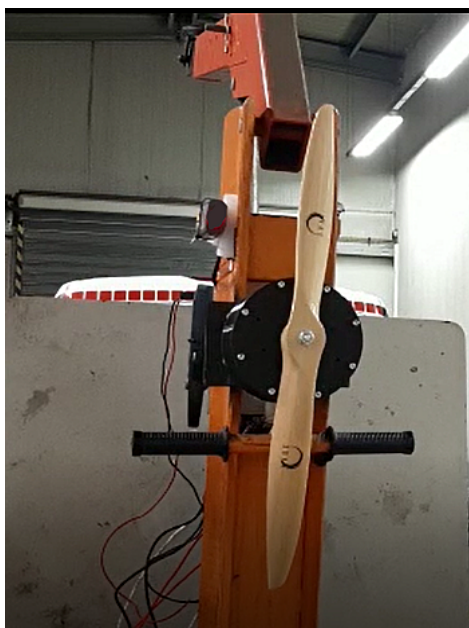
Tab. 14: Porovnání hmotností plastového a ocelového rotoru

Výsledky z tabulky jsou dále zobrazeny pro lepší představu v grafu (Obr. 67).



Obr. 67: Porovnání hmotností plastového a ocelového rotoru

Pevnost plastového rotoru byla experimentálními měřeními dostatečně ověřena a vyhověla. Stroj s plastovým rotorem byl schopen snést zatížení pomocí vrtule 26x12“ až do 4000 ot./min. bez jakéhokoli náznaku problému. Bylo tedy prakticky ověřeno, že je možno navrhnout plastový rotor dostatečně nadimenzovaný, aby snesl požadovanou zátěž, pro kterou byl navržen.



Obr. 68: Měřicí stanoviště stoje s vrtulí

12 Shrnutí výsledků a závěr

V této dizertační práci jsem se věnoval velmi aktuálnímu tématu BLDC motorů. Zaměřil jsem se na, v praxi zřídka používanou, konstrukci s Halbachovým polem na rotoru. Za hlavní přínos práce považuji, že se mně podařilo vyvinout a realizovat funkční vzorek BLDC stroje s originální klecovou konstrukcí rotoru, kompletně dle vlastního návrhu z neferomagnetického materiálu - plastu. Unikátnost této plastové konstrukce je ve velmi jednoduché vyrobiteľnosti, nižší ceně a výrazné úspoře hmotnosti výsledného stroje. Vlastnosti realizovaného motoru byly ověřeny měřeními a porovnány se strojem klasické konstrukce. Na základě velice zajímavých výsledků této dizertační práce bylo požádáno o udělení patentové ochrany pro vytvořený prototyp stroje. Předmětem patentu je mimo celkové konstrukce zejména mnou vyvinutá plastová klec pro umístění permanentních magnetů do Halbachova uspořádání, která zajišťuje velice jednoduchou montáž magnetů a vyrobiteľnost rotoru s Halbachovým polem pro libovolnou velikost a výkon BLDC motoru. Pomocí klece je možno realizovat Halbachovo pole z permanentních magnetů standardního kvádrového tvaru. Díky tomu je výrazně zjednodušena a zefektivněna případná změna rozměrů výsledného stroje dle požadavků.

V úvodní části práce se nachází souhrn současných znalostí a běžně používaných technologií pro konstrukci BLDC motorů a generátorů. V kapitole byly shrnuty základní typy konstrukcí, řízení těchto strojů a současný vývoj problematiky. Byla zde také zpracována rešerše a souhrn moderních technologií využívaných pro výrobu motorů, jako je 3D tisk, tištění vinutí strojů a využití Halbachova pole. V následujících kapitolách byly podrobněji popsány jednotlivé technologické celky BLDC motorů včetně používaných materiálů a technologií výroby. Tyto kapitoly mohou sloužit jako stručný návod při stavbě BLDC strojů.

Nabyté zkušenosti z předchozích kapitol byly následně zužitkovány v hlavní části dizertační práce. Hlavním cílem mého snažení bylo reálně zkonstruovat funkční BLDC motor, na kterém bude možno porovnat dvě varianty rotoru a to oběžný rotor klasické konstrukce se jhem z feromagnetické oceli a také oběžný rotor s magnety uspořádanými do tvaru Halbachova pole, který je vyroben, dle mého vlastního návrhu, z nemagnetického

materiálu – plastu. Velice zajímavá je technologie výroby komponentů tohoto rotoru, protože byla využita metoda 3D tisku. Všechny konstrukční součásti rotoru s Halbachovým polem byly vyrobeny z plastu metodou 3D tisku. Všechny součásti byly navrženy a zkonstruovány tak, aby odolaly vysokému mechanickému namáhání při reálném provozu a zároveň byl celý rotor opakovaně rozebíratelný. Díky tomu bylo možno prakticky ověřit, zda stroj s Halbachovým polem bez použití feromagnetického jádra, je schopen konkurovat standardní konstrukci BLDC stroje z pohledu náročnosti výroby, ceny a užitných vlastností.

Návrh stroje byl proveden dle standardně používané literatury a verifikován za pomoci FEM simulací. Byly provedeny simulace pro různé procentuální pokrytí povrchu rotoru permanentními magnety a různé tloušťky jha. Pro stroj s Halbachovým polem byla pomocí simulací určena nejvhodnější kombinace velikostí magnetů s podélnou i příčnou magnetizací. Velice zajímavé pro další zkoumání se jeví zjištění, že rozdílné šířky a výšky magnetů s oběma typy magnetizace mají výrazný vliv na magnetické pole uvnitř motoru, a tím na výsledný točivý moment. Při použití magnetů s rozdílnou výškou bylo možno dosáhnout úspory hmotnosti magnetů až 38 % při snížení momentu pouze o 7,5 % oproti všem magnetům se stejnou výškou. Tvar a kombinace rozměrů permanentních magnetů v Halbachově poli vzhledem k výslednému chování stroje se jeví jako velmi zajímavé téma pro pokračování výzkumu.

Po otestování simulací byly vybrány nejvhodnější varianty rotorů z pohledu elektrických a mechanických vlastností a také ceny a dostupnosti magnetů. Simulacemi bylo dále zjištěno, že plastový rotor by měl dosahovat zhruba o 15 % nižšího indukovaného napětí, momentu a výkonu. Velmi zajímavé je však zjištění, že pulzační moment stroje poklesne více než třikrát v porovnání se strojem standardní konstrukce. Účinnost obou strojů je téměř totožná. Stroj s Halbachovým uspořádáním vykazuje v celém provozním rozsahu účinnost mírně vyšší. Toto je dáno zejména nižšími ztrátami v železe. Tento rozdíl vzniká absencí železa na rotoru a tudíž rozdílnému směru uzavírání magnetického toku ve stroji. Celková účinnost stroje je vyšší v řádu desetin procent.

Kovový rotor byl vysoustružen z feromagnetické oceli a osazen magnety, které bylo nutno na povrch rotoru zafixovat pomocí epoxidového lepidla. Komponenty plastového rotoru byly vytištěny na 3D tiskárně a osazeny magnety uspořádanými do Halbachova pole. Magnety v plastových slotech drží bez použití lepidla díky unikátní konstrukci klece rotoru s vysokou přesností. Plastový rotor je tedy výrazně méně časově náročný na výrobu.

Díky využití stále stejného statoru, všech měřících přístrojů a použité zátěže byla zajištěna vysoká výpovědní schopnost provedených měření. Nejprve bylo provedeno měření BLDC stroje v generátorickém režimu s oběma variantami rotorů. Maximální odchylka indukovaného napětí mezi naměřenými hodnotami a hodnotami získanými ze simulací byla 17 %.

Následnou kalibrací modelu, byla maximální odchylka mezi simulací a naměřenými hodnotami snížena na pouhých 3 %. Nadále byl pro simulace využíván kalibrovaný model stroje, který korespondoval s reálnými hodnotami s odchylkou v řádu jednotek procent. Díky tomu bylo možno předvídat s vysokou přesností chování stroje vždy již před začátkem měření.

První měření BLDC motoru s plastovým rotorem pod zátěží odhalila konstrukční nedostatky rotoru. Rotor z materiálu PLA nebyl schopen odolat provoznímu zahřívání. Po několika nepříliš úspěšných konstrukčních úpravách bylo jasné, že je materiál rotoru nutno změnit. Další funkční vzorek byl proto vytištěn z odolnějšího materiálu PETG a byly provedeny konstrukční úpravy pro zvýšení teplotní a mechanické odolnosti rotoru.

Vzhledem k výrazně nižší hmotnosti plastového rotoru se jeví použití stroje s plastovým rotorem jako velmi vhodná varianta pro letectví. Následující měření byla proto po dohodě s vedoucím práce realizována se zátěží v podobě letecké vrtule 26x12“. Měření probíhala pro obě varianty rotorů do 4000 ot./min. Výsledky měření ukázaly, že stroj s plastovým rotorem dosahuje v průběhu pracovních otáček o 7-11 % nižšího výkonu/momentu vzhledem ke stroji s kovovým rotorem. Hmotnost plastového rotoru je však oproti rotoru s permanentními magnety o celých 38 % nižší (tj. o více než 0,5 kg).

Díky nižší hmotnosti má plastový rotor výrazně lepší dynamické vlastnosti a chování motoru s plastovým rotorem je znatelně klidnější oproti stroji s rotorem kovovým. Toto bylo ověřeno provedením simulací pulzačního momentu. Stroj s plastovým rotorem s Halbachovým polem vykazuje více než třikrát nižší pulzační moment a také hladší průběh indukovaného napětí.

Naměřené hodnoty potvrdily optimistické odhady získané ze simulací. Z výsledků je patrné, že snížení výkonu o pouhých 10 % je vykompenzováno snížením hmotnosti rotoru o více než jednu třetinu. Dále byla měřením s vrtulí experimentálně ověřena vysoká odolnost vyvinuté konstrukce plastového rotoru, která bez problémů opakovaně odolala rychlosti přes 4000 ot./min. s vrtulí, jejíž obvodová rychlost přesahovala 460 km/h. U motoru bylo možno krátkodobě dosáhnout na výkon více než 5 kW a točivý moment více než 15 Nm.

Jak již bylo zmíněno, snížení hmotnosti motorů je pro určité aplikace naprosto klíčové. Zejména u vícemotorových strojů (drony, vícemotorová letadla...) bude možno dosáhnout výrazného snížení hmotnosti, a tím pádem lepší klouzavosti, snížení spotřeby paliva nebo delší výdrže baterie, vyšší nosnosti a lepší ovladatelnosti. Další velkou výhodou plastové konstrukce rotoru s Halbachovým polem je jeho velmi jednoduchá výroba a s tím spojené snížení výrobních nákladů.

Díky unikátní klecové konstrukci plastového rotoru, kde není potřeba magnety na rotor uchycovat lepením, je možno proces výroby rotoru výrazně urychlit a automatizovat, což vede k dalšímu snížení ceny výsledného produktu. Vyvinutá modulární konstrukce BLDC rotoru s Halbachovým polem také umožňuje pohodlné nahrazení jakékoli poškozené součásti rotoru (např. výměna vadného magnetu). Na výrobu plastového rotoru navíc není potřeba žádného obráběcího stroje. Celý stroj s Halbachovým rotorem, zejména unikátní klecová konstrukce tvořící Halbachovo pole, byla přihlášena k patentování. Vývoj BLDC motoru s plastovou klecí a uspořádáním magnetů do Halbachova pole bude nadále pokračovat s cílem realizovat komerční výrobu stroje s klecovou konstrukcí Halbachova pole. Praktickými testy totiž bylo ověřeno, že výsledný motor může být v leteckých aplikacích levnější a lehčí alternativou ke stávajícím BLDC strojům.

Z výše uvedených důvodů považuji výsledky této dizertační práce za velice zajímavé a přínosné. Vzhledem k velmi dobrým výsledkům měření s vrtulí a vzniku unikátní patentově chráněné konstrukce považuji vytyčené cíle práce za maximálně splněné. Logickým pokračováním práce se jeví celková optimalizace stroje, optimalizace rozměrů permanentních magnetů tvořících Halbachovo pole i s využitím nestandardních rozměrů permanentních magnetů, otestování kvalitnějších materiálů pro výrobu plastového rotoru a příprava procesu pro sériovou výrobu stroje.

Seznam souvisejících publikací autora

- [1] BLOHMANN, M. Stroj s permanentními magnety a spínaným tokem. In *Elektrotechnika a informatika 2015. Elektrotechnika, elektronika, elektroenergetika*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2015. s. 17-20. ISBN: 978-80-261-0514-5
- [2] BLOHMANN, M. Upgrade 18 kW sensorless BLDC machine prototype to the hall-sensor controlled BLDC machine. In *18th International Conference Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE) : /USB proceedings/*. Pilsen: University of West Bohemia, 2017. s. 1-4. ISBN: neuvedeno
- [3] BLOHMANN, M., KARBAN, P., DOLEŽEL, I., Structural Optimization of BLDC Machine and its Control. In *International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering*. Nancy: "Prouvé Congress Center" of Nancy., 2019 ISBN: neuvedeno
- [4] BLOHMANN, M., KARBAN, P., Structural Optimization of BLDC Brushless motor with printed rotor with Halbach array. In *European Seminar on Computing 2022*. Pilsen, 2022 ISBN: neuvedeno
- [5] Patent „Elektrický stroj s permanentními magnety v Halbachově uspořádání“, přihláška podána v Plzni 06/2021. Přihláška vynálezu č.j. PV 2021 - 320.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] HRABOVCOVÁ, V. JANOUŠEK, L. RAFAJDUS, P. LIČKO, M. Moderné elektrické stroje. Žilina: Žilinská univerzita, 2001. 265 s. ISBN 80-7100-809-5
- [2] D. HANSELMAN, Brushless Permanent-Magnet Motor Design. McGraw-Hill, 1994, ISBN 1932133631
- [3] MEVEY James Robert, Sensorless Field Oriented control of Brushless Permanent Magnet synchronous Motors. Master's thesis, Kansas State University, 2006
Dostupné z: <http://krex.k-state.edu/dspace/bitstream/handle/2097/1507/JamesMevey2009.pdf;jsessionid=B16B37FE9CE03ADA965151D6EDE03DF0?sequence=1#page=274&zoom=100,0,136>
- [4] *Homebuild electric motors, Bavaria Direct* [online]. 2013 [cit. 2019-03-09]. Dostupné z: <http://www.bavaria-direct.co.za/>
- [5] *Pure Flight Solution* [online]. 2018 [cit. 2019-03-09]. Dostupné z: <http://www.pure-flight.cz/>
- [6] *BLDC Motor fundamentals: Monolithic Power Systems* [online]. 2018 [cit. 2019-03-09]. Dostupné z: https://www.monolithicpower.com/pub/media/document/Brushless_DC_Motor_Fundamentals.pdf
- [7] C. Oprea, C. Martis and B. Karoly, "Six-phase brushless DC motor for fault tolerant electric power steering systems," 2007 International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics, Bodrum, 2007, pp. 457-462.
doi: 10.1109/ACEMP.2007.4510543
URL:<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4510543&isnumber=4510466>
- [8] KUČEROVÁ, Eva. *Elektrotechnické materiály*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2002. ISBN 80-7082-940-0.
- [9] BARTOŠ, Václav, Josef ČERVENÝ, Josef HRUŠKA, Anna KOTLANOVÁ a Bohumil SKALA. Elektrické stroje. 1. vyd. Plzeň: ZČU v Plzni, 2006.
- [10] Technické normy ČSN, Dostupné z: http://www.technicke-normy-csn.cz/420234-csn-en-10106_4_42376.html
- [11] Kovintrade s.r.o. - Plechy a pásy pro elektrotechniku (DYNAMO). *Kovintrade s.r.o.* [online].
- [12] Dostupné z: <https://ostrava.arcelormittal.com/>
- [13] Vysoké učení technické v Brně [online]. Copyright © [cit. 04.04.2017].
Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=27791

- [14] Rotor and Stator Stacks for 120mm Brushless Motors. *Yuma Laminations| Lamination Stacks|Motor Cores* [online]. Copyright © 2016 AMPLE ARCHITECTURAL TILE LIMITED. All rights reserved. [cit. 04.04.2017].
Dostupné z: <http://www.yumalaminations.com/rotor-stacks-for-brushless-motors/120mm-brushless-motors-1.html>
- [15] Transformer sheets - Low-waste EI lamination cores. *ERICH GRAU GMBH Stanztechnik - Stanzwerk Elektrobleche - Sersheim, Baden-Württemberg* [online].
Dostupné z: <http://www.grau-stanzwerk.de/e/produkte/ei-kernbleche-abfallarm.php>
- [16] Dostupné z: <http://mit.imt.si/Revija/izvodi/mit106/steiner.pdf>
- [17] CIGÁNEK, Ladislav. Stavba elektrických strojů: Celost. vysokošk. učebnice. 1. vyd. Praha: SNTL, 1958, 714 s.
- [18] KOPYLOV, Igor Petrovič. Stavba elektrických strojů. Praha: SNLT, 1988, 688 s.
- [19] BARTOŠ, Václav, Josef ČERVENÝ, Josef HRUŠKA, Anna KOTLANOVÁ a Bohumil SKALA. Elektrické stroje. 1. vyd. Plzeň: ZČU v Plzni, 2006.
- [20] DIY Electric Car, Masina electrica ro. *DIY Electric Car, Masina electrica ro* [online]. Copyright © 2010 DIY Electric Car, Masina electrica ro. All Rights Reserved. Greyzed Theme created by [cit. 04.04.2017].
Dostupné z: <http://www.masinaelectrica.com/>
- [21] Neodymové magnety, Neodymový magnet Praha. *ABC MAGNET - trvalé magnety a magnetické výrobky* [online]. Copyright © 2012 ABC MAGNET s.r.o. [cit. 04.04.2017].
Dostupné z: <http://www.abcmagnet.cz/druhy-magnetu.php?druh=neodymove-magnety>
- [22] Experts in magnetics - #1 UK supplier of permanent magnets. *Experts in magnetics - #1 UK supplier of permanent magnets* [online]. Copyright © 2017 Magnet Expert. All Rights Reserved. [cit. 04.04.2017].
- [23] Magnety Brno - PZK BRNO a.s.. *Magnety Brno - PZK BRNO a.s.* [online].
Dostupné z: <http://www.pzk.cz>
- [24] Shanghai Wind Automation Automated motor winding,armature winding,stator winding,coils winding and frame windings.*Shanghai Wind Automation Automated motor winding,armature winding,stator winding,coils winding and frame windings* [online]. Copyright © 2016 [cit. 04.04.2017].
- [25] *FAKTOR, Zdeněk. Transformátory a cívky - vlastnosti materiálů. Praha : BEN - technická literatura, 2002. ISBN 80-86056-49-X.*
- [26] MENTLÍK, Václav. Diagnostika elektrických zařízení. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2008, 439 s. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [27] MENTLÍK, Václav. Dielektrické prvky a systémy. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006, 235 s. ISBN 80-730-0189-6
- [28] *ŠAVEL, Josef. Elektrotechnologie. Praha : BEN - technická literatura, 2006. ISBN 978-80-7300-190-2.*

- [29] *Make Your Own Miniature Electric Hub Motor* [online]. 2016 [cit. 2019-03-09]. Dostupné z: <https://www.instructables.com/id/Make-Your-Own-Miniature-Electric-Hub-Motor/>
- [30] Jakosti ocelí | www.feromat.cz. www.feromat.cz | *HUTNÍ a SPOJOVACÍ MATERIÁL* [online]. Dostupné z: http://www.feromat.cz/jakosti_oceli
- [31] *Motor Controller | EV Parts - Kelly Controls, LLC* [online]. Copyright © [cit. 04.04.2017]. Dostupné z: <http://kellycontroller.com/mot/downloads/KellyKHBUserManual.pdf>
- [32] *GM ELECTRONIC: Datasheet TLE4935L* [online]. [cit. 2018]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.533-442.1.pdf>
- [33] *Berryjam* [online]. [cit. 2015]. Dostupné z: http://www.berryjam.eu/wp-content/uploads/2015/04/app_note_diagram-458x650.png
- [34] *MotorAnalysis* [online]. Vladimir Kuptsov, Ph.D. [cit. 2019]. Dostupné z: <http://motoranalysis.com>
- [35] Brushless motor from a CD-ROM or HDD as a modeling motor. *Forum for Electronics* [online]. Copyright © 2017 vBulletin Solutions, Inc. All rights reserved. [cit. 04.04.2017].
Dostupné z: <http://www.edaboard.com/thread234615.html>
- [36] Klaus Halbach (1985). "Applications of Permanent Magnets in Accelerators and Electron Storage Rings" (PDF). *Journal of Applied Physics*. **57** (1): 3605–3608. Bibcode:1985JAP....57.3605H. doi:10.1063/1.335021. ISSN 0029-554X.
- [37] Nagarajan, Vidhya; Mohanty, Amar K.; Misra, Manjusri (2016). "Perspective on Polylactic Acid (PLA) based Sustainable Materials for Durable Applications: Focus on Toughness and Heat Resistance". *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. **4** (6): 2899–2916. doi:10.1021/acssuschemeng.6b00321.
- [38] Middleton, John C.; Arthur J. Tipton (2000). "Synthetic biodegradable polymers as orthopedic devices". *Biomaterial*. **21** (23): 2335–2346. doi:10.1016/S0142-9612(00)00101-0. PMID 11055281.
- [39] Dostupné z: <https://mk-eshop.cz/blog/post/8-prehled-materialu-pro-3d-tisk>
- [40] Dostupné z: <https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/properties-table/filas=abs,pla,petg>
- [41] Dostupné z: <https://shop.prusa3d.com/cs/prusament/802-prusament-petg-jet-black-1kg.htm>

- [42] B. Dehez, F. Baudart and Y. Perriard, "Analysis of a new topology of flexible PCB winding for slotless BLDC machines," 2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC), 2017, pp. 1-8, doi: 10.1109/IEMDC.2017.8002019.
- [43] Guillaume Colinet, William Lamberts, François Baudart, Bruno Dehez, "Investigation on the potential of PCB winding technology for high-dynamic and high-precision linear actuators", Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE) 2020 IEEE, pp. 3615-3622, 2020.
- [44] D. Kamalakannan, N. J. Singh, M. Karthi, V. Narayanan and N. S. Ramanathan, "Design and development of DC powered BLDC motor for Mixer-Grinder application," 2016 First International Conference on Sustainable Green Buildings and Communities (SGBC), 2016, pp. 1-6, doi: 10.1109/SGBC.2016.7936063.
- [45] V. Gholase and B. G. Fernandes, "Design of efficient BLDC motor for DC operated mixer grinder", IEEE ICIT Conf, 17-19 Mar 2015.
- [46] D. J. Hammerstrom, "AC versus DC distribution systems-did we get it right?", Proc.IEEE Power Eng. Soc. Gen. Meet., pp. 1-5, Jun –2007.
- [47] M Sherani, A Aghajani, S Shabani and J Jamali, "A review on recent applications of brushless DC electric machines and their potential in energy saving", Energy equipment systems, vol. 3, no. 1, pp. 57-71.
- [48] D. Uygun and S. Solmaz, "Design and dynamic study of a 6 kW external rotor permanent magnet Brushless DC motor for electric drivetrains," 2015 IEEE 5th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG), 2015, pp. 87-92, doi: 10.1109/PowerEng.2015.7266300.
- [49] M. Nakano, H. Kometani and M. Kawamura, "A study on eddy-current losses in rotors of surface permanent-magnet synchronous machines", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 42, no. 2, pp. 429-435, 2006.
- [50] T. Chan, L. T. Yan and S. Y. Fang, "In-wheel permanent-magnet brushless DC motor drive for an electric bicycle", IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 17, no. 2, pp. 229-233, 2002.
- [51] D. Uygun, C. Ocaak and E. Buyukbicakci, "Design Analysis and Experimental Verification of an Efficient 2 kW Permanent Magnet Synchronous Generator for

- WPAs", *International Review of Electrical Engineering (IREE)*, vol. 8, no. 2, pp. 603-607, March-April 2013.
- [52] Durmus Uygun, Cemil Ocak, Yucel Cetinceviz, Engin Demir and Yakup Gungor, "CA D-Based Design Analysis and Experimental Verification of an Out-runner Permanent Magnet Synchronous Generator for Small Scale Wind Turbines", *IEEE 11 th International Conference on Environment and Electrical Engineering*, pp. 179-183, May 18–25 2012.
- [53] R. C. Bolam, Y. Vagapov and A. Anuchin, "A Review of Electrical Motor Topologies for Aircraft Propulsion," *2020 55th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/UPEC49904.2020.9209783.
- [54] D.G. Dorrell, M. Hsieh, M. Popescu, L. Evans, D.A. Staton and V. Grout, "A review of the design issues and techniques for radial-flux brushless surface and internal rare-earth permanent-magnet motors", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 9, pp. 3741-3757, Sept. 2011.
- [55] W. Cao, B.C. Mecrow, G.J. Atkinson, J.W. Bennett and D.J. Atkinson, "Overview of electric motor technologies used for more electric aircraft (MEA)", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 59, no. 9, pp. 3523-3531, Sept. 2012.
- [56] M. Fazil and K. R. Rajagopal, "Development of external rotor single-phase PM BLDC motor based drive for ceiling fan," *2010 Joint International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems & 2010 Power India*, 2010, pp. 1-4, doi: 10.1109/PEDES.2010.5712573.
- [57] H. Hou, W. Yao and W. Zhang, "Vector control of single phase brushless DC motor," *2016 19th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 2016, pp. 1-5.
- [58] M. Matsushita, H. Kameyama, Y. Ikeboh and S. Morimoto, "Stabilization control of sensorless sinusoidal wave drive for control of power factor of PM motor", *Electrical Machines and Systems 2009. (ICEMS 2009). International Conference on*, pp. 1-5, 2009.
- [59] A. Rowe, G. Sen Gupta and S. Demidenko, "Instrumentation and control of a high power BLDC motor for small vehicle applications," *2012 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings*, 2012, pp. 559-564, doi: 10.1109/I2MTC.2012.6229466.

- [60] T. Nama, A. K. Gogoi and P. Tripathy, "Application of a smart hall effect sensor system for 3-phase BLDC drives," 2017 IEEE International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors (IRIS), 2017, pp. 208-212, doi: 10.1109/IRIS.2017.8250123.
- [61] C. Sheeba Joice, S. R. Paranjothi and V. Jawahar Senthil Kumar, "Digital Control Strategy for four Quadrant Operation of Three Phase BLDC Motor With Load Variations", IEEE Trans. Ind. Information., vol. 9, no. 2, pp. 22462257, May 2013.
- [62] R.M. Pindoriya, A.K. Mishra, B.S. Rajpurohit and R. Kumar, "Analysis of Position and Speed Control of Sensorless BLDC Motor using Zero Crossing Back-EMF Technique", proc. IEEE Int. Conf. on Power Electronics Intelligent Control and Energy Systems., 2016.
- [63] Yuqi Rang, Hao Xiong, Qiang Wu, Guangwei Meng, Huaishu Li and Libing Zhou, "FEM simulation and harmonic torque analysis of six-phase BLDC motor," 2011 2nd International Conference on Artificial Intelligence, Management Science and Electronic Commerce (AIMSEC), 2011, pp. 3984-3987, doi: 10.1109/AIMSEC.2011.6009974.
- [64] A. Tashakori and M. Ektesabi, "Fault diagnosis of in-wheel BLDC motor drive for electric vehicle application," 2013 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2013, pp. 925-930, doi: 10.1109/IVS.2013.6629585.
- [65] F. Lorenz, J. Rudolph and R. Wemer, "Design of 3D Printed High Performance Windings for Switched Reluctance Machines," 2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM), 2018, pp. 2451-2457, doi: 10.1109/ICELMACH.2018.8506845.
- [66] M. J. Bala, D. Roy and A. Sengupta, "The Performance Enhancement of BLDC Motor Using Halbach Array Rotor," 2020 IEEE 1st International Conference for Convergence in Engineering (ICCE), 2020, pp. 405-409, doi: 10.1109/ICCE50343.2020.9290642.
- [67] Dostupné z: http://www.volcanomotor.com/products/3kw_3000rpm_iec_90_brushless_dc_motor-en.html
- [68] J. Mallinson, "One-sided fluxes -- A magnetic curiosity?," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 9, no. 4, pp. 678-682, December 1973, doi: 10.1109/TMAG.1973.1067714.
- [69] M. J. Bala, D. Roy and A. Sengupta, "The Performance Enhancement of BLDC Motor Using Halbach Array Rotor," 2020 IEEE 1st International Conference for Convergence in Engineering (ICCE), 2020, pp. 405-409, doi: 10.1109/ICCE50343.2020.9290642.
- [70] Dostupné z: <http://m.mww.intopmag.com/info/halbach-array-55214787.html>

- [71] PYRHONEN, Juha, Tapani JOKINEN a Valeria HRABOVCOVÁ. Design of rotating electrical machines. Hoboken, NJ: Wiley, c2008. ISBN 978-0-470-69516-6.
- [72] Hanselman, Duane C., "Brushless Permanent Magnet Motor Design" (2003). Faculty and Staff Monograph Publications. 231.
- [73] Dostupné z: <http://www.volcanomotor.com/>
- [74] H. Stakhiv, O. Solomchak, M. Stepien and P. Lasek, "Analysis and Experimental Investigation of 3D Printed Electric Motor with Permanent Magnets," 2020 XI International Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS), 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICEPDS47235.2020.9249306.
- [75] B. Dehez, F. Baudart, M. Markovic and Y. Perriard, "Theoretical and Experimental Investigation of Flex-PCB Air-Gap Windings in Slotless BLDC Machines," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 50, no. 5, pp. 3153-3160, Sept.-Oct. 2014, doi: 10.1109/TIA.2014.2301862.
- [76] G. H. Jang and J. H. Chang, "Development of dual air gap printed coil BLDC motor," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 35, no. 3, pp. 1789-1792, May 1999, doi: 10.1109/20.767378.
- [77] H. Pyo, J. W. Jeong, J. Yu, S. G. Lee and W. Kim, "Design of 3D-Printed Hybrid Axial-Flux Motor Using 3D-Printed SMC Core," in IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 30, no. 4, pp. 1-4, June 2020, Art no. 5202004, doi: 10.1109/TASC.2020.2973364.
- [78] S. -T. Wu, P. -W. Huang, T. -W. Chang, I. -H. Jiang and M. -C. Tsai, "Application of Magnetic Metal 3-D Printing on the Integration of Axial-Flow Impeller Fan Motor Design," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 57, no. 2, pp. 1-5, Feb. 2021, Art no. 8201205, doi: 10.1109/TMAG.2020.3014651.
- [79] Y. Park, H. Kim, H. Jang, S. -H. Ham, J. Lee and D. -H. Jung, "Efficiency Improvement of Permanent Magnet BLDC With Halbach Magnet Array for Drone," in IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 30, no. 4, pp. 1-5, June 2020, Art no. 5201405, doi: 10.1109/TASC.2020.2971672.
- [80] K. Liu, M. Yin, W. Hua, Z. Ma, M. Lin and Y. Kong, "Design and Analysis of Halbach Ironless Flywheel BLDC Motor/Generators," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 54, no. 11, pp. 1-5, Nov. 2018, Art no. 8109305, doi: 10.1109/TMAG.2018.2833958.
- [81] F. Güler, L. T. Ergene and C. Ekin, "Halbach array variations on BLDC motor under magnet constraint," 4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, 2013, pp. 1509-1513, doi: 10.1109/PowerEng.2013.6635839.

Seznam obrázků

<i>Obr. 1: BLDC s rotorem uvnitř statoru – inrunner (Upraveno z [4])</i>	10
<i>Obr. 2: BLDC s rotorem vně statoru – outrunner (Upraveno z [4])</i>	11
<i>Obr. 3: Komutace jednofázového BLDC motoru (Upraveno z [6])</i>	13
<i>Obr. 4: Komutace trojfázového BLDC motoru (Upraveno z [6])</i>	15
<i>Obr. 5: : Stator BLDC stroje s oběžným rotorem [2]</i>	21
<i>Obr. 6: Oběžná konstrukce rotoru</i>	23
<i>Obr. 7: Klasická konstrukce rotoru (upraveno z [20])</i>	23
<i>Obr. 8: Rotor klasické konstrukce s magnety upevněnými pomocí kompozitových bandáží (upraveno z [20])</i>	24
<i>Obr. 9: Drážková izolace BLDC stroje (upraveno z [20])</i>	26
<i>Obr. 10: Konstrukce BLDC motorku (Převzato z [29])</i>	27
<i>Obr. 11: Umístění Hallových sond na statoru BLDC stroje</i>	28
<i>Obr. 12: BLDC motor Volcanomotor typ VOL-BL300B72 (převzato z [73])</i>	30
<i>Obr. 13: Zobecněný algoritmus řešení nelineárního problému pomocí FEM</i>	40
<i>Obr. 14: Výpočetní síť stroje se třemi vrstvami ve vzduchové mezeře – kluzná vrstva uprostřed</i>	41
<i>Obr. 15: Kluzná vrstva vzduchové mezery v modelu</i>	42
<i>Obr. 16: B-H charakteristika materiálu M270-35A</i>	45
<i>Obr. 17: Průběh ztrát v železe v závislosti na indukci pro různé frekvence</i>	46
<i>Obr. 18: Průběh točivého momentu pro jednotlivé šířky magnetů</i>	49
<i>Obr. 19: Pulzační moment strojů s magnety 12 a 18 mm</i>	50
<i>Obr. 20: Porovnání účinnosti strojů</i>	50
<i>Obr. 21: Kompletní výsledky magnetostatické analýzy stroje s feromagnetickým rotorem se šířkou magnetů 15 mm</i>	51
<i>Obr. 22: Geometrie stroje s magnety 15 mm</i>	52
<i>Obr. 23: Průběh indukce ve stroji s feromagnetickým rotorem s magnety 15 mm</i>	53

<i>Obr. 24: Průběh magnetické indukce ve stroji s feromagnetickým rotorem s magnety 15 mm</i>	54
<i>Obr. 25: Výpočetní síť modelu - zjemněná</i>	55
<i>Obr. 26: Závislost momentu na úhlu komutace pro feromagnetický rotor s magnety 15 mm</i>	56
<i>Obr. 27: : Závislost mechanického výkonu na úhlu komutace pro feromagnetický rotor s magnety 15 mm</i>	57
<i>Obr. 28: Závislost fázového napětí na odebíraném proudu pro feromagnetický rotor s magnety 15 mm</i>	58
<i>Obr. 29: Účinnost v závislosti na napájecím proudu pro feromagnetický rotor s magnety 15 mm</i>	59
<i>Obr. 30: Závislost ztrát ve vinutí statoru na napájecím proudu pro feromagnetický rotor s magnety 15 mm</i>	60
<i>Obr. 31: Porovnání magnetického pole klasického uspořádání permanentních magnetů (vlevo) a pole v Halbachově uspořádání (vpravo) (upraveno z [36])</i>	61
<i>Obr. 32: Halbachovo pole pro různé počty pólů a) $p=1$ b) $p=2$, c) $p=3$ (upraveno z [69])</i>	62
<i>Obr. 33: Segmenty magnetů tvořící Halbachovo pole (upraveno z [70])</i>	63
<i>Obr. 34: Značení rozměrů jednotlivých magnetů pro následující grafy, definice parametrů w_1, w_2, h_1, h_2</i>	64
<i>Obr. 35: Točivý moment pro různé šířky permanentních magnetů</i>	65
<i>Obr. 36: Rozdíl točivého momentu pro různé šířky permanentních magnetů s horizontální a vertikální magnetizací</i>	66
<i>Obr. 37: Rozdíl točivého momentu pro různé výšky permanentních magnetů s horizontální a vertikální magnetizací</i>	67
<i>Obr. 38: Průběh indukovaného napětí pro jednotlivé varianty rotorů</i>	68
<i>Obr. 39: Porovnání průběhů momentů stroje</i>	69
<i>Obr. 40: Porovnání průběhů pulzačních momentů stroje</i>	70
<i>Obr. 41: Průběh magnetické indukce v závislosti na poloze rotoru</i>	71
<i>Obr. 42: Závislost efektivní hodnoty indukovaného napětí na otáčkách rotoru</i>	72

<i>Obr. 43: Závislost efektivní hodnoty napájecího napětí na otáčkách rotoru</i>	<i>73</i>
<i>Obr. 44: Porovnání účinnosti strojů</i>	<i>74</i>
<i>Obr. 45: Porovnání momentu strojů</i>	<i>75</i>
<i>Obr. 46: Porovnání průběhů mechanického výkonu strojů</i>	<i>76</i>
<i>Obr. 47: Porovnání magnetické indukce stroje pro klasický a Halbachův rotor</i>	<i>77</i>
<i>Obr. 48: Plechy statoru funkčního vzorku BLDC stroje</i>	<i>78</i>
<i>Obr. 49: Vinutí statoru funkčního vzorku BLDC stroje</i>	<i>78</i>
<i>Obr. 50: Klasický rotor funkčního vzorku BLDC stroje</i>	<i>79</i>
<i>Obr. 51: Skutečné uspořádání magnetů na rotoru do Halbachova pole</i>	<i>80</i>
<i>Obr. 52: Model prstence rotoru stroje s Halbachovým uspořádáním</i>	<i>83</i>
<i>Obr. 53: Plastový rotor částečně osazený permanentními magnety</i>	<i>86</i>
<i>Obr. 54: Čelo rotoru vytištěné z PLA</i>	<i>88</i>
<i>Obr. 55: Plastový čep pro usazení do ložisek statoru</i>	<i>88</i>
<i>Obr. 56: Sestava čela rotoru s čepem pro uložení do ložisek statoru</i>	<i>89</i>
<i>Obr. 57: Kompletní plastový rotor vyztužený pomocí ocelových šroubů</i>	<i>90</i>
<i>Obr. 58: Kompletní sestava plastového BLDC rotoru</i>	<i>91</i>
<i>Obr. 59: Schéma zapojení pro měření stroje jako generátoru naprázdno</i>	<i>93</i>
<i>Obr. 60: Porovnání indukovaného napětí z měření a simulace pro rotor s Halbachovým uspořádáním permanentních magnetů</i>	<i>94</i>
<i>Obr. 61: Schéma zapojení pro měření stroje jako motoru</i>	<i>95</i>
<i>Obr. 62: Průběh statorového napětí pro jednotlivé typy rotorů</i>	<i>96</i>
<i>Obr. 63: Průběh proudu naprázdno pro jednotlivé typy rotorů</i>	<i>97</i>
<i>Obr. 64: Napětí stroje v závislosti na otáčkách vrtule</i>	<i>100</i>
<i>Obr. 65: Fázový proud stroje v závislosti na otáčkách vrtule</i>	<i>101</i>
<i>Obr. 66: Příkon stroje v závislosti na otáčkách vrtule</i>	<i>102</i>
<i>Obr. 67: Porovnání hmotností plastového a ocelového rotoru</i>	<i>104</i>
<i>Obr. 68: Měřicí stanoviště stroje s vrtulí</i>	<i>104</i>

Seznam tabulek

<i>Tab. 1: Kombinace statorových a rotorových pólů (modré – ideální, bílé – možné, oranžové – nepříliš vhodné, černé – nevhodné) - upraveno z [4]</i>	22
<i>Tab. 2: Základní parametry navrhovaného stroje</i>	31 - 32
<i>Tab. 3 Parametry statoru stroje</i>	32 - 33
<i>Tab. 4 Parametry rotoru klasické konstrukce</i>	33
<i>Tab. 5 Parametry rotoru s Halbachovým polem</i>	34
<i>Tab. 6 Základní parametry funkčního vzorku stroje s Halbachovým uspořádáním magnetů</i>	35
<i>Tab. 7 Parametry permanentních magnetů</i>	35
<i>Tab. 8: Základní parametry pro simulaci</i>	44
<i>Tab. 9: Hodnoty koeficientů pro výpočet ztrát v železe pro materiál M270-35A</i>	45
<i>Tab. 10: Shrnutí základních vlastností jednotlivých variant rotorů</i>	47
<i>Tab. 11: Základní parametry tisku použité pro 3D tisk rotoru</i>	84
<i>Tab. 12: Shrnutí základních parametrů pro oba rotory BLDC stroje</i>	87
<i>Tab. 13: Seznam použitých měřicích přístrojů</i>	92
<i>Tab. 14: Porovnání hmotností plastového a ocelového rotoru</i>	103
<i>Tab. 1P: Cena materiálů a práce výroby stroje</i>	128 - 129

13 Přílohy

Shrnutí vlastností permanentních magnetů

Třída	Koercivita		Remanence B_r [mT]	Max. součin $(BH)_{max}$ [kJ/m ³]	max. teplota použití °C
	H_{cB}	H_{cJ}			
	[kA/m]				
N35	≥868	≥955	1170-1210	263-287	90
N38	≥868	≥955	1210-1250	287-310	90
N40	≥835	≥955	1260-1290	318-324	90
N42	≥835	≥955	1290-1320	324-342	80
N45	≥835	≥955	1330-1370	342-366	80
N50	≥842	≥876	1400-1440	324-342	70
N52	≥842	≥876	1440-1470	394-414	70
N30H	≥810	≥1353	1080-1120	232-239	120
N33H	≥842	≥1353	1140-1170	247-263	120
N35H	≥868	≥1353	1170-1210	263-279	120
N38H	≥915	≥1353	1220-1260	287-303	120
N40H	≥915	≥1353	1260-1290	303-318	120
N42H	≥899	≥1353	1290-1320	318-334	120
N44H	≥923	≥1274	1330-1360	334-350	110
N30SH	≥804	≥1592	1080-1120	223-239	150
N33SH	≥844	≥1592	1140-1170	247-263	150
N35SH	≥860	≥1592	1170-1210	263-279	150
N38SH	≥860	≥1592	1210-1250	287-302	150
N40SH	≥860	≥1592	1260-1290	303-318	150
N42SH	≥907	≥1512	1300-1330	318-334	140
N30UH	≥804	≥1990	1080-1120	223-239	180
N35UH	≥836	≥1990	1170-1210	263-278	180
N38UH	≥907	≥1990	1220-1260	287-303	180
N30EH	≥804	≥2388	1080-1120	223-239	200
N33EH	≥820	≥2388	1140-1170	247-263	200
N35EH	≥860	≥2388	1170-1210	263-279	200

Vlastnosti a označení neodymových magnetů (převzato z [21])

Shrnutí materiálových vlastností materiálů pro 3D tisk

	 ABS Learn More	 PLA Learn More	 PETG Learn More
Compare Selected Show All	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ultimate Strength ?	 40 MPa	 65 MPa	 53 MPa
Stiffness ?	 5/10	 7.5/10	 5/10
Durability ?	 8/10	 4/10	 8/10
Maximum Service Temperature ?	98 °C	52 °C	73 °C
Coefficient of Thermal Expansion ?	90 $\mu\text{m/m}\cdot\text{°C}$	68 $\mu\text{m/m}\cdot\text{°C}$	60 $\mu\text{m/m}\cdot\text{°C}$
Density ?	1.04 g/cm^3	1.24 g/cm^3	1.23 g/cm^3
Price (per kg) ?	\$ 10 - \$ 40	\$ 10 - \$ 40	\$ 20 - \$ 60
Printability ?	 8/10	 9/10	 9/10
Extruder Temperature ?	220 - 250 °C	190 - 220 °C	230 - 250 °C
Bed temperature ?	95 - 110 °C	45 - 60 °C	75 - 90 °C
Heated Bed ?	Required	Optional	Required
Recommended Build Surfaces ?	Kapton Tape, ABS Slurry	Painter's Tape, Glue Stick, Glass Plate, PEI	Glue Stick, Painter's Tape
Other Hardware Requirements ?	Heated Bed, Enclosure Recommended	Part Cooling Fan	Heated Bed, Part Cooling Fan

Shrnutí materiálových vlastností materiálů pro 3D tisk

Shrnutí materiálových vlastností plechu statoru M270-35A

T	W/kg at 50 Hz	VA/kg at 50 Hz	A/m at 50 Hz	W/kg at 100 Hz	W/kg at 200 Hz	W/kg at 400 Hz	W/kg at 1000 Hz	W/kg at 2500 Hz
0,1	0,03	0,06	30,0	0,04	0,09	0,21	0,99	4,10
0,2	0,07	0,17	39,6	0,16	0,37	0,92	3,67	14,9
0,3	0,13	0,29	46,0	0,34	0,79	1,99	7,63	30,7
0,4	0,22	0,44	52,0	0,55	1,31	3,33	12,7	52,0
0,5	0,31	0,61	58,2	0,80	1,91	4,94	18,9	79,1
0,6	0,43	0,81	65,2	1,06	2,61	6,84	26,4	113
0,7	0,54	1,04	73,3	1,38	3,39	9,00	35,4	156
0,8	0,68	1,31	83,1	1,73	4,26	11,4	46,0	209
0,9	0,83	1,63	95,5	2,10	5,23	14,2	58,4	274
1,0	1,01	2,04	112	2,51	6,30	17,3	73,0	353
1,1	1,20	2,58	136	2,98	7,51	20,9	90,1	
1,2	1,42	3,38	178	3,51	8,88	24,9		
1,3	1,70	4,90	272	4,15	10,5	29,5		
1,4	2,12	9,64	596	4,97	12,5	35,4		
1,5	2,47	28,0	1700	5,92	14,9	41,8		
1,6	2,80	72,3	3880					
1,7	3,05	149	7160					
1,8	3,25	264	11600					

Loss at 1.5 T , 50 Hz, W/kg	2,47
Loss at 1.0 T , 50 Hz, W/kg	1,01
Anisotropy of loss, %	10
Magnetic polarization at 50 Hz	
H = 2500 A/m, T	1,54
H = 5000 A/m, T	1,65
H = 10000 A/m, T	1,77
Coercivity (DC), A/m	40
Relative permeability at 1.5 T	700
Resistivity, $\mu\Omega\text{cm}$	52
Yield strength, N/mm ²	450
Tensile strength, N/mm ²	565
Young's modulus, RD, N/mm ²	185 000
Young's modulus, TD, N/mm ²	200 000
Hardness HV5 (VHN)	215



Shrnutí materiálových vlastností plechu statoru M270-35A (převzato z datasheetu výrobce)

Rozpočet na výrobu stroje

Kromě technických parametrů stroje, rozměrů, hmotnosti, robustnosti a přetížitelnosti stroje je velmi důležitý faktor, na který je brán ohled při výrobě, také cena vyrobeného stroje. Cenu ovlivňuje kvalita použitých elektrotechnických plechů, magnetů, vinutí, izolací a ostatních konstrukčních prvků. Velkou roli na cenu má také náročnost výroby jednotlivých komponentů. Tuto cenu ovlivňuje množství vyrobených komponentů a také jak moc je možno výrobu zautomatizovat. U vyrobeného funkčního vzorku jsou proto ceny za jednotlivé komponenty výrazně vyšší, než by byly u stroje určeného pro sériovou výrobu. Zároveň pracnost jednotlivých kroků je pouze hrubě odhadnutá, zejména přihlídneme-li k tomu, že mnoho prací bylo vícekrát opakováno, dokud nebylo dosaženo uspokojivých výsledků konstrukce. Vzhledem k tomu, že jedním z cílů mé práce je vyrobit stroj, který bude vysoce robustní a přetížitelný, jsou pro konstrukci stroje používány materiály velmi vysoké kvality. Ceny jednotlivých materiálů a prací jsou shrnuty v tabulce (Tab. 1P).

Elektrotechnický plech M270-35A C5 - obchodní označení Remisol EB 5308 - 2000x1000x0,35 mm - 3 tabule, hmotnost 16kg	576 Kč
Vyřezání statorových plechů vodním paprskem dle DXF návrhu	5765 Kč
Zbavení statorových plechů ořepů	60 minut
Svaření statorového svazku, soustružení statoru na přesný průměr	1990 Kč, 120 minut práce
Nástřik statorového svazku izolačním lakem	150 Kč, 60 minut práce
Instalace drážkové izolace	200 Kč, 180 minut práce
Dvojitě lakovaný měděný vodič 0,63 a 0,67 mm, cca. 70 m vodičů.	2400 Kč
Navinutí statoru	460 minut práce
Měděné spojovací kruhy	300 Kč, 30 minut práce
Výroba kovového rotoru	2000 Kč, 460 minut práce
Výroba plastového rotoru	500 Kč, 460 minut práce

Ostatní náklady	1500 Kč
Součet	práce: 30,5 hod. cena: 15.381 Kč

Tab. 1P: Cena materiálů a práce na výrobě stroje