

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Katedra výkonové elektroniky a strojů

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Návrh bezkartáčového stejnosměrného motoru využívajícího
Halbachovo pole

Autor práce:
Vedoucí práce:

Tomáš Paveza
Ing. Jiří Dražan

2022

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Tomáš PAVEZA**
Osobní číslo: **E19B0155P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Téma práce: **Návrh bezkartáčového stejnosměrného motoru využívajícího Halbachovo pole**
Zadávací katedra: **Katedra výkonové elektroniky a strojů**

Zásady pro vypracování

1. Provedte literární rešerši zaměřenou na různá uspořádání BLDC motorů, popište. Okomentujte princip Halbachova pole a jeho praktické využití v průmyslu.
2. Na základě rešerše provedte zjednodušený návrh BLDC motoru využívajícího Halbachovo pole.
3. Návrh ověřte metodou konečných prvků a stanovte teoretický výkon stroje.



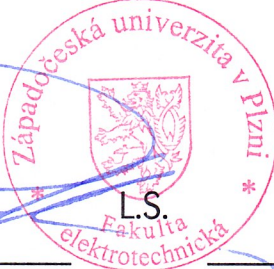
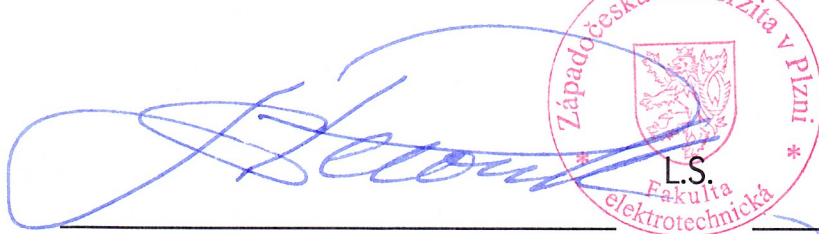
Rozsah bakalářské práce: **30 – 40**
Rozsah grafických prací: **dle doporučení vedoucího**
Forma zpracování bakalářské práce: **elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. KOPYLOV, Igor Petrovič aj. Stavba elektrických strojů. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988. 685 s.
2. HANSELMAN, Duane C. Brushless permanent magnet motor design. 2nd ed. Cranston: The Writers' Collective, ©2003. xvi, 392 s. ISBN 1-932133-63-1.
3. HENDERSHOT, J. R. a MILLER, T. J. E. Design of brushless permanent-magnet motors. Hillsboro: Magna Physics Publishing, ©1994. 1 sv. (různé stránkování). Monographs in electrical and electronic engineering; 37. ISBN 978-1-881855-03-3.
4. Internetové zdroje.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jiří Dražan**
Research and Innovation Centre for Electrical
Engineering

Datum zadání bakalářské práce: **8. října 2021**
Termín odevzdání bakalářské práce: **26. května 2022**



Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan



Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na návrh bezkartáčového stejnosměrného motoru využívajícího Halbachovo pole s dvojitým rotorem, společně se statorem vytvořených pomocí 3D tisku. Nejprve je v práci popsáno jaké existují různé uspořádání BLDC motorů a nadále princip Halbachova pole a jeho využití v průmyslu. Následuje postup a zjednodušený návrh konkrétního BLDC motoru a ověření modelu v simulačním programu ANSYS a stanovení jeho parametrů.

Klíčová slova

3D tisk, BLDC, bezkartáčový stejnosměrný motor, dvojitý rotor, Halbachovo pole, metoda konečných prvků, permanentní magnety, pětifázové vinutí, stator, vnější rotor

Abstract

This thesis is focused on design of a brushless direct current motor which use Halbach array of permanent magnets with double rotor and together with stator they are 3D printed. Typical arrangements of BLDC motor are discussed in the first part of this thesis, following by explanation of principle of the Halbach array and it's use in industry. After that a simplified design of a specific BLDC motor is submitted and simulated in ANSYS programme.

Key Words

3D printing, BLDC, brushless direct current motor, double rotor, Halbach array, finite element method, permanent magnets, , five phase winding, stator, outer rotor

Poděkování

Touto formou bych rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce, Ing. Jiřímu Dražanovi za cenné odborné rady, konzultace a metodické vedení práce. Dále bych chtěl poděkovat své rodině a přítelkyni za psychickou podporu během studia a psaní této práce.

Obsah

1	Úvod.....	1
2	BLDC.....	2
2.1	Konstrukce BLDC.....	2
2.1.1	Stator	4
2.1.2	Rotor	4
2.1.3	Vinutí statoru.....	6
2.2	Princip činnosti BLDC motoru	8
2.3	Indukované napětí	8
2.4	Točivý moment stroje	9
2.5	Zátěžný úhel.....	11
2.6	Napájení.....	11
2.7	Sledování polohy rotoru	11
2.8	Praktické využití BLDC motoru.....	13
3	Princip Halbachova pole	14
3.1	Permanentní magnety	14
3.2	Konfigurace magnetů Halbachovy soustavy.....	14
3.2.1	Klasická soustava	14
3.2.2	Lineární soustava	15
3.2.3	Cylindrická soustava	16
3.3	Aplikace Halbachova pole a jeho využití v průmyslu	16
3.3.1	Maglev	17
3.3.2	Motory	17
3.3.3	Urychlovače částic	17
3.4	Obecné výhody Halbachova pole	18
4	Návrh BLDC motoru s vnějším rotorem	19
4.1	Stanovení parametrů statoru	19
4.1.1	Výpočet geometrických rozměrů	19
4.1.2	Magnetické plechy a vinutí.....	21
4.1.3	Drážka statoru	22
4.1.4	Vinutí.....	24
4.2	Činitel elektromotorické síly	29
4.3	Baterie.....	29
4.4	Řízení.....	30
4.4.1	Ověření modelu v ANSYS.....	30

4.5	Určení počtu závitů statoru	34
4.6	Ověření výpočtů a motor v chodu naprázdno	35
4.7	Výsledky z ANSYS	37
4.7.1	Proudový zdroj.....	38
4.7.2	Napěťový zdroj	40
4.8	Zlepšení tepelných vlastností motoru	44
4.8.1	Činitel plnění drážky	44
4.8.2	Jmenovitý zátěžný úhel a moment motoru.....	45
4.8.3	Stanovení maximálního momentu motoru	47
4.9	Použitý materiál	49
4.9.1	3D tisk	49
4.9.2	Permanentní magnety.....	50
4.9.3	Hmotnost	51

Seznam symbolů a zkratek

Značka	Popisek	Jednotka
a	počet paralelních větví vinutí	(-)
b	šířka	(m)
B	magnetická indukce	(T)
β	zátěžný úhel, činitel zkrácení kroku	(°), (-)
D	průměr	(m)
f	frekvence	(Hz)
F	síla	(N)
h	výška	(m)
H	intenzita magnetického pole	(A/m)
I	elektrický proud	(A)
k_E	činitel elektromotorické síly	(-)
J	proudová hustota	(A/m ²)
l	délka	(m)
m	počet fází, hmotnost	(-), (kg)
M	točivý moment	(Nm)
n	rychlost stroje	(ot/min)
N_C	počet závitů jedné cívky	(-)

N_s	počet závitů v sérii	(-)
p	počet pólových dvojic	(-)
P	výkon, resp. příkon	(W)
q	počet drážek na pól a fázi	(-)
Q	počet drážek	(-)
r	poloměr	(m.p.u.)
R	elektrický odpor	(Ω)
S	plocha	(m ²)
t	teplota, rozteč	(°C), (m)
U	elektrické napětí	(V)
V_d	počet vodičů v drážce	(-)
V	objem	(m ³)
$\cos\varphi$	účinník	(-)
ρ	měrný odpor	(Ω/mm^2)
ω	úhlová rychlost	(rad/s)
Ψ	spřažený magnetický tok	(Wb)

1 Úvod

Střídavé elektrické točivé stroje jsou nejběžnější formou přeměny elektrické energie na mechanickou. Uvnitř se nachází, převážně, dvě vzájemně interagující magnetická pole. Tato magneticky vybuzená pole, statorová nebo rotorová, mohou být vytvořena jako časově proměnná, a to za pomoci vinutí, kterými protéká střídavý proud nebo jako časově stálá rotující pole, která jsou vybuzena permanentními magnety nebo vinutím čili elektromagnety. Magnetické obvody a celkově tedy jejich konstrukce bývají obvykle velice robustní a mají velikou hmotnost.

Stejnoseměrné motory, konkrétně bezkartáčové oproti tomu nemají zdroj s harmonickým napětím, což ztěžuje určení průběhů indukovaného napětí a tvar magnetické indukce ve vzduchové mezeře. Nicméně nevyžadují magnetický obvod v podobě železa pro rotor jako by tomu bylo u jiných strojů s vinutím, protože u BLDC je osazen permanentními magnety a konstrukce, které tyto PM drží, například plast či kompozit obsahující plasty, může být poměrně lehká a rozměrově menší.

Cílem této práce je navrhnout BLDC motor, který bude mít dvojité rotor osazen permanentními magnety a využívající Halbachovo pole. Rotor a stator má být vyroben pomocí 3D tisku a motor má mít co možná největší možný výkon a účinnost. Tento motor vzhledem k jeho rozměrům a hmotnosti může najít uplatnění nejčastěji v osobní přepravě, a to buď v elektromobilech či ve variaci jednostopých vozidel, či jako školní pomůcka.

2 BLDC

BLDC Motor neboli z anglické zkratky Brushless Direct Current Motor, tedy bezkartáčový stejnosměrný motor je na rozdíl od konvenčního stejnosměrného stroje konstruován zcela bez kartáčů, sběračů, jak již název stroje napovídá. V praxi se také označuje jako elektronicky komutovaný motor. Na tento stroj je tedy nutné nahlížet jako na náhradu za stejnosměrný motor, tedy na celek, který je tvořen synchronním motorem s permanentními magnety, jenž má na statoru rozmístěny Hallovy sondy po 60° mechanických a je napájen z napěťového střídače (v případě třífázového vinutí, respektive napájení).

Komutátor, jakožto mechanická část stejnosměrného motoru, je komutační prvek s limitovanou životností. S příchodem a značným vývojem polovodičových spínacích elementů vznikla možnost nahradit mechanickou komutaci elektrickou, tedy EC (Electronically Commutated). Tedy spínat jednotlivé cívky fází statorového vinutí tak, aby vzniklo časově proměnné, točivé magnetické pole. V tom spočívá hlavní výhoda BLDC stroje oproti klasickému DC stroji. BLDC stroj disponuje vysokou účinností, spolehlivostí a životností. Buzení BLDC motorů je zajištěno permanentními magnety umístěnými v rotoru. Díky tomu získávají tyto stroje rychlou dynamickou odezvu na změnu řízení a disponují vysokou hustotou výkonu na jednotku objemu [1].

Výhoda BLDC motorů může být za určitých situací i jejich nevýhoda. Permanentní magnety po dosažení Curieho teploty T_C ztrácí 100 % svojí původní síly. Feritové magnety mají tuto hranici na 300 °C. Neodymové mají podobnou Curieho teplotu a to okolo 310 °C. Nicméně někteří výrobci uvádějí i teplotu 370 °C, záleží na použité příměsi v magnetu. Naopak čím nižší je teplota, tím je magnet silnější. Pracovní teplota se pak pohybuje nejčastěji okolo 80 °C. Je tedy nezbytně nutné, aby prostor mezi statorovým vinutím a permanentními magnety ve statoru byl aktivně ochlazován.

2.1 Konstrukce BLDC

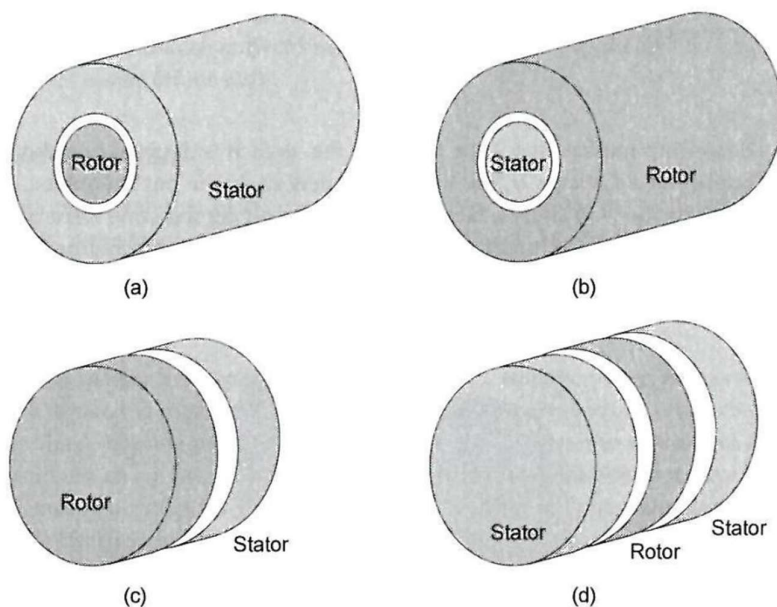
Konvenční stejnosměrné motory s komutátorem osazeným kartáči mají na statoru pevně umístěné budící vinutí cívek, případně permanentních magnetů a v rotoru vinutí kotvy propojené pomocí zmíněného komutátoru se zdrojem, nebo s obvodem se zátěží v případě dynama, přes kartáče. Naproti tomu BLDC stroj má toto uspořádání přesně obráceně. Budící

magnetické pole je umístěno na rotoru a vinutí kotvy je na statoru. BLDC stroje rozdělujeme do dvou skupin, a to podle jejich uspořádání magnetického toku na radiální a axiální. Axiální stroje nacházejí v dnešní době uplatnění například v elektromobilitě, a to kvůli jejich tvaru a rozměrům. [2, 3]

V případě tvaru motoru nejčastěji používaném, tedy radiálním, můžeme dále uvažovat o několika konstrukčních možnostech motoru. Magnetický tok u těchto strojů prochází a uzavírá se přes vzduchovou mezeru v radiálním směru [2, 3]:

- Stroj s vnějším rotorem je vhodný do aplikací, kde není kladen důraz na dynamiku, ale na zachování rychlosti v reakci na změnu zátěže, a tím pádem na malé momentové rázy
- Stroj s vnitřním rotorem je vhodný na chod při malých otáčkách, vyšších točivých momentech a rychlých dynamických reakcích, respektive změnách

Tuto konstrukci označujeme jako radiální a vidíme je na Obr. 2.1a a Obr. 2.1b. Naproti tomu axiální motor, Obr. 2.1c a Obr. 2.1d, je sestaven z částí plochých válců a to buď s jednoduchým, nebo dvojitým státorem (realizovat lze i s dvojitým rotorem).



Obr. 2.1 Konstrukční možnosti BLDC stroje – převzato [2]

2.1.1 Stator

Stator BLDC stroje není nikterak odlišný od jiných elektrických strojů. To znamená, že jeho magnetický obvod je tvořen magnetickými plechy z elektrotechnické oceli, které jsou vzájemně od sebe odizolované. Je tomu tak proto, aby se odloučily, nebo alespoň potlačily ztráty, vzniklé vířivými proudy časově proměnného magnetického pole vinutí kotvy.

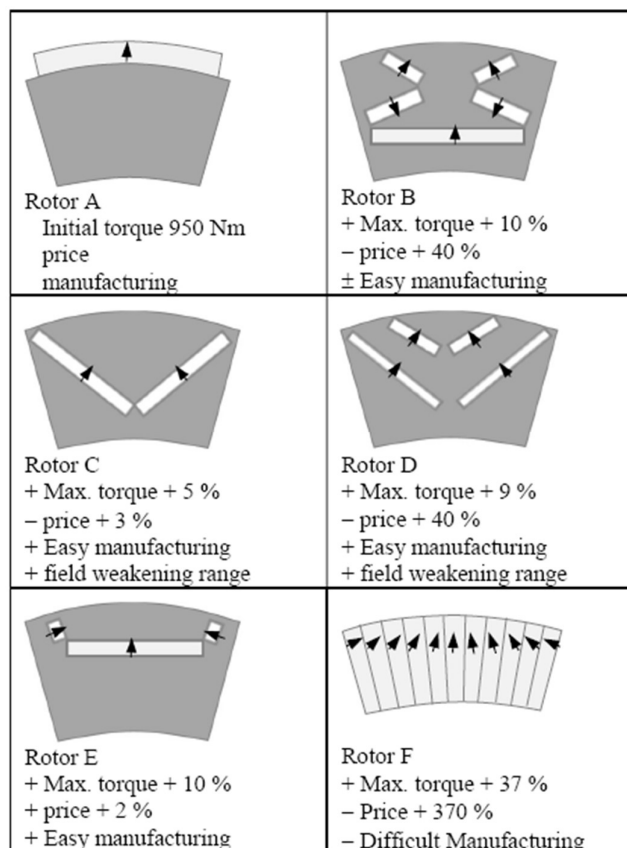
Do materiálu těchto plechů se přidává příměs křemíku, čímž se velikost proudů zvýšením odporu sníží a následně se ztráty potlačí. Pokud je stroj provozován při vyšších pracovních kmitočtech, měly by tedy být užity i příslušné materiály při výrobě plechů. Zpravidla platí, že pokud kmitočet, na kterém je stroj provozován je $f > 500$ Hz, je nutno použít jako materiál ferit [2].

Plechů se lisují, a to nejčastěji tak, že vznikají na jejich obvodech zuby, respektive drážky. Takovýto stator s drážkami obsahuje zmíněné zuby, které snižují efektivní šířku vzduchové mezery což má za následek zvýšení elektromagnetického točivého momentu stroje. Nicméně toto drážkování vytváří pulzace magnetické indukce ve vzduchové mezeře a způsobuje pulzaci točivého momentu stroje a vznikají povrchové a pulzační ztráty.

Naproti tomu stator bez drážek, čili bez zubů má za následek zvětšení efektivní velikosti vzduchové mezery, a tudíž i zmenšení elektromagnetického točivého momentu. Absence drážek v podstatě eliminuje problém pulzace momentu a také může zvětšit jeho maximální vrtání, čímž vznikne volná plocha.

2.1.2 Rotor

V rotoru jsou umístěny magnety, které představují zdroj budícího magnetického toku. Tyto permanentní magnety mohou být umístěny různými způsoby. Některé z možností uspořádání je možné vidět na Obr. 2.2.



Obr. 2.2 Možné struktury permanentních magnetů v rotoru BLDC stroje – převzato [4]

Jak je z Obr. 2.2 možné vidět, každá struktura PM má za následek vzájemně odlišné vlastnosti, a to zejména změna velikosti maximálního točivého momentu. Ale i podstatně odlišné výrobní nároky a s tím i spráženou, dost zásadní, výrobní cenu. Příkladně, rotor typu F je rotor s plným Halbachovo polem, tedy že celá plocha rotoru je osazena magnety, což má za následek výrazné zvýšení maximálního točivého momentu o 37 %, ale i téměř čtyřnásobné výrobní náklady oproti rotoru A bez Halbachova pole. Rotor typu C se jeví jako nejrozumnější volba. Uložení PM umožňuje 5 % nárůst maximální točivého momentu a zhruba 3 % nárůst ceny [4].

Při použití PM v povrchovém uložení stroje s vnitřním rotorem (Obr. 2.2 rotor typu A) se ale omezuje celkový rozsah otáček kvůli působení odstředivých sil právě na tyto PM. Tyto síly by totiž mohly magnety zcela odtrhnout z rotorového balení a zničit celý stroj. Proto se častěji používá právě stroj s vnějším rotorem, kde se tento problém potlačí,

protože při působení odstředivých sil jsou PM stlačovány do materiálu rotoru (magnety jsou umístěny na vnitřní straně rotoru).

Pokud je použito úplné uložení PM do tělesa rotoru, tak výše uvedený problém odstředivých sil více či méně odpadá. Nicméně se ale tímto snižuje hodnota hlavního magnetického toku a zvyšuje se hodnota rozptylového magnetického toku. Je to dáno zvýšením hodnoty magnetické vodivosti λ_r . Tato nechtěná vlastnost by se dala vyřešit při lisování plechů rotoru. A to tak, že v paketu rotoru se vytvoří vzduchové kapsy, nebo kanály, které uzavírají rozptylový magnetický tok. Tyto perforace paketu rotoru mohou ale vést k narušení strukturální integrity materiálu rotoru a v extrémních případech vést ke zničení stroje.

Proto se jeví jako zdárné řešení těchto problémů umístit rotor do vnějšku statoru, čímž je možné umístit magnety po povrchu rotoru, který takto směřuje do středu osy rotace. Odstředivé síly takto magnety pevně udržují a nemůžou se odtrhnout ze svých pozic [3].

2.1.3 Vinutí statoru

Na magnetickém obvodu, tedy železe, je umístěno statorové vinutí o m fázích, většinou třífázové a nejčastěji uloženo v drážkách [3].

Často se používají i vinutí dvoufázová, která mají výhodu v tom, že k chodu jsou zapotřebí pouze čtyři kombinace tranzistor a vratná dioda. Což ale může být problematické, z pohledu průběhu točivého momentu, který je z důvodu absence třetí fáze po každých 180° elektrických i mechanických úhlech nulový. U takového motoru, jak je u obdobných strojů známo, je problematický rozběh a jeho správný směr otáčení [3].

V případě třífázového vinutí, kde je rozmístěno vůči sobě po 120° a spínání, respektive komutace probíhá po 60° elektrických, je tento způsob efektivnější a spolehlivější. Na rozdíl od dvoufázového vinutí, dokáže použití třífázového vinutí poměrně linearizovat průběh otáček rotoru bez nežádoucích pulzací momentu. Základní zapojení cívek fází je praxi buďto do trojúhelníka nebo do hvězdy. Každé zapojení má trochu jiné vlastnosti [3]:

- Zapojení do trojúhelníku
 - Nižší maximální točivý moment při stejném (jmenovitém) proudu
 - Vyšší otáčky při stejném (jmenovitém) napájecím napětím

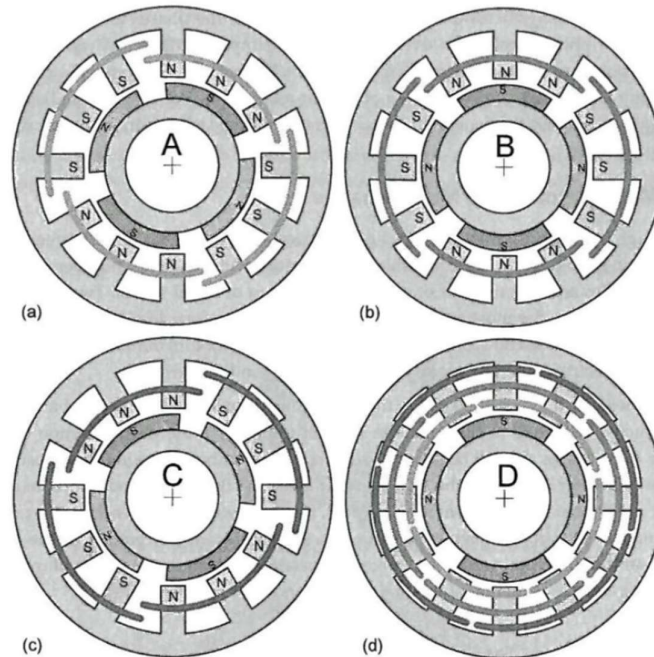
- Měkčí momentová charakteristika
- Zapojení do hvězdy
 - Vyšší maximální točivý moment při stejném (jmenovitém) proudu
 - Nižší otáčky při stejném (jmenovitém) napájecím napětí
 - tvrdší momentová charakteristika

V BLDC strojích se většinou používá koncentrický tvar vinutí. To lze rozdělit na dvě provedení:

- Zubové vinutí
- Klasické koncentrické vinutí

Zubové vinutí je koncipováno tak, že jedna fáze může být složena z několika dílčích, samostatných a soustředných cívek. Klasické koncentrické vinutí je složeno z několika skupin cívek, kdy každá z cívek z jednotlivých skupin je soustředná, a navíc má každá jinou vzdálenost mezi přední a zadní cívkovou stranou čili krok cívky. Obě tyto varianty mají specifické ovlivnění výsledného celkového magnetického toku. Příkladně klasické koncentrické, vyhlazuje postupný nárůst a pokles celkového toku skupiny cívek (magnet v rotoru postupně vybudí záběr magnetického toku dílčích cívek). Naproti tomu zubové vinutí vytváří prudké změny celkového toku. Díky tomu klasické koncentrické vinutí může pomoci v potlačení výskytu vyšších harmonických ve vzduchové mezeře a navíc, indukované napětí, odebírané z lichoběžníkového napájecího napětí, má tvar blížící se sinusovému průběhu [2, 3].

Na Obr. 2.3 jsou na částech a), b) a c) vidět rozložené jednotlivé fáze A, B a C. Ačkoli to nemusí být běžné ve všech strojích, tento stroj na obrázku d) má v každé drážce dvě cívkové strany z jedné fáze [2].



Obr. 2.3 Možnosti motoru s rozloženým vinutím – převzato [2]

2.2 Princip činnosti BLDC motoru

Jak již bylo uvedeno, rotor BLDC motoru je tvořen PM, které mohou být uloženy v drážkách podobně jako vinutí a patřičně zajištěné. Stator je vinutý cívkami vinutí, zpravidla koncentrického, a to buď v drážkách anebo na vyniklých pólech, do kterých se za pomoci řídicího obvodu komutace, střídače, přivede elektrický střídavý proud, vytvářející točivé magnetické pole.

2.3 Indukované napětí

Faradayův indukční zákon říká, že velikost indukovaného napětí v jednom vodiči stejnosměrného stroje je v upraveném tvaru:

$$U_{iv} = B_{\delta st} \cdot l_v \cdot v \quad (2.1)$$

kde $B_{\delta st\check{r}}$ je střední velikost magnetické indukce ve vzduchové mezeře, ve které se pohybuje vodič o délce l_v rychlostí v . Tento obecný vztah lze dále upravit na tvar a konkrétně aplikovat:

$$U_i = 2 \cdot N_S \cdot k_{v1} \cdot B_{\delta st\check{r}} \cdot L_S \cdot \frac{D_r}{2} \cdot \omega_m \text{ (V)} \quad (2.2)$$

kde se objevuje počet závitů jednoho vinutí spojených do série N_S , činitel vinutí k_{v1} , délka statorového vodičového svazku L_S , průměr rotoru D_r a úhlová rychlost rotoru ω_m . Z těchto v rovnici vystupujících prvků můžeme vytvořit koeficient magnetického toku k_ϕ , který lze použít i při výpočtu točivého momentu stroje. Při použití vnějšího rotoru je pozice statoru zaměněna s rotorem, ve kterém se nachází vodič. Relativní pohyb vodiče vůči magnetu je pak zprostředkován pohybujícím se magnetem [2].

$$U_i = k_\phi \cdot \omega_m \text{ (V)} \quad (2.3)$$

2.4 Točivý moment stroje

Točivý moment, tedy přesněji řečeno elektromagnetický točivý moment stroje je hlavní složkou při vytváření mechanické energie motoru. Je tomu tak proto, že mechanická energie vytvářená za jednotku času právě odpovídá výkonu stroje:

$$P = M \cdot \omega_m = M_i \cdot \omega_m \text{ (W)} \quad (2.4)$$

Kde M je točivý moment stroje, ω_m je mechanická úhlová rychlost a pokud uvážíme zanedbatelnost mechanických a elektromagnetických ztrát v rotoru tak M je roven elektromagnetickému točivému momentu M_i .

Elektromagnetický točivý moment je energie magnetického pole, která se projevuje ve vzduchové mezeře a je úměrná velikosti magnetického toku procházející skrze ni a její délce siločar. Jinými slovy magnetický tok, respektive stroj chce, aby magnetický tok procházel co nejkratší cestou. Body vzniku a zániku toku ve vzduchové mezeře jsou dány orientací magnetických napětí (jejich vektorů) statoru a rotoru. Elektromagnetický moment lze poté určit takto:

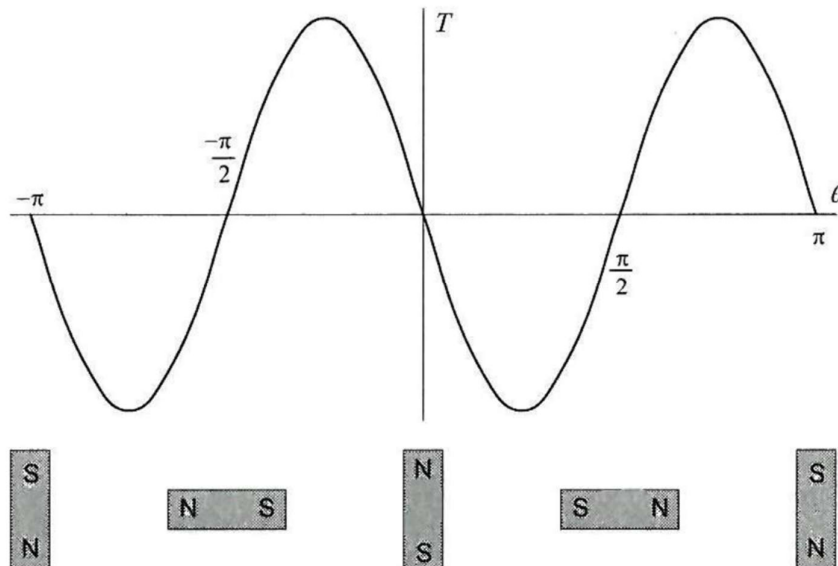
$$\vec{M}_t = \vec{F}_s \times \vec{F}_r = |\vec{F}_s| \times |\vec{F}_r| \cdot \sin \alpha \approx |\vec{\Psi}_s| \times |\vec{\Psi}_r| \cdot \beta \quad (2.5)$$

Ze vztahu (2.5) je patrné, že moment je dán i orientací magnetických toků rotoru a statoru. Je možné také konstatovat, že maximálního točivého momentu stroje lze dosáhnout tehdy, pokud jsou vektory magnetického toku rotoru a statoru, tj. $\vec{\Psi}_r$ a $\vec{\Psi}_s$ na sebe kolmé [5].

Při návrhu BLDC stroje se zpravidla vychází ze základní myšlenky, jak velký musí motor být, aby vykazoval požadovaný točivý moment. Pro motory s radiálním směrem magnetického toku se vychází z rovnice (1.6) [2].

$$M = k \cdot D^2 \cdot l \quad (\text{Nm}) \quad (2.6)$$

Kde M je moment, k je konstanta, D je průměr rotoru a l je délka stroje.

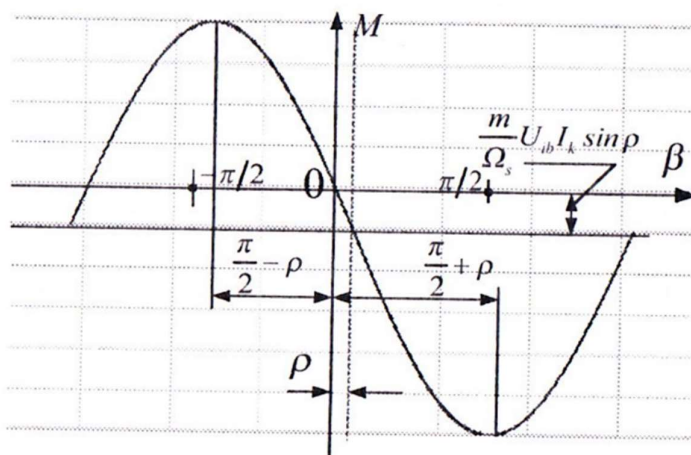


Obr. 2.4 Průběh momentu vytvořeným otáčením PM – převzato [2]

Na Obr. 2.4 můžeme vidět průběh momentu označovaný taktéž jako reluktanční moment. V místech, kde prochází nulou jsou (z angličtiny tzv. aretační polohy) místa, kde magnet je v ose s pólem statoru a je to považováno za stabilní polohu [2].

2.5 Zátěžný úhel

Zátěžný úhel β je elektrický úhel mezi indukovaným a napájecím (svorkovým) napětím. Lze jej definovat i jako mechanický, respektive jako skutečný úhel, o který je rotor při určitém zatížení a buzení natočen z polohy, v které by byl při chodu stroje naprázdno. To odpovídá i úhlu, který osa pólů stroje svírá s osou výsledného magnetického pole ve vzduchové mezeře [6, 7].



Obr. 2.5 Momentová charakteristika synchronního stroje s nenulovým R_a – převzato [8]

2.6 Napájení

BLDC stroje jsou napájeny stejnosměrným napětím a jejich zdrojem bývá často baterie. Zdrojem napětí bude tedy akumulátorová baterie a řízení, respektive komutaci bude zajišťovat polovodičový měnič a měl by být užit příslušný vyhlazovací filtr k potlačení zvlnění napětí [3].

2.7 Sledování polohy rotoru

Další nevýhodou klasických stejnosměrných strojů je okamžik komutace. Ten je dán umístěním sběracích kartáčů vůči ose komutace a ta se mění vzhledem k zatížení stroje.

Poloha sběracího ústrojí neboli kartáčů, je pevně dána výrobou a nelze ji již během průběhů a chodu stroje měnit. To má poté za následek jiskření a degradaci materiálů komutátoru. BLDC stroj tento problém nemá, protože je každá cívka fáze spínána bezkontaktně. K tomu je ale zapotřebí pevně znát její aktuální polohu.

Jedna z metod měření aktuální polohy rotoru je užití Hallových sond, které mají velmi jednoduché provedení a jsou levné. Hallova sonda je polovodičová součástka, kterou za normálního stavu protéká proud, který je vybuzen vnějším zdrojem. Pokud prochází touto tenkou destičkou vnější magnetický tok, dochází k posunu, nebo zakřivení tohoto elektrického proudu a vzniká Hallovo napětí, které je změřitelné. Magnetický tok může být vybuzen například permanentním magnetem. Z velikosti a polaritý tohoto napětí lze určit polohu rotoru. V praxi se často používají 3 sondy posunuté vzájemně 120° vůči sobě po obvodu hřídele. Vzduchová mezera mezi sondou a magnetem by měla být co nejmenší pro zajištění správnosti měřeného napětí. Nicméně tato malá vzdálenost může v případě chvění nebo ohybu hřídele tyto sondy poškodit či zničit, což by ale vzhledem k obvyklým rozměrům těchto strojů mělo být nepravděpodobné [3].

Mnohem přesnější možností, jak zjišťovat aktuální polohu rotoru, je použití optického snímače. Jedná se o spojení bloků:

- zdroj světelného paprsku
- disková clona
- optický snímač
- zesilovač

Clona v podobě disku je převážně vyráběná z kovu a je tedy neprůsvitná. Po jejím obvodu jsou ale otvory, kterými v daný moment může světelný paprsek prosvítit a snímač jej může zachytit. Tyto otvory v diskách bývají nejčastěji ve dvou variantách, a to podle použitého optického čidla. Absolutní čidlo snímá optický kód, který je v disku pomocí děr vytvořen. Posloupnost těchto děr vytváří unikátní soustavu, kde každý bit kódu reprezentuje jednu světelnou úroveň. Pak platí, že čím více úrovní, tím je měřená obvodová rychlost respektive poloha rotoru přesnější a blíží se realitě. Druhou možností je čidlo inkrementální, kde jsou všechny díry v disku rozměrově naprosto stejné. Čidlo tedy snímá pouze jejich pulznost za jednotku času [3].

2.8 Praktické využití BLDC motoru

Výkonné bezkartáčové motory byly uvedeny na trh po zavedení výroby malých, lehkých, levných a silných permanentních neodymových magnetů na začátku 80. let 20. století. V současné době jsou používány v RC modelech, počítačových ventilátorech, pohonech elektrokol, hybridních automobilech, elektromobilech a obdobně i v dalších trakčních zařízeních. BLDC stroje se provozují napříč odvětvími. Vyskytují se jako součásti pohonných jednotek v letectví, vojenských zařízeních, průmyslu, zemědělství či dopravě. Setkat se s nimi můžeme i v domácnostech, jako ruční nářadí nebo různé rotující části ve výpočetní technice, například pevných disků či ventilátorů PC [1, 9].

BLDC stroje jsou tedy využity tam, kde je napájecí napětí, respektive zdroj napětí stejnosměrné. Tím může být například akumulátorová baterie. BLDC motory mají například velmi dobrou účinnost ve srovnání s indukčními neboli asynchronními motory [9].

V současnosti jsou trendy aplikace BLDC strojů hlavně v elektromobilitě, konkrétně elektrokoloběžek, elektrokol a podobných jednostopých vozidel.

Ale můžeme je dnes nacházet i v nových generacích elektrických spotřebičů a konkrétně praček. V těch se totiž na místo jednofázového asynchronního motoru s jednoduchým převodem v podobě řemenu, začalo používat právě BLDC motory, které mohou být kvůli již zmíněným geometrickým možnostem rozměrů malé. Jinými slovy použitý motor může být v délce své osy velmi krátký, a naopak v průměru být mnohem větší než třeba jednofázová varianta asynchronního motoru. Není tedy ani nutnost použít hnací řemen bubnu a motor je napřímo spojen na hřídeli s bubnem. Tím se sníží jak ztráty třením, tak i známá velká hlučnost.

3 Princip Halbachova pole

3.1 Permanentní magnety

Permanentní magnety jsou zhotoveny práškovou metalurgií ze vzácných zemin, se slitinou neodýmium-železo-bor (NdFeB), či samarium-kobalt (SmCo). Tyto magnety ze vzácných zemin byly díky technologickému pokroku zpracování a také díky kvalitnějším materiálům, které byly objeveny v druhé polovině 20. století, zavedeny do masovější výroby a začali se hojně používat v širokém spektru aplikací. Samarium-kobaltové magnety mohou pracovat ve vyšších teplotách (až 550 °C) a mají vyšší Curieovu teplotu (800 °C), což je teplota, při které magnet ztrácí feromagnetické vlastnosti. Jsou také odolné vůči korozi. Nevýhodou je jejich křehkost, náchylnost ke štěpení a cena. Neodymové magnety mohou pracovat jen do 80 °C (nejčastější hodnota v datasheetech) a mají Curieovu teplotu v rozmezí od 310 °C do 370 °C (záleží na příměsích). Vždy však záleží na typu magnetu, tedy jak byl vyroben a jaké má podíly jednotlivých prvků [10, 11].

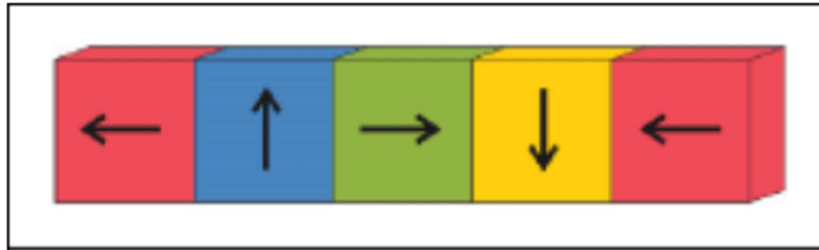
Magnety jsou velmi křehké a nejsou tedy vhodné do aplikací, kde se vyskytují silné vibrace či dokonce nárazy.

Halbachovo pole je magnetické pole, které bylo objeveno náhodou při výzkumu a optimalizaci magnetických přenosových pásek v 70. letech britským fyzikem John C Mallinsonem. Nezávisle na něm v roce 1980 americký fyzik s německým původem Klaus Halbach v Lawrence Berkeley National Laboratory v Kalifornii objevil, respektive vytvořil stejné magnetické pole při výzkumu urychlování částic [11, 12].

3.2 Konfigurace magnetů Halbachovy soustavy

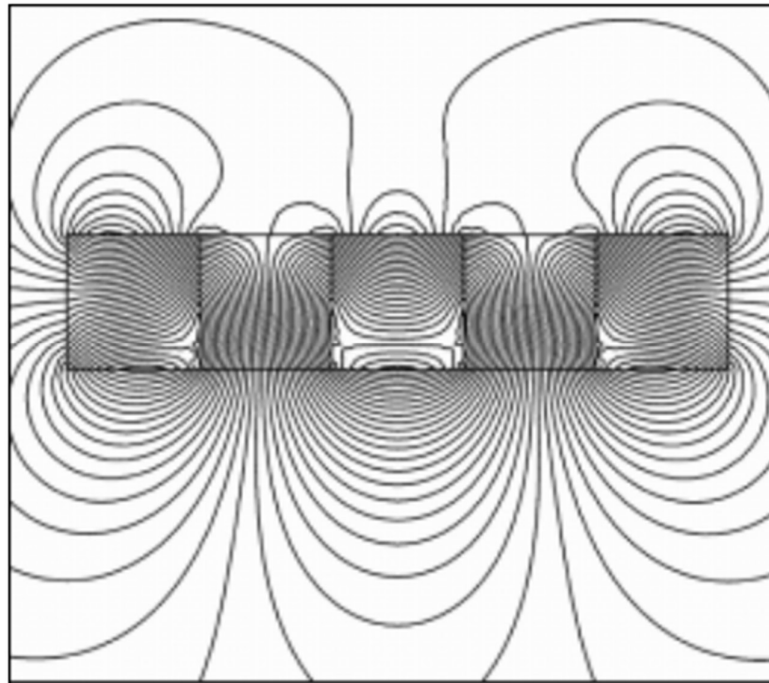
3.2.1 Klasická soustava

Permanentní magnety jsou uspořádány v řadě vedle sebe a jsou ve tvaru kvádrů, jak je naznačeno na Obr. 3.1 (šipky značí směry jejich magnetizace). Pětice kvádrů podle Obr. 3.1 tvoří základní konfiguraci Halbachovy soustavy magnetů. Jednotlivá magnetická pole magnetů se skládají, respektive sčítají a výsledné pole má pozoruhodné vlastnosti.



Obr. 3.1 Halbachova základní soustava permanentních magnetů – převzato [10]

Výsledné pole se totiž na jedné straně výrazně zesiluje a na druhé zase zeslabuje, jak je vidět na obrázku 3.2. Výsledné pole je nerovnoměrně rozloženo a je tedy nehomogenní [10].



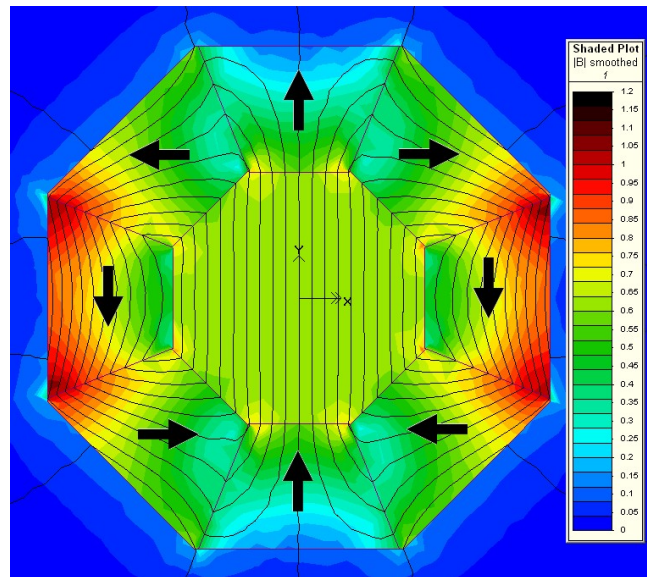
Obr. 3.2 Magnetické pole Halbachovy soustavy pětice PM a jejich průběh siločar – převzato [10]

3.2.2 Lineární soustava

V různých aplikacích lze klasickou soustavu uvedených pětice PM řadit za sebou a vytvořit lineární dráhu magnetů. Toho lze využít například k magnetické levitaci (např. trakci – Maglev) anebo k urychlování částic.

3.2.3 Cylindrická soustava

Cylindrická neboli válcová soustava je typicky využívána v točivých strojích. Myšlenka je taková, že magnetické pole, které směřuje vně, či dovnitř rotoru (záleží na konfiguraci rotoru stroje) je zeslabeno téměř k nulové hodnotě, a naopak pole směřující dovnitř stroje je maximálně zesíleno. To ovšem závisí na metodě výroby magnetů. Pokud je válec magnetů vyroben z menších dílčích magnetů, tak se vně válce vyskytuje i parazitní, nechtěné magnetické pole.



Obr. 3.3 Magnetické pole uvnitř cylindrické soustavy Halbachova pole – převzato [19]

Na Obr. 3.3 je vidět cylindrická soustava Halbachova pole. Permanentní magnety jsou postupně vůči sobě pootočený o 45° . Existují i další možnosti pootočení, např. o 90° nebo 60° . Na tomto obrázku je vidět, jak je pole uvnitř rotoru zesíleno a vně je zeslabeno [19, 20].

3.3 Aplikace Halbachova pole a jeho využití v průmyslu

Některé stroje a přístroje vyžadují velmi silné magnetické pole k zaručení jejich funkčnosti. Spousta přístrojů ani nemohla fungovat nebo nefungovala příliš správně, dokud se Halbachova soustava PM neobjevila a nezačala výroba silných PM. Tato oblast technologie je poměrně mladá, a tedy ještě ne zcela probraná a je velice pravděpodobné, že spousta možností aplikace na trh teprve v budoucnosti přijdou.

3.3.1 Maglev

V 90. letech minulého století se fyzici z Lawrence Livermore National Laboratory v Kalifornii pod vedením fyzika Richarda F. Postema pokusili najít levnější a kvalitnější řešení v železniční dopravě a dospěli k magnetické levitaci rychlovlaků [13].

Maglev, neboli z anglického Magnetic levitation, tedy magnetická levitace, funguje na principu elektromagnetické indukce. Na podvozku vlaku jsou permanentní magnety v Halbachově soustavě a pokud vlak jede obecně vyšší rychlostí než 30 km/h, tak se indukuje napětí v kolejišti, ve kterém je vodič. Trať tak vytváří vlastní magnetické pole, které působí proti změně, která jej vyvolala. Jejich snaha je tedy vlak odpuzovat od povrchu a tím jej udržuje v levitaci. V nižších rychlostech než 30 km/h by tento jev nefungoval zcela správně (v rámci bezpečnosti) a mohlo by se stát, že vlak doslova spadne. Proto jsou vlaky vybaveny i klasickými povozy, na které v nižších rychlostech vlak bezpečně dosedne. Cestovní výška je například v Evropě okolo 5 cm, v Japonsku pak 10 cm. Absence dotyku s povrchem dráhy znamená, že jediné ztráty při provozu má vlak v podobě odporu vzduchu. Díky tomu vlak obsahuje velmi málo aktivně pohyblivých částí a je zde velký příslib do budoucna, co se týká spolehlivosti a životnosti. Diskutabilním nástupcem je koncept HyperLoop, který eliminuje i poslední velké ztráty při provozu – odpor vzduchu.

3.3.2 Motory

Dalším častým odvětvím, kde se dají prakticky využít silné permanentní magnety, jsou elektrické točivé stroje. Existuje spektrum aplikací, ve kterých se dá dosáhnout skvělých výsledků při použití Halbachovy soustavy PM, ať se jedná o lineární motory, statory stejnosměrných strojů, rotory střídavých strojů, ale také například o magnetická ložiska. Tyto stroje mohou být kartáčové nebo bezkartáčové, s drážkami nebo bez drážek, s radiálním nebo axiálním polem, respektive magnetickým tokem, s magneticky měkkým železem či bez něj a tak dále.

3.3.3 Urychlovače částic

Klaus Halbach využil již dříve objevené pole, když hledal možnosti, jak urychlovat částice [11].

Principiálně jde o to, že svazek elektronů je rozkmitán na něj kolmým magnetickým polem. Při těchto kmitech elektrony vyzařují energii, respektive excitují na vyšší energetickou hladinu, čímž dojde k emisi fotonů, které se pohybují ve směru posunu elektronů. Díky tomuto jevu bylo možné vytvořit monochromatické (elektromagnetické záření kmitající pouze o jedné frekvenci) koherentní záření velmi podobné klasickému laseru (takzvané free electron lasers) [14].

Kromě výzkumných účelů se urychlovače částic s Halbachovou soustavou permanentních magnetů využívají i v lékařství k odstranění nádorů či tukových bulek. A samozřejmě ve vojensství, kde se snaží zbraň zničit ozařováním drony, letadla či balistické nebo řízené střely v rámci PVO.

3.4 Obecné výhody Halbachova pole

Výhody využití Halbachova pole namísto konvenčního uspořádání permanentních magnetů jsou:

- Silnější magnetické pole
- Použití lehčích materiálů v rotoru
- Magnetický tok ve vzduchové mezeře má tvar více se blížící sinusovému průběhu
- Velká hodnota špičkového momentu díky malé reakci kotvy (vlivem nízké magnetizační reaktance)
- Malé odmagnetování stroje

4 Návrh BLDC motoru s vnějším rotorem

Dle zadání má být navržen bezkartáčový stejnosměrný motor s vnějším, a navíc dvojitým rotorem využívající Halbachovo pole. Pevné hodnoty nebyly při zadání této práce stanoveny. Nicméně vzhledem k tomu, že stator ale i vnější a vnitřní rotor, který je osazen PM bude navržen tak, aby je bylo možno vytisknout za pomoci 3D tisku například z materiálu ABS, je tedy nutné, aby rozměry vnějšího rotoru, nepřekročily maximální možné tisknutelné rozměry 3D tiskárny. Vychází se tedy z maximálních rozměrů tisknutelné plochy konkrétní 3D tiskárny na Fakultě Elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni. Vnější průměr vnějšího statoru by tedy neměl být větší než 180 mm.

4.1 Stanovení parametrů statoru

Po konzultaci s vedoucím práce bylo dohodnuto, že bude proveden zjednodušený návrh stroje s 8 póly a počet fází statorového vinutí bude 5, neboli pětifázové. Pětifázové vinutí bylo zvoleno proto, že více fází stroje znamená maximalizaci výkonu P (W), respektive jeho hladší průběh a zlepší se jeho účinnost. Nicméně s vyšším počtem fází přichází i složitější zapojení vinutí.

Taktéž je zvolen počet drážek na pól a fázi:

$$q = \frac{Q}{2p \cdot m} = \frac{1}{4} \quad (4.1)$$

Kde Q je počet drážek, p je počet pólů a m je počet fází. Z čehož plyne, že pro zvolenou variantu s 8 póly bude počet drážek statoru stanoven:

$$Q = 2p \cdot m \cdot q = 8 \cdot 5 \cdot \frac{1}{4} = 10 \quad (4.2)$$

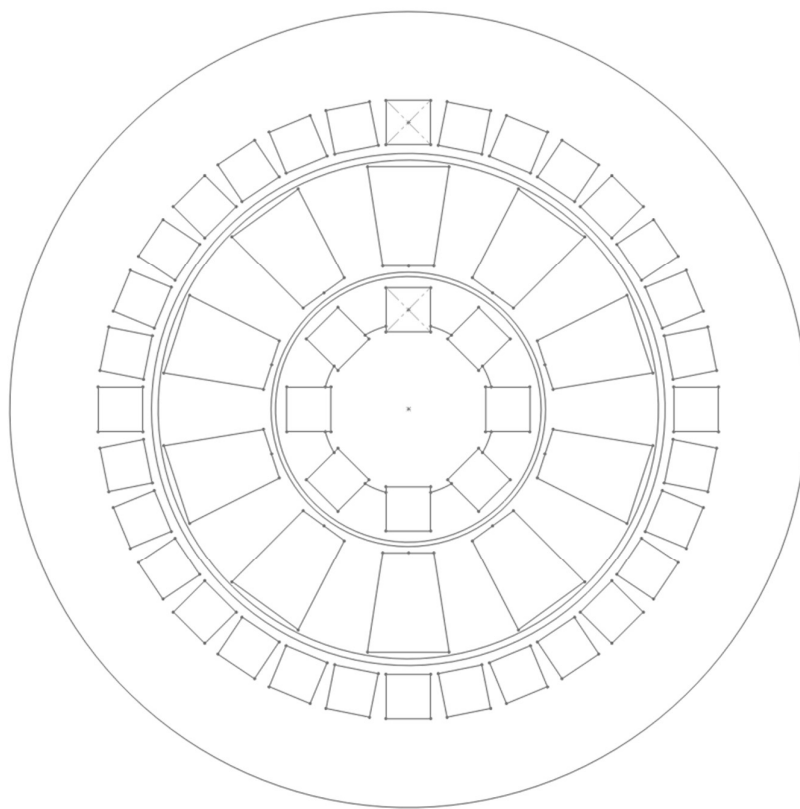
4.1.1 Výpočet geometrických rozměrů

Jak již bylo řečeno, vnější průměr vnějšího rotoru je:

$$D_{2R} = 180 \text{ mm} \quad (4.3)$$

Stanovení vzdálenosti osazení permanentních magnetů od středu osy, respektive od vnějšího průměru vnějšího rotoru, bylo odhadnuto vzhledem k předpokládané hmotnosti PM a předběžných otáček motoru. Kvůli dostupnosti tvarů PM na trhu byl zvolen rozměr s označením 40-10-10, což reprezentuje délku, šířku a výšku v milimetrech.

Dále byl zvolen vnější průměr vnitřního rotoru. Permanentní magnety, které jsou na něm osazené, nejsou uspořádány v Halbachově soustavě, tudíž každý magnet reprezentuje jeden pól. Je tedy nutné, aby mezi každým z nich byla dostatečná bezpečná vzdálenost. S vedoucím práce bylo dohodnuto, že tato vzdálenost by měla být okolo 4 až 5 mm a byla tedy navrhnutá, respektive odhadnuta za pomoci CAD systému AutoCAD, vzdálenost 4,15 mm. Mezi plochou částí, stěnou, PM a vnějším průměrem vnitřního rotoru je vzdálenost 2,5 mm a nejužší místo nepřesahuje 2 mm.



Obr. 4.1 Model počátečního návrhu motoru v AutoCAD

Na Obr. 4.1 je návrh motoru bez drážky a bez magnetických plechů. Tento model sloužil pro ověření zvolených geometrických rozměrů. Zmíněné plechy se do modelu zakreslily až

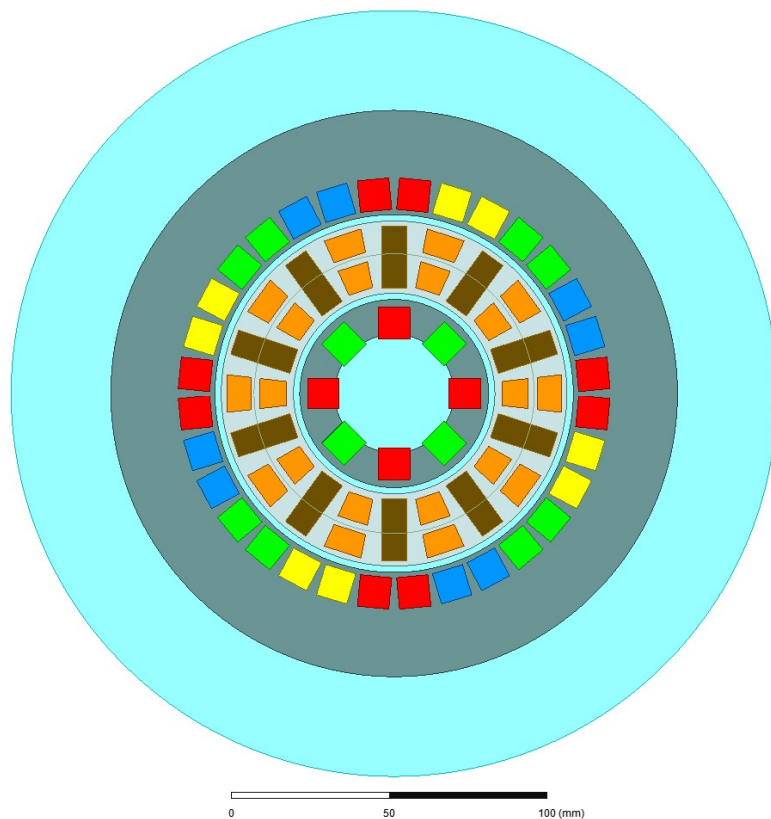
v programu ANSYS. Taktéž se jemně upravily rozměry, příkladně rozměry zubu a s tím se změnila i výsledná plocha drážky.

Vnější průměr statoru byl zvolen s ohledem na potřebnou vzduchovou mezeru, která byla zvolena na hodnotu 2 mm a tím danou přesností tisku a nyní je možné určit pólovou rozteč statoru:

$$t_p = \frac{\pi \cdot D_1}{2p} = \frac{\pi \cdot 0,055}{8} = 0,0216 \text{ m} \quad (4.4)$$

4.1.2 Magnetické plechy a vinutí

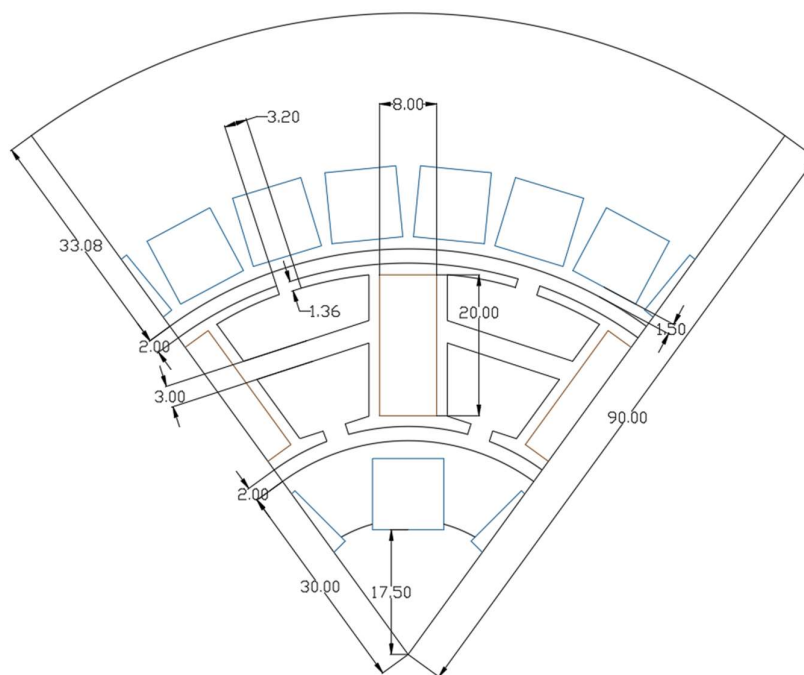
Protože celý magnetický obvod motoru má být vytisknut na 3D tiskárně a jak je známo, plast, respektive většina druhů polymerů nejsou magneticky vodivé, nebo nemají dobré magnetické vlastnosti, bylo dohodnuto s vedoucím práce, že do zubů statoru budou vloženy magnetické plechy. Tyto plechy by měly alespoň částečně zlepšit uzavírání magnetického toku stroje. Kvůli tomu je následně nutné v simulaci ANSYS hlídat jejich možné přesycení.



Obr. 4.2 Model navrženého motoru v ANSYS

Upravený model z Obr. 4.1 je vidět na Obr. 4.2. Jsou na něm barevně odlišené jednotlivé permanentní magnety, respektive jednotlivé póly, oranžově označené drážky zubového vinutí, světle šedě je označen magnetický obvod statoru stroje a tmavě šedou pak vnější a vnitřní rotor. Zmíněné vložené magnetické plechy jsou označeny khaki barvou. Vnější světle tyrkysový kruh a mezikruží pak reprezentuje okolní prostředí a vzduchovou mezeru v rámci simulace. Vnější kruh je takto velký z důvodu zdárného vypočítání rozložení magnetické indukce B a magnetického indukčního toku Φ .

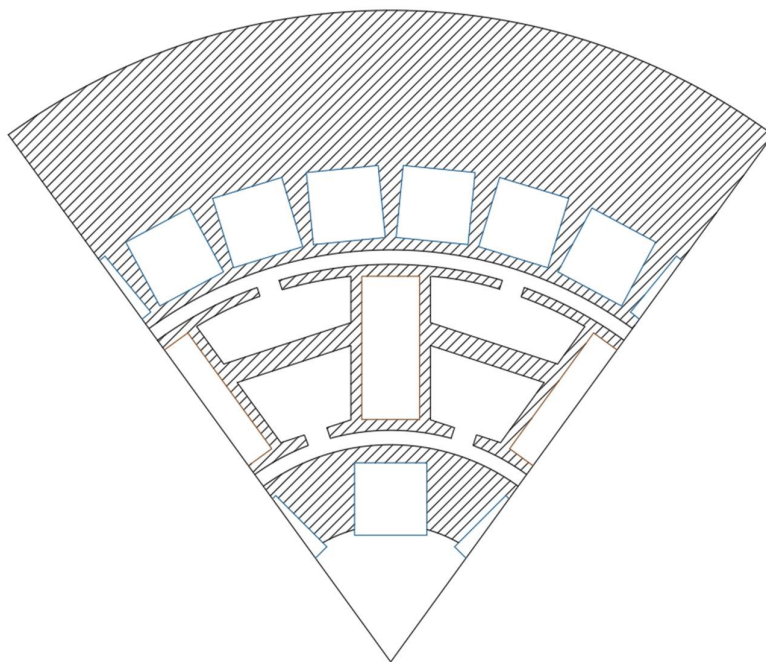
4.1.3 Drážka statoru



Obr. 4.3 Detail výseče motoru

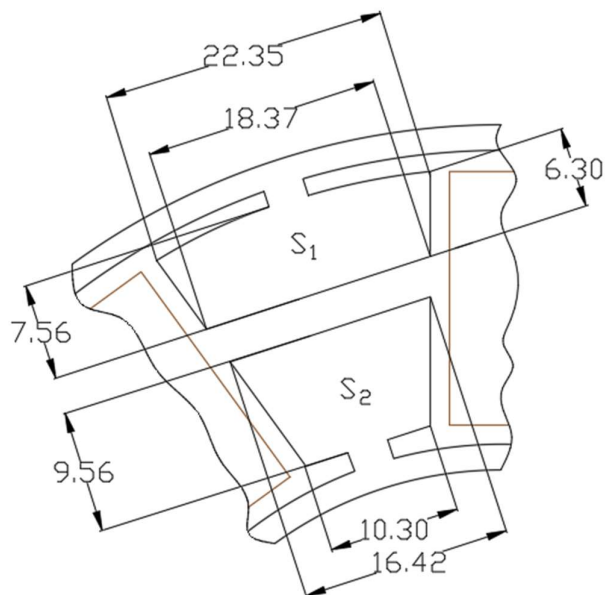
Na Obr. 4.3 můžeme vidět okótovanou výseč navrhovaného motoru. Jsou v ní hnědě vyznačeny vložené magnetické plechy a modře permanentní magnety.

Je důležité navrhnout, respektive nakreslit horní a dolní drážky statoru tak, aby jejich plochy byly stejné, nebo s minimálním rozdílem. Poté jsou jejich výšky ale rozdílné a jedna z možností, jak s tímto naložit je, uvažovat jejich aritmetický průměr jako jediný rozměr.



Obr. 4.4 Detail výseče motoru s šrafovaním

Na Obr. 4.4 je vidět stejná výseč motoru, nicméně v tomto případě je zde šrafovaná oblast, která vyznačuje magnetický obvod, konkrétně tištěnou část magnetického obvodu z plastu.



Obr. 4.5 Detail drážky statoru

Na Obr. 4.5 jsou vidět dvě drážky s plochou S_1 a S_2 . Cílem nákresu, respektive návrhu bylo, aby se S_1 přibližně rovnalo S_2 . Dále byl požadavek, aby mezi drážkami s plochami S_1 a S_2 byl vytvořen sloupek, který by je odděloval. Tloušťka tohoto sloupku byla dohodnuta s vedoucím práce na 3 mm:

$$S_{celk} = 312,1 \text{ mm}^2 \quad (4.5)$$

$$S_1 = 128,86 \text{ mm}^2 \quad (4.6)$$

$$S_2 = 130,66 \text{ mm}^2 \quad (4.7)$$

$$S_d = S_1 + S_2 = 128,86 + 130,66 = 259,5 \text{ mm}^2 \quad (4.8)$$

$$S_{sloupek} = 52,57 \text{ mm}^2 \quad (4.9)$$

Celková plocha drážky ze vzorce (4.5) je plocha drážky včetně sloupku a S_d je plocha obou drážek nad sebou.

4.1.4 Vinutí

Jak již bylo zmíněno, po konzultaci s vedoucím práce, bylo zvoleno jako nejvhodnější použít pětifázové vinutí, kvůli maximalizaci výkonu. Toto vinutí bude zapojeno do hvězdy, což se jeví jako nejadekvátnější volba.

Vinutí bylo zvoleno jako dvouvrstvé zubové vinutí:

$$2u = 2 \quad (4.10)$$

S vedoucím práce bylo dohodnuto, že by se proudová hustota měla pohybovat okolo hodnoty 3 až 4 A/mm². S vedoucím práce bylo taktéž dohodnuto, že k návrhu vinutí se použije vodič o tloušťce 0,9 mm.

$$d_v = 0,9 \text{ mm} \quad (4.11)$$

Plocha jednoho vodiče je potom:

$$S_v = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,9^2}{4} = 0,636 \text{ mm}^2 \quad (4.12)$$

Maximální počet paralelních větví se určí následovně:

$$a = \frac{Q}{m} = \frac{10}{5} = 2 \quad (4.13)$$

Nicméně pro tento návrh je zvolen počet paralelních větví:

$$a = 1 \quad (4.14)$$

Odpor vinutí je možno určit dle postupu uvedeného v [15]. V našem případě je použito zubové vinutí a cívkový krok je:

$$y_{1d} = 1 \quad (4.15)$$

Počet drážek na pól lze vypočítat:

$$Q_p = \frac{Q}{2p} = \frac{10}{8} = \frac{5}{4} = 1,25 \quad (4.16)$$

Kde Q je počet drážek statoru a $2p$ je počet pólů.

Činitel zkrácení kroku se poté určí takto:

$$\beta = \frac{y_{1d}}{Q_p} = \frac{1}{1,25} = 0,8 \quad (4.17)$$

Kompletní Tingleyho schéma lze určit z následujících parametrů. Počet sloupců schématu, se vypočte z násobku počtu fází m a čitatele počtu drážek na pól a fázi [15]:

$$q = \frac{n}{c} = \frac{1}{4} \quad (4.18)$$

$$\text{počet sloupců} = m \cdot n = 5 \cdot 1 = 5 \quad (4.19)$$

Počet řádků je poté roven počtu pólů stroje:

$$\text{počet řádků} = 2p = 8 \quad (4.20)$$

Celkový počet buněk Tingleyho schématu je tedy:

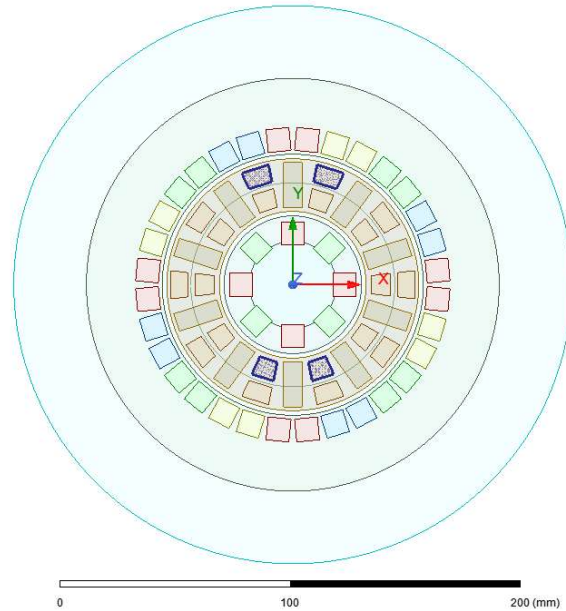
$$\text{počet buněk} = 8 \cdot 5 = 40 \quad (4.21)$$

Přičemž podle koeficientu c bude vyplněna každá 4. buňka.

pól/fáze	A	C'	E	D'	B
	A'	C	E'	D	B'
1	1				3
	2				4
2				5	
				6	
3			7		
			8		
4		9			
		10			
5	11				13
	12				14
6				15	
				16	
7			17		
			18		
8		19			
		20			

Obr. 4.6 Tingleyho schéma navrhovaného motoru

Počet drážek ze vzorce (4.2) je roven 10, nicméně v tomto návrhu se uvažuje dvojitý rotor. Takže jedna drážka bude muset být rozdělena na dvě, horní a dolní. Fáze uložena v těchto drážkách, bude rozdělena do dvou vinutí v sérii, jak je vidět na Obr. 4.7.



Obr. 4.7 Zobrazení uložení jedné fáze vinutí motoru

Na Obr. 4.7 je tmavě modrou vyobrazeny drážky, respektive ohraničeny drážky, ve kterých bude uložena fáze A. Nahoře je uložena v horní drážce a dole v dolní drážce (blíže ke hřídeli). Je tomu tak proto, že se jedná o dvouvrstvé vinutí a také že motor má dva rotory a jedna cívka je vždy blíže k druhému rotoru.

K výpočtu odporu vinutí je třeba znát jeho celkovou délku jednoho závitu v drážce:

$$l_d = 0,04 \text{ m} \quad (4.22)$$

Přičemž l_d je zároveň délka statorového svazku.

A taktéž je třeba určit délku čela:

$$l_\xi = K_\xi \cdot b_c + 2 \cdot B = 1,5 \cdot 0,0321 + 2 \cdot 0,01 = 0,068 \text{ m} \quad (4.23)$$

Kde K_ξ je činitel, který je závislý na počtu pólů stroje a typu izolace čel, b_c je střední šířka cívky určená na oblouku kružnice, procházející středem hloubky drážky a B je rovný úsek části cívky vystupující z drážky a u vsypávaných vinutí se bere $B = 0,01 \text{ m}$ [15].

$$b_c = \frac{\pi \cdot (D_1 - h_d)}{2p} \cdot \beta = \frac{\pi \cdot (0,11 - 8,56 \cdot 10^{-3})}{8} \cdot 0,8 = 0,0318 \text{ m} \quad (4.24)$$

Kde D_1 je vnější průměr statoru, h_d je hloubka drážky, $2p$ je počet pólů a β je činitel zkrácení kroku.

Vzhledem k zjednodušení návrhu a výpočtu se v tomto případě h_d určí jako aritmetický průměr dvou hodnot hloubky drážky h_{d1} a h_{d2} , protože stator se složen ze dvou drážek (horní a dolní).

$$h_d = \frac{h_{d1} + h_{d2}}{2} = \frac{7,56 + 9,56}{2} = 8,56 \text{ mm} \quad (4.25)$$

Délka závitu je poté:

$$l_z = 2 \cdot l_\zeta + 2 \cdot l_d = 2 \cdot 0,068 + 2 \cdot 0,04 = 0,216 \text{ m} \quad (4.26)$$

A konečně výpočet odporu při 20 °C:

$$R_{v2 \text{ } ^\circ\text{C}} = \rho_{Cu20^\circ\text{C}} \cdot \frac{N_s \cdot l_z}{S_v \cdot a} = \frac{1}{58,5} \cdot 10^{-6} \cdot \frac{60 \cdot 0,216}{6,36 \cdot 10^{-7} \cdot 1} = 0,282 \ \Omega \quad (4.27)$$

Kde N_s je počet závitů v sérii a je určen ve vzorci (4.40), l_z je délka závitu, S_v je plocha vodiče, $\rho_{Cu20^\circ\text{C}}$ je tabulková hodnota měrného odporu mědi při teplotě 20 °C a a je počet paralelních větví.

Výpočet odporu při provozní teplotě, jejíž hodnota byla stanovena po konzultaci s vedoucím práce na 60 °C:

$$\begin{aligned} \rho_{Cu60^\circ\text{C}} &= \rho_{Cu20^\circ\text{C}} \cdot (1 + \alpha_{Cu} \cdot \Delta\vartheta) = \frac{1}{58,5} \cdot 10^{-6} \cdot (1 + 0,004 \cdot (60 - 20)) \\ &= 1,98 \cdot 10^{-8} \ \Omega/\text{m} \end{aligned} \quad (4.28)$$

Kde α_{Cu} je teplotní součinitel mědi a $\Delta\vartheta$ je rozdíl teplot.

A konečně výpočet odporu při 60 °C:

$$R_{v60^{\circ}C} = \rho_{Cu60^{\circ}C} \cdot \frac{N_S \cdot l_z}{S_v \cdot a} = 1,98 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{60 \cdot 0,216}{6,36 \cdot 10^{-7} \cdot 1} = 0,328 \Omega \quad (4.29)$$

$$R_a = 0,328 \Omega \quad (4.30)$$

Kde N_S je počet závitů v sérii a je určen ve vzorci (4.40), l_z je délka závitu, S_v je plocha vodiče, $\rho_{Cu60^{\circ}C}$ je vypočítaná hodnota měrného odporu mědi při pracovní teplotě a a je počet paralelních větví. Velikost vypočítaného odporu vinutí je nyní možné vložit do modelu v ANSYS.

Výpočet velikosti rozptylové indukčnosti čel vinutí zanedbáme, respektive pomíneme.

4.2 Činitel elektromotorické síly

Činitel elektromotorické síly k_E byl po konzultaci s vedoucím práce zvolen:

$$k_E = \frac{U_i}{U} = 0,9 \quad (4.31)$$

Je to kvůli tomu, že tato hodnota je typická pro elektronicky komutované motory, tj. neměla by nabývat vyšší hodnoty.

4.3 Baterie

Jmenovité napětí napájecí baterie bylo s vedoucím práce zvoleno na hodnotu 60 V. Je tomu proto, že to je běžná hodnota napětí baterií na trhu a také hlavně proto, že se na Fakultě Elektrotechnické již nachází vytvořená práce na téma měniče, který by v tomto případě byl vhodný k řízení tohoto motoru.

$$U_{DC} = 60 \text{ V} \quad (4.32)$$

4.4 Řízení

Průběh řídicího napětí BLDC je obdélníkové. Ideální průběh indukované napětí je lichoběžníkové. Nicméně v případě plastového magnetického obvodu nebylo možné pomocí tvarování hlav zubů dosáhnout vhodného průběhu magnetického toku pro docílení lichoběžníkového průběhu indukovaného napětí. Tento jev byl ověřen pomocí zkoušek různých geometrií statorového paketu v programu ANSYS. Výsledné pole a indukované napětí má sinusový průběh, což vede na potřebu sinusového řízení vstupního napětí. Při návrhu bylo zvoleno řízení se sinusovým průběhem.

S vedoucím práce bylo dohodnuto, že jmenovité otáčky motoru budou:

$$n_n = 3000 \text{ ot/min} \quad (4.33)$$

$$\omega_s = \frac{n}{30} \cdot \pi = \frac{3000}{30} \cdot \pi = 314,16 \text{ rad/s} \quad (4.34)$$

A tedy frekvence rotace magnetického pole a zároveň frekvence komutace bude:

$$f_e = \frac{n}{60} \cdot p = \frac{3000}{60} \cdot 4 = 200 \text{ Hz} \quad (4.35)$$

4.4.1 Ověření modelu v ANSYS

V modelu je třeba uvážit vlastnosti a účel jednotlivých částí motoru. Proto každé z nich, je třeba tzv. přidat materiál, tj. z čeho je daná část vyrobena (od toho se odvíjí např. permeabilita, vodivost, B-H charakteristika atd.). Příkladně permanentní magnety, jsou na vnějším rotoru rozmístěny v Halbachově soustavě, takže je nejprve nutné určit jejich směr magnetizace. Vycházíme z určité posloupnosti z Obr. 4.1 a postupně určíme směr magnetů, respektive severní a jižní pól.

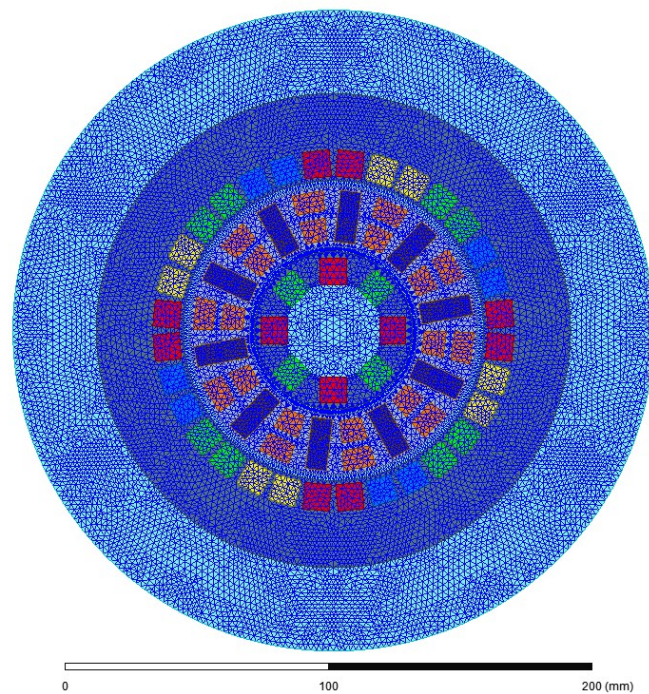
Nyní je možné s nakresleným modelem a přiřazením materiálů k jednotlivým konstrukčním částem motoru získat požadované informace, respektive časové průběhy požadovaných veličin.

Metoda konečných prvků MKP, z angl. FEA je matematická interpretace daného fyzikálního systému konkrétního modelu, nebo sestavy společně s použitím materiálových vlastností.

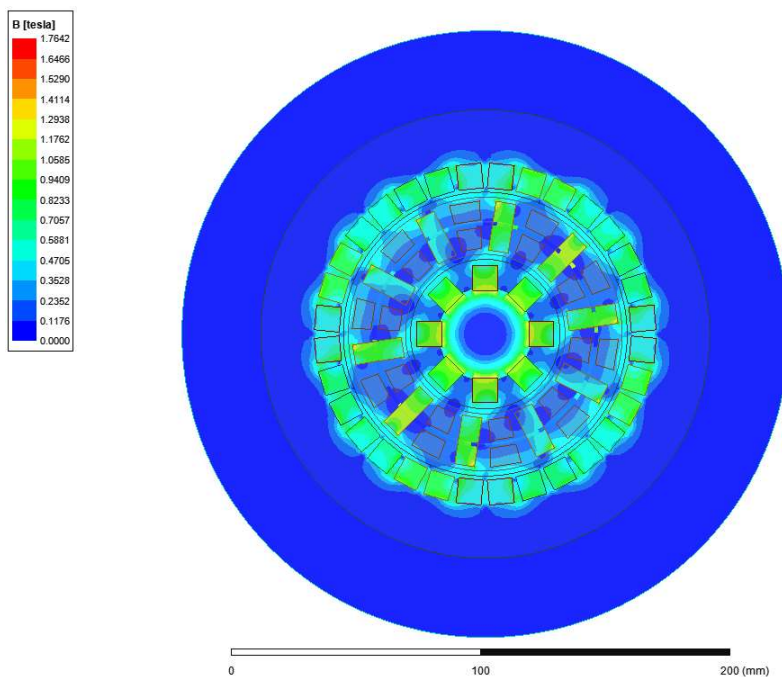
Je ale nutné nejprve vykreslit mřížku nebo častěji síť, tzv. mesh. Meshing, je jeden z nejdůležitějších kroků v provedení simulace pomocí MKP. Mesh je složena z bodů, elementů a ty jsou spojeny uzly, tzv. nodes reprezentující souřadnice a další informace a dohromady vytvářejí finální geometrický útvar. Čím pak složitější je tvar, tím náročnější je mesh a tím i výpočet simulace. Jinými slovy mesh dělá ze složitých tvarů méně složité tvary (elementy) pro program a následné výpočty.

Je nutné stanovit okrajové podmínky. Tedy stanovit vektorový potenciál na vnější hraně okolního prostředí:

$$\vec{A} = 0 \quad (4.36)$$

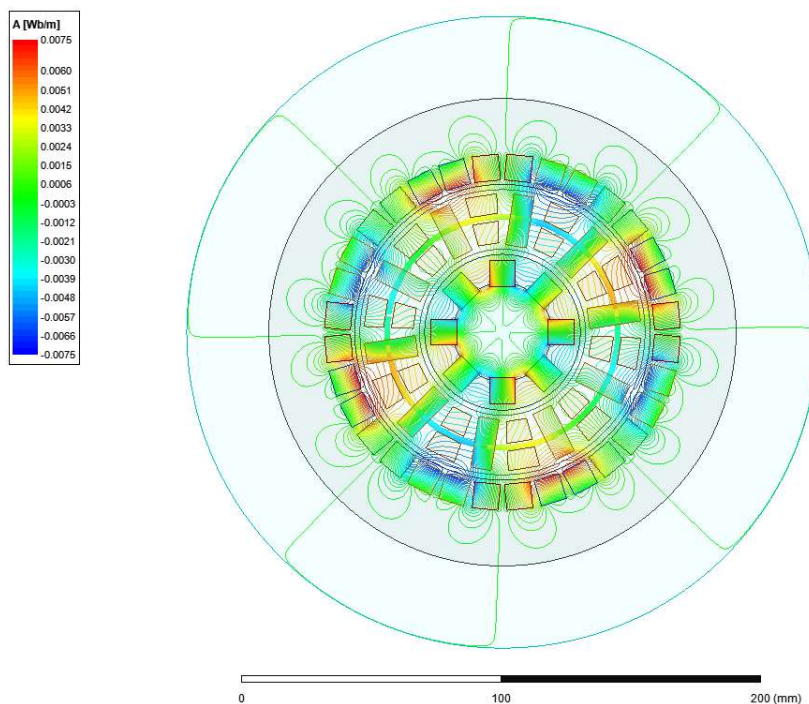


Obr. 4.8 Vykreslení mesh modelu motoru

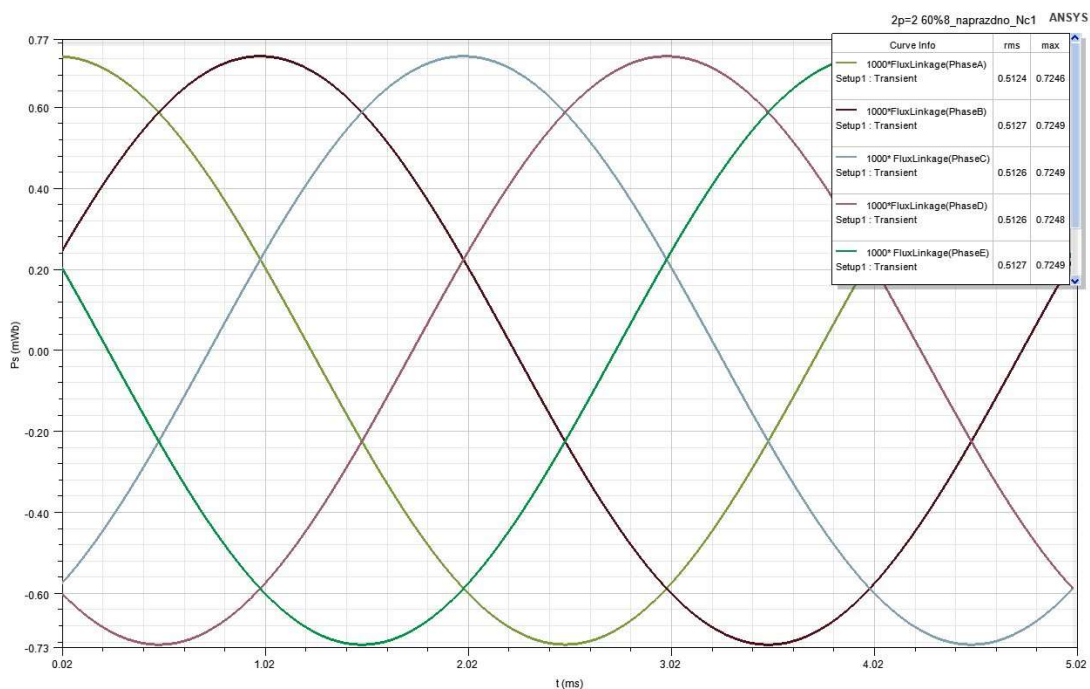


Obr. 4.9 Magnetická indukce motoru s jedním závitom naprázdno

Na Obr. 4.9 je možné vidieť, že vinutí s jedním závitom, respektive dvěma v sérii, má maximální magnetickou indukci B okolo 1,1 T.

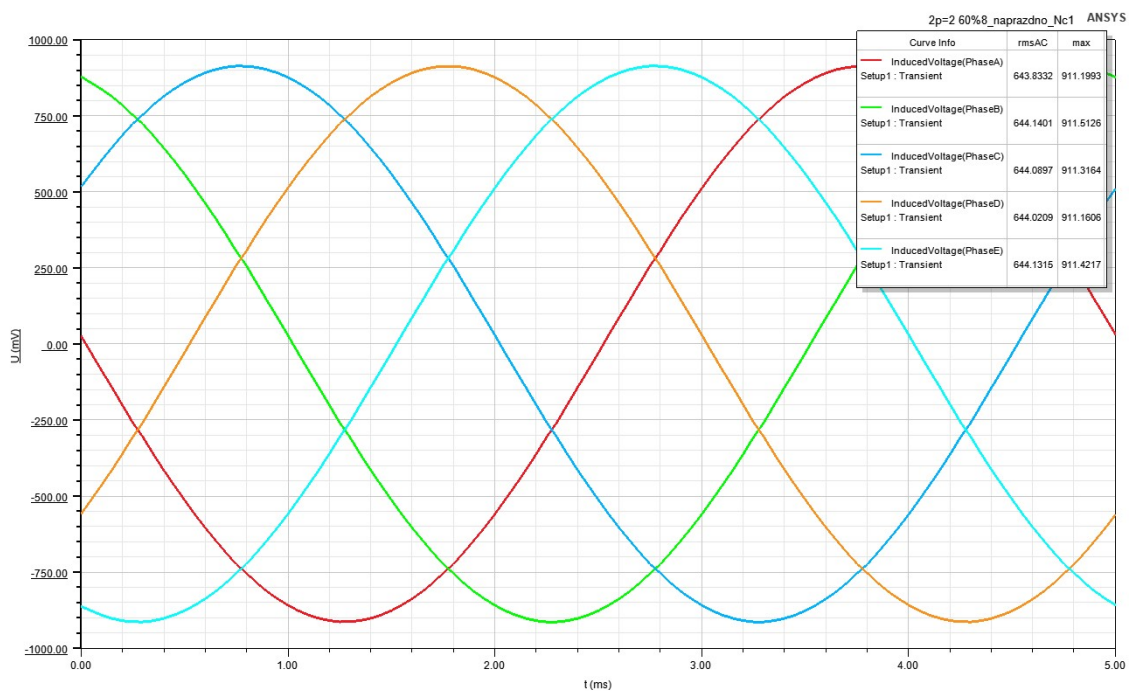


Obr. 4.10 Magnetický indukční tok v motoru s jedním závitom naprázdno



Obr. 4.11 Průběh spřaženého magnetického toku v závislosti na čase

Na Obr. 4.11 je možné vidět výsledný časový průběh spřaženého magnetického toku Ψ_s modelu motoru s jedním závitom na cívku čili $N_C = 1$.



Obr. 4.12 Průběh indukovaného napětí do vinutí jedné fáze v závislosti na čase

Na Obr. 4.12 je možné sledovat opět časový průběh, tentokrát ale indukovaného napětí U_i modelu motoru do jedné fáze čili $2 \cdot N_C = 1$, nebo $N_S = 2$. Efektivní hodnota indukovaného napětí je po zaokrouhlení 0,67 V. Oba průběhy na předchozích dvou grafických závislostech byly získány simulací v ANSYS, kdy spolu pevně spojený vnější a vnitřní rotor se pohybovaly okolo statoru rychlostí $n = 3000$ ot/min.

4.5 Určení počtu závitů statoru

Nejprve je nutné určit efektivní hodnotu fázového napětí statoru. Ve vzorci (4.37) dále vystupuje koeficient 1,9, což je dáno použitím pětifázového systému.

$$U_f = \frac{U_{DC}}{\sqrt{2} \cdot 1,9} = \frac{60}{\sqrt{2} \cdot 1,9} = 22,33 \text{ V} \quad (4.37)$$

Kde U_f je fázové napětí a U_{DC} je napětí baterie, resp. zdroje.

Dále je třeba určit indukované napětí, které se bude indukovat do statorového vinutí vlivem rotace permanentních magnetů v rotoru.

$$U_i = U_f \cdot k_E = 22,33 \cdot 0,9 = 20,09 \text{ V} \quad (4.38)$$

Kde U_f je fázové napětí a k_E činitel elektromotorické síly.

Vzhledem k tomu, že vinutí každé fáze sestává z více než jedné cívky (v tomto případě ze dvou cívek), tak musíme uvážit rozdíl mezi závity v sérii a závity cívky. Je to kvůli tomu, že v jedné drážce se najednou nachází právě dvě strany vinutí dvou cívek, resp. Dvou fází. Ze simulace, konkrétně na Obr. 4.12 jsme získali efektivní hodnotu U_{i2z} indukovaného napětí do vinutí jedné fáze:

$$U_{i2z} = 0,67 \text{ V} \quad (4.39)$$

Hodnota ze vzorce (4.39) je získána ze simulace ANSYS modelu BLDC motoru pro jeden závit, resp. dva v sérii čili $N_S = 2$.

Výsledný počet závitů v sérii je tedy:

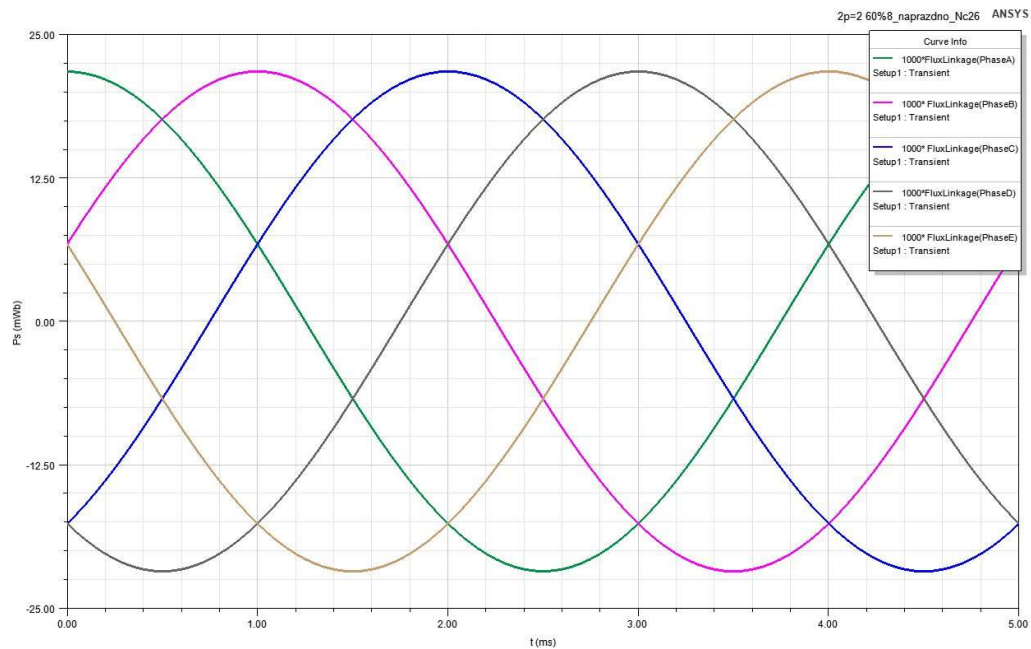
$$N_S = \frac{2 \cdot U_i}{U_{i2z}} = \frac{2 \cdot 20,09}{0,673} = 59,7 \doteq 60 \text{ závitů} \quad (4.40)$$

Počet závitů jedné cívky jedné fáze je potom polovina závitů v sérii:

$$N_C = \frac{N_S}{2} = \frac{60}{2} = 30 \text{ závitů} \quad (4.41)$$

4.6 Ověření výpočtů a motor v chodu naprázdno

Výsledný počet závitů můžeme nyní vložit do modelu v ANSYS a provést simulaci znovu a získat hodnoty indukovaného napětí v závislosti na čase a při jmenovitých otáčkách ve stavu stroje naprázdno a zobrazit magnetickou indukci v motoru.

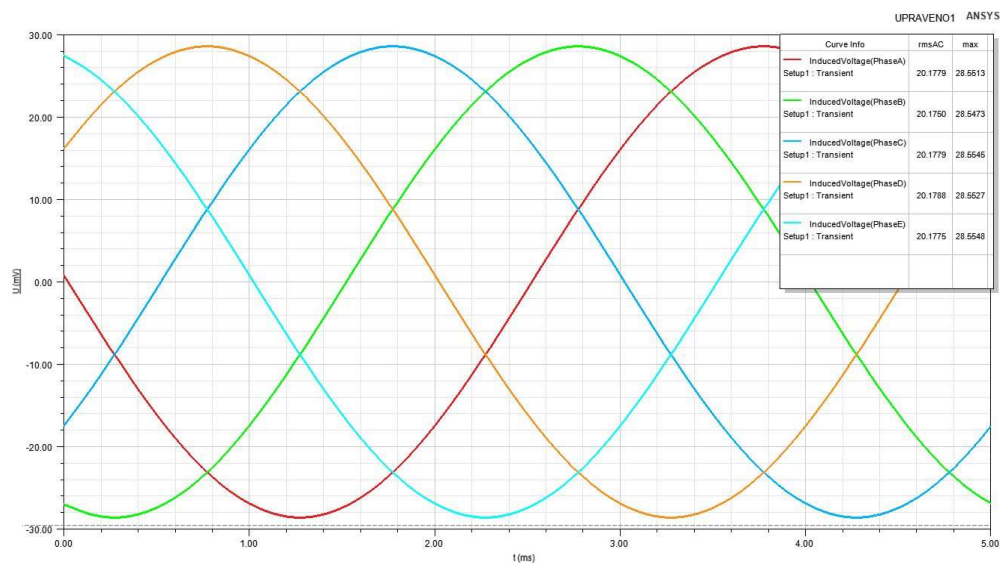


Obr. 4.13 Průběh spráženého magnetického toku při $N_c = 30$ naprázdno

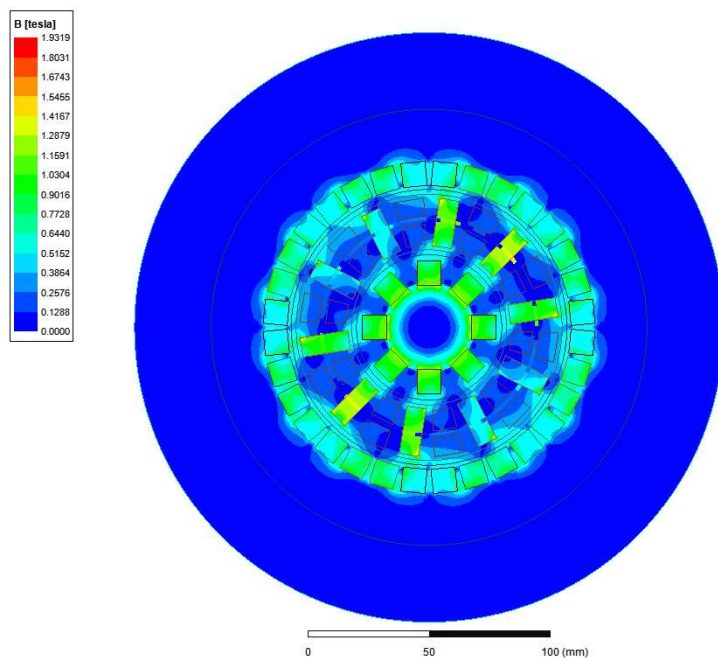
Důvodem zvýšení hodnoty spráženého magnetického toku na Obr. 4.13 je dáno tím, že:

$$\Psi_S = N_S \cdot F \quad (4.42)$$

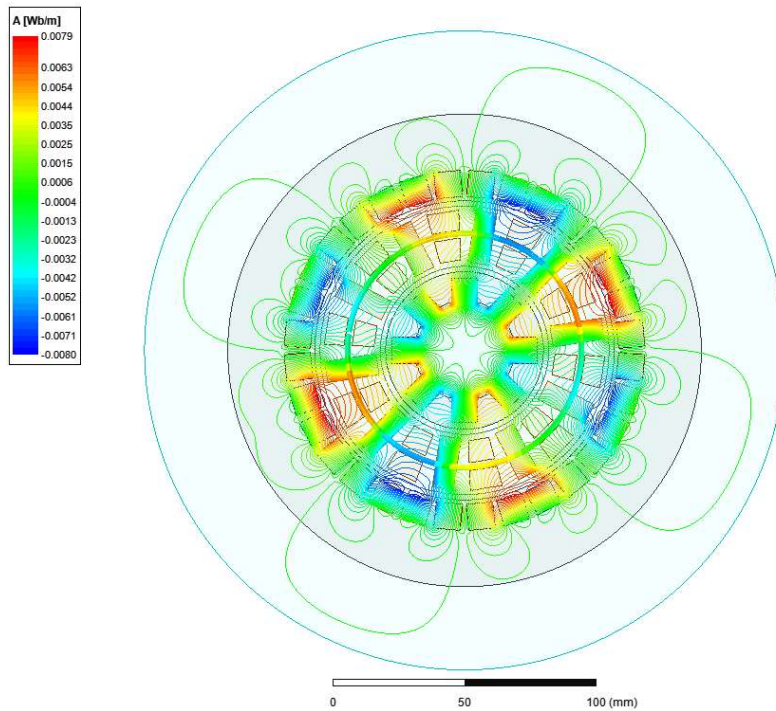
Kde N_s je počet závitů v sérii a F je magnetické napětí permanentních magnetů, které je dáno a je neproměnné. Na Obr. 4.14 je možné vidět časový průběh indukovaného napětí U_i . Z průběhu můžeme sledovat, že efektivní hodnota je 20,18 V a je tedy téměř totožná s naší vypočtenou. Důvodem rozdílnosti těchto dvou hodnot je zaokrouhlování v počtu závitů na celé číslo.



Obr. 4.14 Průběh indukovaného napětí při $N_c = 30$ naprázdno



Obr. 4.15 Magnetická indukce motoru při $N_c = 30$ naprázdno

Obr. 4.16 Magnetický tok v motoru při $N_c = 30$ naprázdno

4.7 Výsledky z ANSYS

S vedoucím práce bylo dohodnuto po zkušebních orientačních výpočtech, že požadovaný vnitřní výkon stroje bude:

$$P_i = 1000 \text{ W} \quad (4.43)$$

Je to kvůli tomu, že větší vnitřní výkon by vedl k větší efektivní hodnotě proudu procházejícího vinutím jednotlivých fází ve statoru a tím ke zvýšenému oteplení, což je v našem případě nežádoucí. Stator vytisknutý pomocí 3D tisku z plastu, by se totiž mohl doslova roztéct. Nicméně, krátkodobé zvýšení výkonu a i momentu, respektive proudu by mělo být možné.

Účinník byl zvolen, z poznatků obdobných strojů a motorů s měniči, a to s hodnotou:

$$\cos \varphi = 0,8 \quad (4.44)$$

Hodnota účinníku je odhadnuta, respektive zvolena, a tedy reálná hodnota se může lišit.

Se známými hodnotami můžeme nyní dosadit do rovnice výpočtu vnitřního výkonu a získat efektivní hodnotu proudu pro 1000 W:

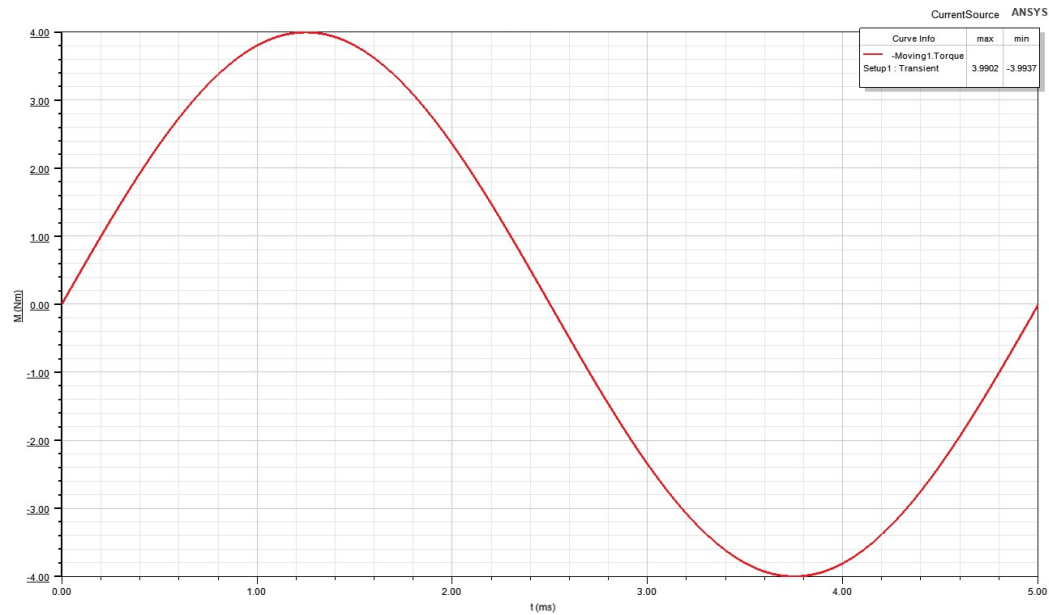
$$P_i = m \cdot U_i \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (4.45)$$

$$I = \frac{P_i}{m \cdot U_i \cdot \cos \varphi} = \frac{1000}{5 \cdot 20,18 \cdot 0,8} = 12,4 \text{ A} \quad (4.46)$$

Kde I je efektivní hodnota napájecího proudu, m je počet fází, P_i je vnitřní výkon, U_i je efektivní hodnota indukovaného napětí a $\cos \varphi$ je účinník.

4.7.1 Proudový zdroj

Hodnotu proudu vypočítanou ve vzorci (4.46) nyní můžeme vložit do našeho modelu s proudovým zdrojem v ANSYS. Vzhledem k tomu, že ještě neznáme optimální zátěžný úhel, musíme parametry simulace poupravit. Rotaci rotoru kolem statoru (v simulaci v ANSYS je to v našem případě přesně naopak, kvůli dvojitému rotoru a funkci BAND), jsme nastavili na počáteční otáčky na 0 ot/min čili rotor se netočí a stojí. Magnetické točivé pole statoru se ale točí. Závislost točivého momentu na zátěžném úhlu β lze poté získat, díky známé úhlové rychlosti pole, kterou stačí vynásobit časem t . Výsledný průběh momentu M na Obr. 4.17 nám ukazuje průběh momentu v závislosti na čase a otáčení pole.



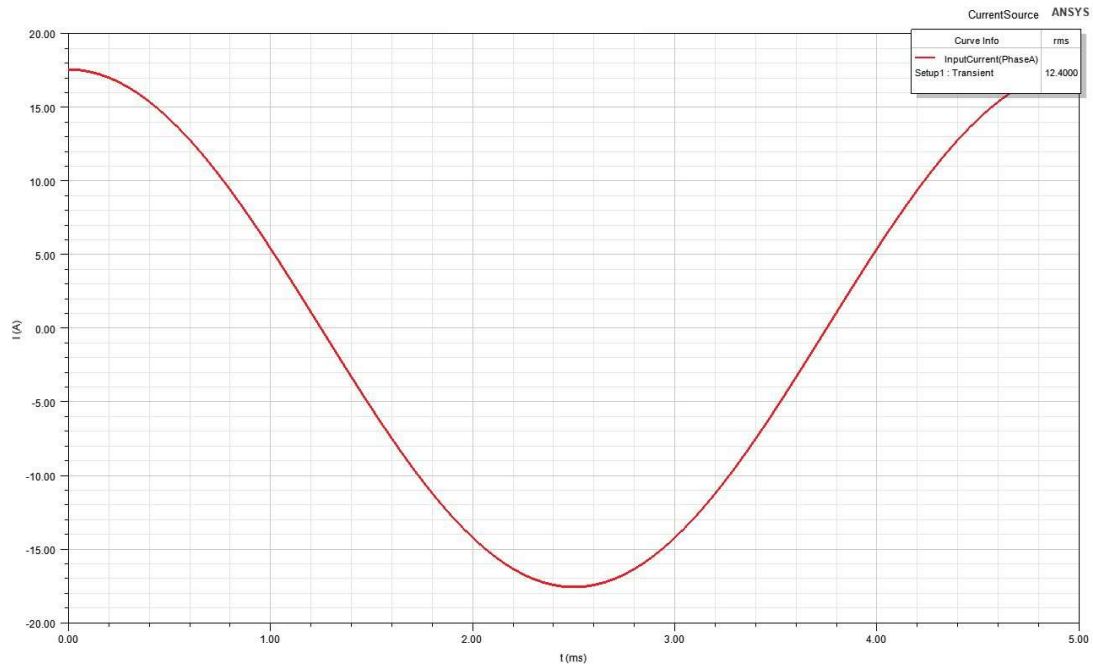
Obr. 4.17 Průběh momentu motoru

V průběhu na Obr. 4.17 je vidět, že maximální moment při zvoleném napájecím proudu je 4 Nm. Při této hodnotě momentu a jmenovitých otáčkách pak vychází mechanický výkon na hřídeli:

$$P_{max} = M \cdot \omega = 4 \cdot 314,16 \doteq 1250 \text{ W} \quad (4.47)$$

Kde M je elektromagnetický točivý moment a ω je úhlová rychlost.

Časový průběh proudu jedné fáze při tomto momentu, je možno vidět na Obr. 4.18.



Obr. 4.18 Průběh proudu jedné fáze

4.7.2 Napěťový zdroj

Stanovení předpisu rovnice pro napětí ve fázi, pro model s napěťovým zdrojem:

$$U_m \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \varphi) \quad (4.48)$$

Kde f je frekvence otáčení rotoru, t je čas a φ je fázový posuv. Tuto rovnici vkládáme do modelu pro popis průběhu napětí.

Do modelu s napěťovým zdrojem můžeme nyní vložit vypočítanou hodnotu odporu vinutí. Nastavujeme úhel φ , který reprezentuje posun momentové charakteristiky po ose y . Jeho velikost je ovlivněna velikostí odporu R_a .

Vzhledem k tomu, že neznáme velikost synchronní reaktance, se kterou by bylo možno určit velikost úhlu ρ a tím pak zátěžný úhel β , bylo nutné nejprve nalézt při jaké hodnotě úhlu φ je točivý moment nulový, protože je jasné, že β je pak také rovno nule (tj. $\beta = 0$; $M = 0$). Z toho důvodu byl úhel β stanoven jako odchylka od této hodnoty φ při nulovém točivém momentu M .

Bylo tedy zjištěno, že nulový úhel β , získáme při hodnotě úhlu φ :

$$\varphi_{\beta=0} = 85^\circ \quad (4.49)$$

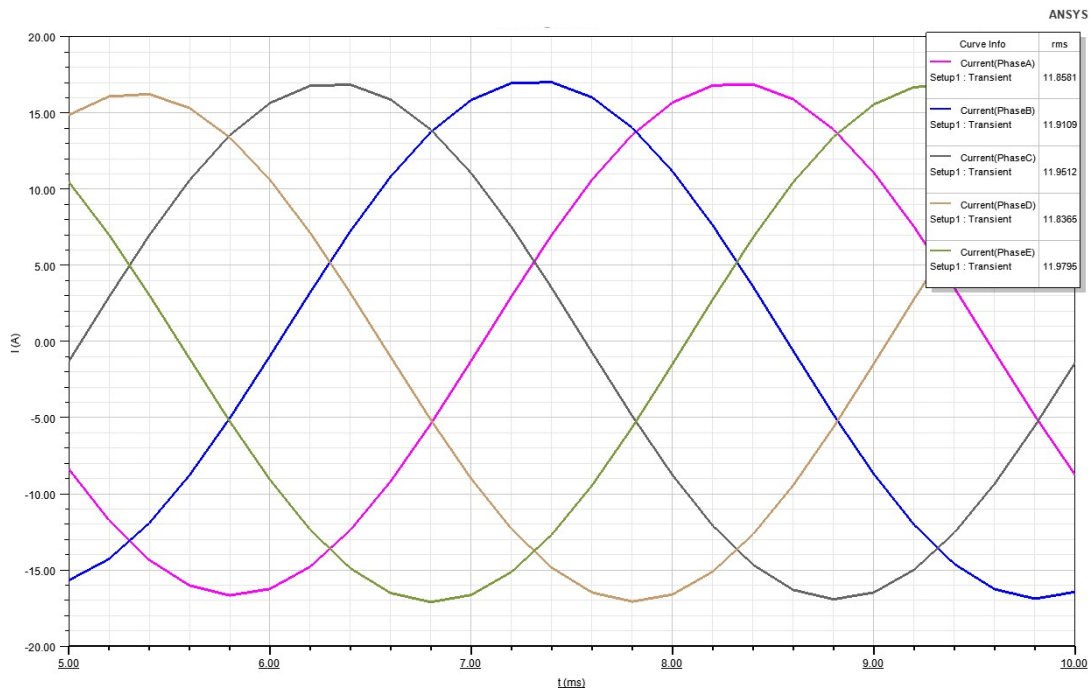
Tento posun momentové charakteristika o přibližně 5° je dán výraznou hodnotou odporu vinutí motoru.

Hledaná efektivní hodnota průběhu proudu I na Obr. 4.19 byla poté nalezena při úhlu φ :

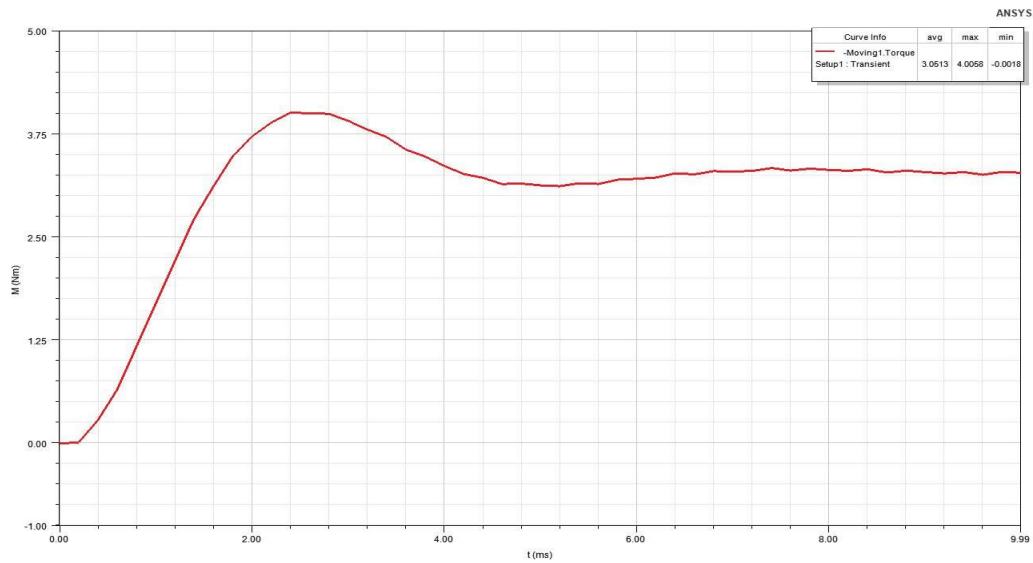
$$\varphi = 115^\circ \quad (4.50)$$

A zátěžný úhel β je při úhlu φ z (4.50) tedy:

$$\beta = 25^\circ \quad (4.51)$$

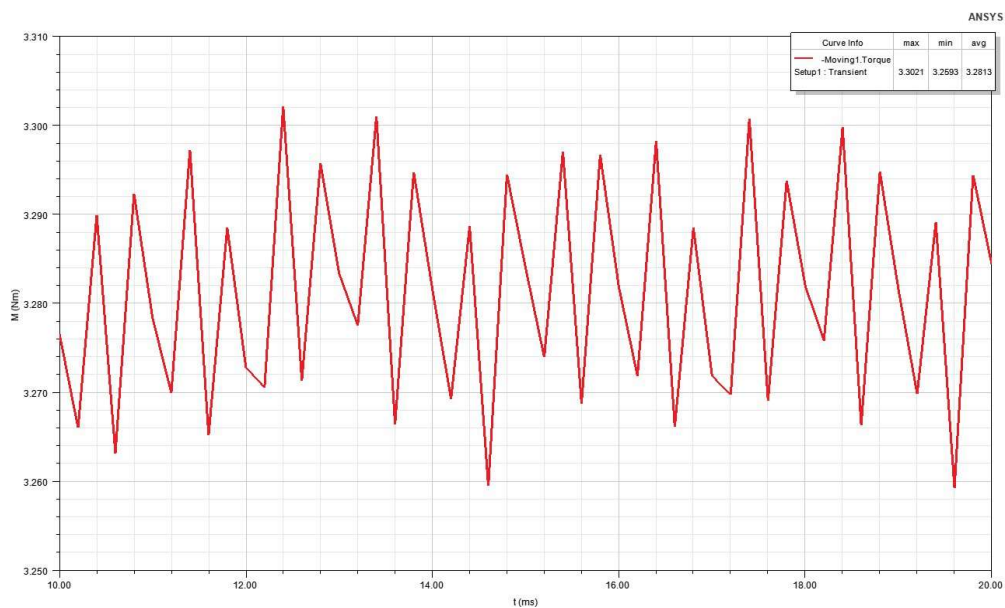


Obr. 4.19 Průběh proudu ve vinutí všech pěti fází

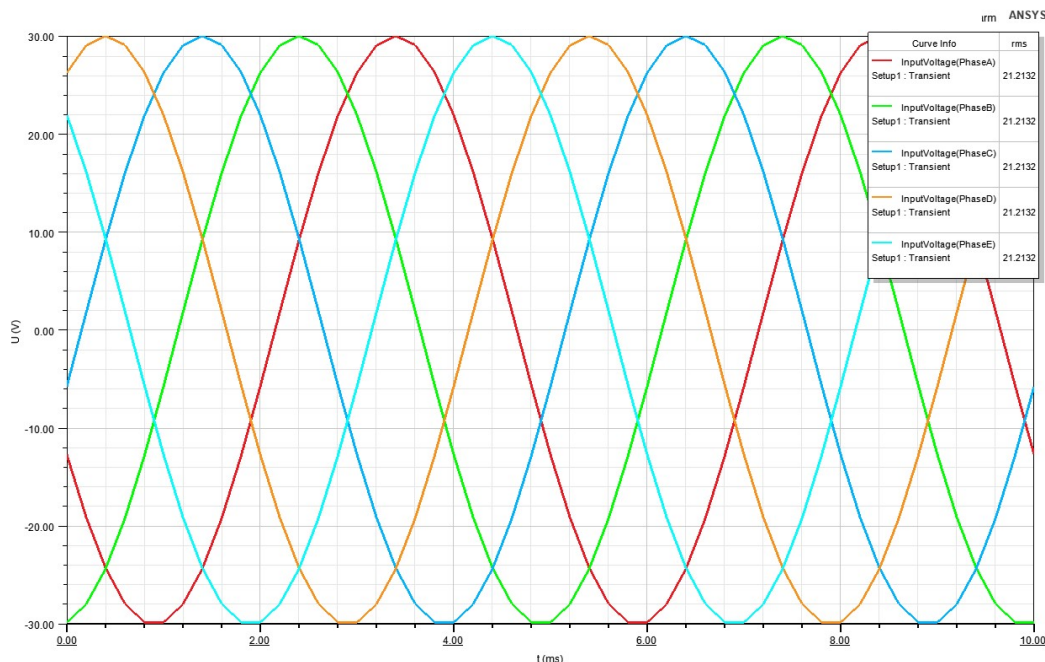


Obr. 4.20 Průběh momentu motoru s přechodným jevem

Na Obr. 4.21 je možné vidět průběh momentu v ustáleném stavu, kde je hodnota momentu přesnější oproti průběhu na Obr. 4.20, kde do průměrné hodnoty momentu vstupuje přechodný děj. Z průběhu na Obr. 4.21 je tedy možné určit, že hodnota točivého momentu motoru je zhruba 3,28 Nm. Pulzace momentu, jak je na průběhu vidět, je dána vlivem zubů, respektive drážek statoru.



Obr. 4.21 Průběh momentu v ustáleném stavu



Obr. 4.22 Průběh napájecího napětí všech pěti fází

Nyní je možno ze známého průřezu vodiče a při zvoleném (nasimulovaném) proudu určit proudovou hustotu J :

$$J = \frac{I}{a \cdot S_V} = \frac{12,4}{1 \cdot 0,636} = 19,5 \text{ A/mm}^2 \quad (4.52)$$

Kde a je počet paralelních vodičů, I je efektivní hodnota proudu a S_V je průřez jednoho vodiče.

Hodnota proudové hustoty vypočítaná ve vzorci (4.52) je nicméně v porovnání s naším původním požadavkem 3 A/mm^2 moc velká. Tato velká proudová hustota je nepřívětivá obzvlášť u tohoto motoru, kvůli použitému materiálu statoru. Tato proudová hustota by vinutí oteplila na takovou hodnotu, že by se materiál statoru vlivem své vysoké okolní teploty roztekl, což by vedlo ke zničení motoru.

S vedoucím práce bylo tedy dohodnuto, že se v modelu provede několik úprav v rámci zlepšení tepelných vlastností.

4.8 Zlepšení tepelných vlastností motoru

Kvůli zmenšení proudové hustoty, a tedy oteplení vinutí, bylo nutné, po dohodě s vedoucím práce, snížit výkon motoru. Taktéž bylo dohodnuto, že se zvýší počet paralelních vodičů v drážce z původních 1 na 2:

$$a = 2 \quad (4.53)$$

Ze zmíněného počtu paralelních vodičů v drážce a původně požadované hodnoty proudové hustoty je možné vypočítat maximální proud:

$$I_{nmax} = J_p \cdot a \cdot S_V = 3 \cdot 2 \cdot 0,636 = 3,8 \text{ A} \quad (4.54)$$

Tato hodnota již odpovídá našim původním požadavkům na proudovou hustotu.

4.8.1 Činitel plnění drážky

Počet vodičů jedné fáze v drážce nyní zdvojnásobil a je tedy nutné zkontrolovat, zda se tento počet vodičů do drážky fyzicky vejde. Stanovíme nejdříve počet vodičů v drážce

$$V_d = N_s = 60 \quad (4.55)$$

$$S_{vin} = V_d \cdot a \cdot S_V = 60 \cdot 2 \cdot 0,636 = 76,32 \text{ mm}^2 \quad (4.56)$$

Kde a je počet paralelních vinutí a S_V je průřez jednoho vodiče.

Nyní můžeme určit hodnotu činitele plnění drážky:

$$k_T = \frac{S_{vin}}{S_d} = \frac{76,32}{128,86} = 0,6 \quad (4.57)$$

Tato hodnota odpovídá předpokladům při počátečním návrhu, že činitel plnění drážky by neměl být vyšší než 0,7.

4.8.2 Jmenovitý zátěžný úhel a moment motoru

Tuto hodnotu proudu se nyní budeme snažit nastavit, respektive získat z průběhu proudu jednotlivých fází tím, že budeme měnit hodnotu zátěžného úhlu β respektive fázový posun φ .

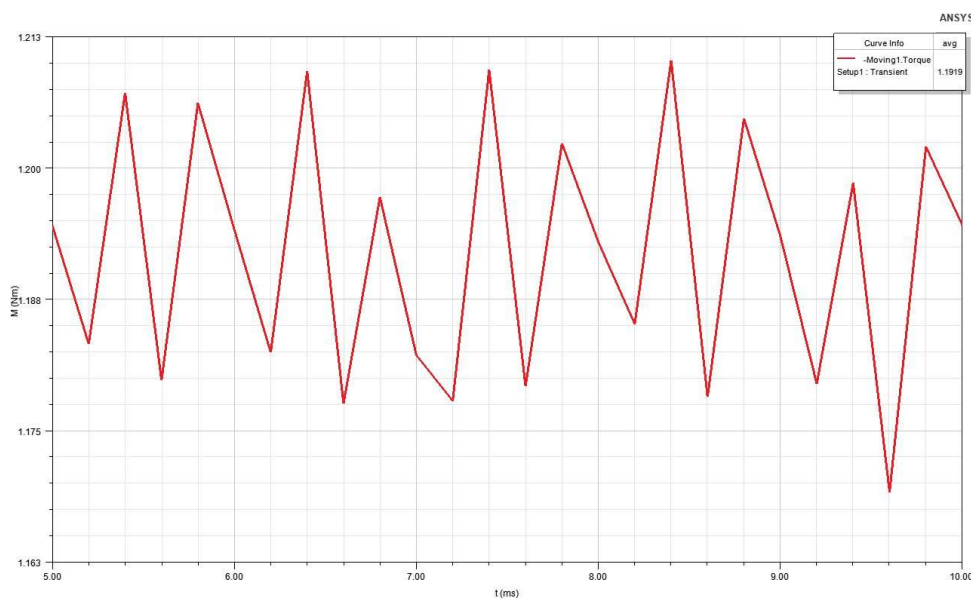
Po několika zkušebních simulacích a snižování velikosti úhlu φ v simulaci jsme dospěli k výsledku, že nejbližše vypočítanému proudu z (4.54) je úhel:

$$\varphi = 92,5^\circ \quad (4.58)$$

A zátěžný úhel je tedy:

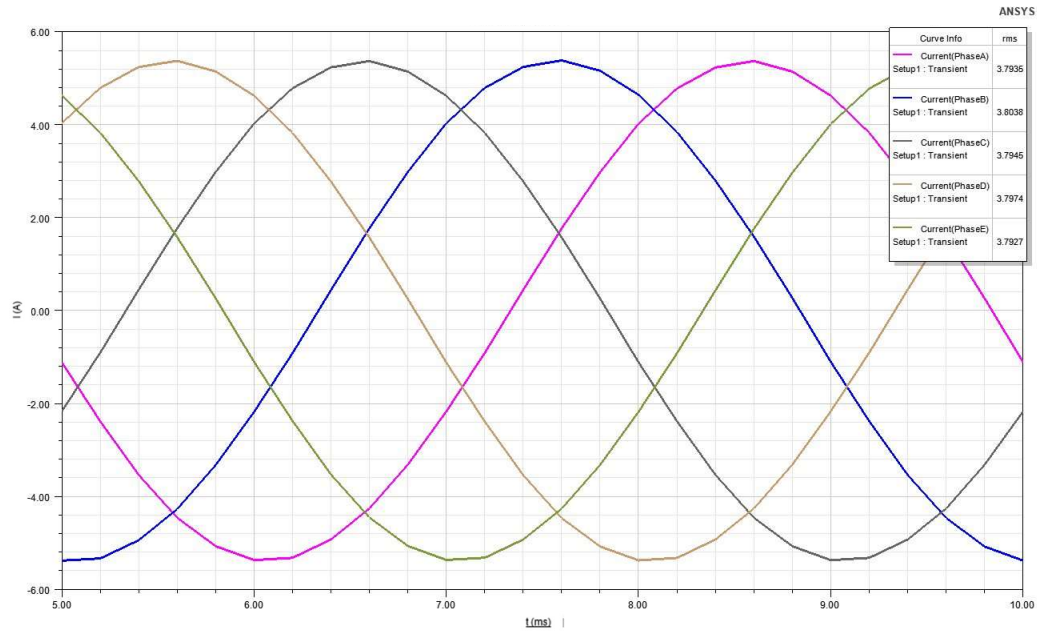
$$\beta = 7,5^\circ \quad (4.59)$$

Z toho plyne, že díky takto malému zátěžnému úhlu je velká možnost přetížení, protože tento bod v charakteristice je velmi stabilní.

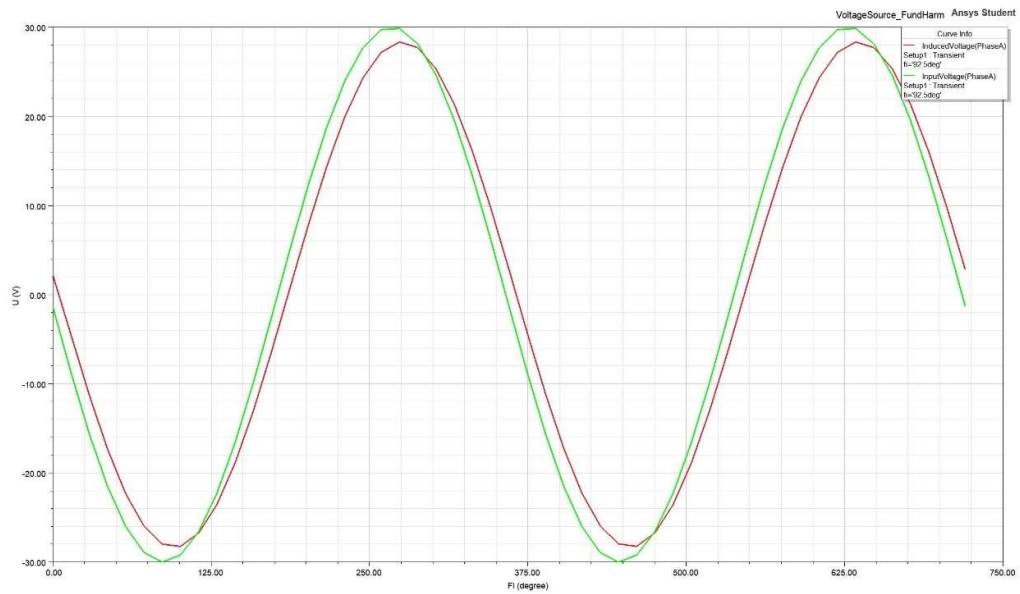


Obr. 4.23 Průběh momentu v ustáleném stavu

Z průběhu na Obr. 4.23 je zřejmé, že točivý moment při zvoleném zátěžném úhlu β a nastaveném proudu I je přibližně $M = 1,19$ Nm.



Obr. 4.24 Průběh proudu ve vinutí všech pěti fází



Obr. 4.25 Fázový posun mezi napájecím a indukovaným napětí jedné fáze

Na Obr. 4.25 můžeme vidět fázový posun φ mezi napájecím a indukovaným napětím, jehož průběh jsme získali modifikací osy x. Museli jsme za ní dosadit rovnici pro úhel v rozhraní ANSYS:

$$x = Time \cdot p \cdot \omega = Time \cdot p \cdot \omega_s \cdot \frac{180}{\pi} = Time \cdot p \cdot n \cdot 6 \quad (4.60)$$

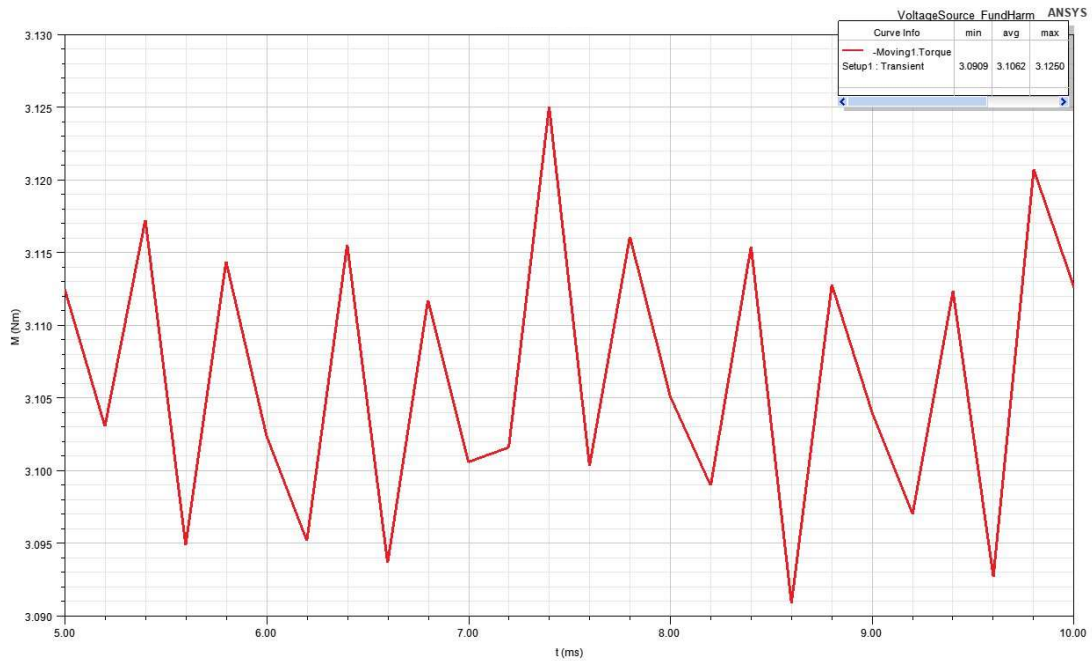
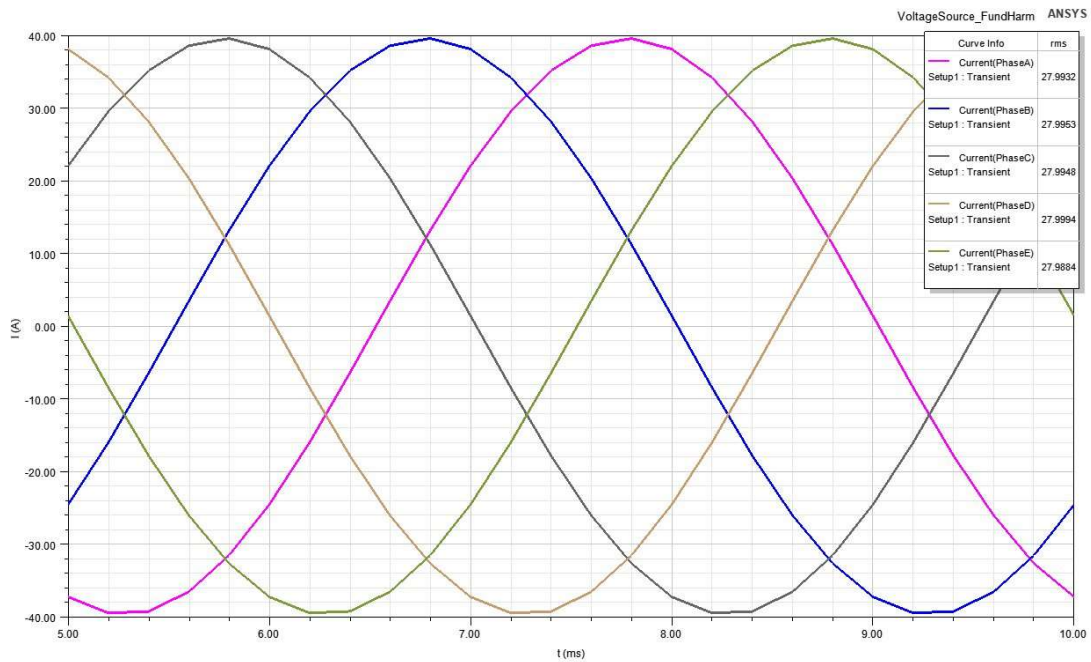
Kde *Time* reprezentuje čas (simulace) s určitým krokem, *p* je počet pólových dvojic motoru, ω_s je mechanická úhlová rychlost a *n* jsou otáčky rotoru.

Z jmenovité hodnoty momentu můžeme při zanedbání ztrát v rotoru stanovit i jmenovitý mechanický výkon na hřídeli:

$$P_{Mn} \doteq M \cdot \omega \doteq 1,19 \cdot 314,16 \doteq 373,85 \text{ W} \quad (4.61)$$

4.8.3 Stanovení maximálního momentu motoru

V této části se budeme snažit najít maximální točivý moment stroje v závislosti na zátěžném úhlu β a proudu *I*. V programu ANSYS jsme v nastavení modelu, konkrétně v části *optometrics* nastavili parametrickou úlohu pro výpočet momentu s proměnným úhlem φ . Nastavili jsme vykreslení od 85° do 170° s krokem $2,5^\circ$. Získali jsme tedy 35 hodnot, respektive možných průběhů momentu a proudů odebíraných při tomto momentu. Z těchto hodnot jsme odhadli, mezi kterými dvěma hodnotami momentu, respektive nastaveného úhlu φ , se bude nacházet náš hledaný M_{max} . Tento moment se podle prvního měření nacházel v úhlu φ mezi 117° a 123° . Druhé měření bylo provedeno tedy v tomto rozsahu s krokem $0,5^\circ$. Zjistili jsme, že maximální moment je při úhlu $\varphi = 119^\circ$, to odpovídá zátěžnému úhlu $\beta = 34^\circ$. Tento moment a odebíraný proud, je zobrazen na Obr. 4.26 a Obr. 4.27.

Obr. 4.26 Průběh M_{max} v ustáleném stavuObr. 4.27 Odebíraný proud fázemi při M_{max}

Z Obr. 4.26 a Obr. 4.27 je vidět, že střední hodnota M_{max} je přibližně 3,1 Nm při odebíraném proudu I s přibližnou efektivní hodnotou 28 A.

Z maximálního momentu motoru, můžeme nyní stanovit i maximální mechanický výkon na hřídeli:

$$P_{max2} \doteq M_{max} \cdot \omega \doteq 3,1 \cdot 314,16 \doteq 973,89 \text{ W} \quad (4.62)$$

4.9 Použitý materiál

4.9.1 3D tisk

Filament použitý při tisku jak statoru, tak rotoru motoru by měl mít určité požadované vlastnosti, respektive s danými vlastnostmi při návrhu počítat. Teplota tání neboli z angl. melting point filamentu by neměla být vyšší a ani by neměla být blízká provozní teplotě vinutí. Například filament od Švédské firmy Wematter, Aurora PA11.

Property	Value	Unit
Density of finished parts	1,05	g/cm ³
Density for powder	0,65	g/cm ³
Melting point	200	°C
Tensile Strength	51	Mpa
Elongation at break	51	%
Tensile modulus	1700	MPa
Flexural modulus	1200	MPa
Hardness	80	Shore D

Obr. 4.28 Fyzikální vlastnosti materiálu Aurora PA11 – převzato [16]

V tabulce na Obr. 4.28 je vidět, že výsledná hustota vytištěného materiálu je zhruba 1,05 g/cm³. Pevnost v tahu je 51 MPa, což je vlastnost, které je důležitá v oblasti rotoru, protože odstředivé síly vlivem poměrně těžkých PM by mohly rotor roztrhnout. Ve statorové části se nachází vinutí, které vlivem průchodu elektrického proudu vykazuje určité oteplení. Melting point, tedy teplota tání u tohoto materiálu je 200 °C. To znamená, že maximální provozní teplota vinutí by měla být okolo 60 °C s možností krátkodobé přetížitelnosti.

4.9.2 Permanentní magnety

Pro zjednodušení, byl pro 8-pólový motor zvolen jednotný rozměr permanentních magnetů. To znamená, že neohledě na umístění, tj. vnitřní nebo vnější rotor, budou mít magnety stejné rozměry. Vzhledem k maximálním rozměrům vnějšího rotoru, byly předem odhadnuty rozměry PM, které se poté vyhledaly v nabídkách konkrétních výrobců. Byla zvolena řada magnetů N42, s označením KV40-10-10-N. Jejich označení je doslovným geometrickým popisem. Jde o kvádrový magnet, s délkou 40 mm, výškou a šířkou 10 mm a použitý materiál je neodym-železo-bór.



Obr. 4.29 Geometrie použitého permanentního magnetu – převzato [17]

Parametry zvolených permanentních magnetů:

- Hmotnost jednoho magnetu $m = 30 \text{ g}$
- Uváděná magnetická síla $F_m = 15 \text{ kg}$
- Maximální pracovní teplota je $T_{prac} = 80 \text{ °C}$

Síla magnetu je vlastně odtrhová síla od ocelové desky. Uvádí se, že odtrhová síla je v přepočtu cca $10 \text{ N} = 1 \text{ kg}$. Z toho plyne že síla jednoho permanentního magnetu je:

$$F_m = 150 \text{ N} \quad (4.63)$$

Celkový počet použitých PM v motoru je 40. Ve vnějším rotoru je jich 32, každý pól, respektive ostatní magnety Halbachovy soustavy jsou ve dvojicích kvůli zlepšení geometrických rozměrů a výsledného magnetického pole. Ve vnitřním rotoru není soustava Halbachova pole. Je to kvůli celkově menšímu prostoru, kde je možné magnety osadit a také kvůli ušetření hmotnosti. Je zde tedy osazeno 8 magnetů, každý na jeden pól. Hmotnost všech PM je celkem:

$$m_{PM} = (\text{počet magnetů}) \cdot m = 40 \cdot 30 \doteq 1200 \text{ g} \quad (4.64)$$

4.9.3 Hmotnost

Obsah plochy magnetického obvodu motoru čili jeho 2D náčrtu je:

$$S_{MO} = S_{rot1} + S_{rot} + S_{stat} = 997,2 + 11311 + 3616,14 = 0,0159 \text{ m}^2 \quad (4.65)$$

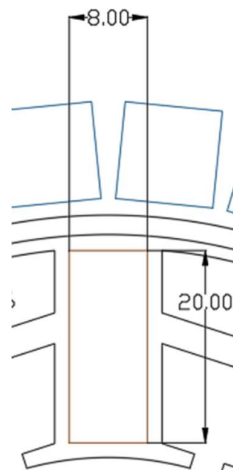
Po vynásobení vypočtené plochy magnetického obvodu délkou stroje získáme objem magnetického obvodu motoru:

$$V_{MO} = S_{MO} \cdot l = 0,0159 \cdot 0,04 = 6,36 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \quad (4.66)$$

Při známé hustotě filamentu 3D tisku materiálu Aurora PA11 $1,05 \text{ g/cm}^3$, tedy v základních jednotkách 1050 kg/m^3 , můžeme přibližně určit hmotnost tištěné části motoru:

$$m_{MO} = V_{MO} \cdot \rho_{PA11} = 6,36 \cdot 10^{-4} \cdot 1050 \doteq 0,668 \text{ kg} \quad (4.67)$$

Rozměr magnetických plechů, vložených do zubů statoru je zobrazen na Obr. 4.3.



Obr. 4.30 Výstřižek detailu drážky

Z Obr. 4.30 vidíme, že rozměry plechů byly stanoveny na hodnoty:

$$a_T = 8 \text{ mm} \quad (4.68)$$

$$b_T = 20 \text{ mm} \quad (4.69)$$

Kde a je šířka a b je výška plechů. Plocha je tedy rovna vynásobením těchto hodnot:

$$S_T = a \cdot b = 8 \cdot 20 = 160 \text{ mm}^2 \quad (4.70)$$

Se známou délkou statorového paketu, můžeme stanovit celkový objem použitých magnetických plechů:

$$V_T = Q \cdot l \cdot S_T = 10 \cdot 0,04 \cdot 16 \cdot 10^{-5} = 6,4 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \quad (4.71)$$

Jak bylo uvedeno v kapitole 4.4.1, magnetickým plechům byl přidělen použitý materiál, elektrotechnická ocel DW540-50. Tento materiál, má podle použité knihovny v programu ANSYS hustotu:

$$\rho_{\text{DW540-50}} = 7750 \text{ kg/m}^3 \quad (4.72)$$

S vypočítaným objemem a známou hustotou elektrotechnické oceli, lze vypočítat celkovou hmotnost použitých magnetických plechů:

$$m_T = \rho_{\text{DW540-50}} \cdot V_T = 7750 \cdot 6,4 \cdot 10^{-5} = 0,496 \text{ kg} \quad (4.73)$$

Pro výpočet hmotnosti vinutí, je třeba určit celkové rozměry vinutí. Při známé délce vinutí, počtu vodičů a průřezu vodiče lze vypočítat objem vinutí:

$$V_{Cu} = m \cdot S_V \cdot a \cdot N_S \cdot l_Z = 5 \cdot 6,36 \cdot 10^{-7} \cdot 2 \cdot 60 \cdot 0,216 = 8,24 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \quad (4.74)$$

Kde m je počet fází, S_V je průřez jednoho vodiče, a je počet paralelních vodičů, N_S je počet závitů v sérii a l_Z je délka jednoho závitu.

Hustota mědi byla určena z tabulek a její hodnota je:

$$\rho_{Cu} = 8960 \text{ kg/m}^3 \quad (4.75)$$

Celková hmotnost vinutí statoru lze vypočítat takto:

$$m_{Cu} = \rho_{Cu} \cdot V_{Cu} = 8960 \cdot 8,24 \cdot 10^{-5} = 0,738 \text{ kg} \quad (4.76)$$

Celková přibližná hmotnost motoru je tedy:

$$m_{celk} \doteq m_{MO} + m_{PM} + m_T + m_{Cu} = 0,668 + 1,2 + 0,496 + 0,738 \doteq 3,1 \text{ kg} \quad (4.77)$$

Zhodnocení a závěr

Cílem této bakalářské práce bylo navrhnout bezkartáčový stejnosměrný motor s dvojitým rotorem osazený permanentními magnety, přičemž vnější rotor bude využívat tzv. Halbachovo pole. Jedním z požadavků při návrhu bylo, aby byl motor vytisknut pomocí 3D tisku.

Ve 4. kapitole byl proveden náskres motoru v programu AutoCAD a byly stanoveny základní parametry jako je vnější průměr $D_{2R} = 180$ mm, počet fází $m = 5$, pólů $2p = 8$ a počet drážek statoru $Q = 10$. Jak již bylo v práci zmíněno, magnetický obvod je z plastu. Plast má špatné magnetické vlastnosti, a tak byly do zubů magnetického obvodu statoru umístěny drážky, do kterých byly uloženy magnetické plechy pro zlepšení uzavírání magnetického toku motoru, a tedy zlepšení magnetických vlastností.

Ověření modelu bylo provedeno v programu ANSYS, kde byl každému prvku modelu motoru přiřazena vlastnost, buď z hlediska materiálu, vazeb, magnetické indukce magnetů, či elektrického odporu vodičů. Byly zvoleny jmenovité otáčky $n = 3000$ ot/min, počet závitů jedné cívky byl zvolen $N_C = 1$ a byla spuštěna simulace motoru v ANSYS ve stavu naprázdno pro stanovení indukovaného napětí. Napětí zdroje bylo zvoleno, respektive bylo známo, a tedy i fázové napětí. Ze známého činitele elektromotorické síly bylo vypočteno maximální možné indukované napětí a následně byl zvolen počet závitů statoru. Pro kontrolu byla se zvoleným počtem závitů spuštěna simulace znovu a také byla vykreslena pomocí MKP magnetická indukce a magnetický indukční tok ve stroji.

Byl zvolen jmenovitý vnitřní výkon $P_i = 1000$ W, z čehož byla spočtena i efektivní hodnota fázového proudu $I = 12,4$ A. S těmito parametry byl vytvořen model s proudovým zdrojem, kde byl nastaven právě zvolený proud. Pomocí tohoto modelu bylo možné vykreslit maximální točivý moment motoru právě při hodnotě zmíněného proudu. V ANSYS byl vytvořen i model s napětiovým zdrojem, kde bylo možné za pomoci úpravy motionsetup čili úpravy pohybu, nastavit nulové otáčky a tzv. rotovat pouze točivé kruhové magnetické pole statoru a zjistit maximální možný točivý moment motoru.

Nicméně s touto hodnotou proudu a konfigurací vinutí vycházela velmi vysoká proudová hustota $19,5$ A/mm² a tím velké oteplení vinutí, což je vzhledem k použitému materiálu statoru nežádoucí. Taktéž v této fázi návrhu proběhl tisk části prototypu statoru motoru a bylo zkoušeno, zda se závity do drážek opravdu vejdou. To se potvrdilo, a dokonce se

zjistilo, že do drážek se vejdou dva paralelní vodiče. To je vidět na Obr. 1 v příloze práce. Takže následovala kapitola se zlepšením tepelných vlastností motoru, společně s upraveným počtem vodičů v drážce.

V kapitole se zlepšením tepelných vlastností motoru je uvedeno že bylo nutné snížit proudovou hustotu ve vinutí statoru, takže společně se zvětšením počtu paralelních vodičů se musel snížit výkon stroje, resp. elektrický proud ve vinutí, aby bylo dosaženo požadované proudové hustoty 3 A/mm^2 . S touto hodnotou nám vychází efektivní hodnota proudu rovna $3,8 \text{ A}$. V ANSYS byla poté provedena simulace a byl zjištěn zátěžný úhel β při tomto proudu při zatížení, který je roven $7,5^\circ$. Při tomto úhlu i proudu jsme nasimulovali i průběh jmenovitého momentu, který je roven $1,19 \text{ Nm}$. Díky těmto hodnotám můžeme říct, že motor je velmi stabilní a má velkou rezervu na přetížitelnost. Maximální moment byl naměřen, při zátěžném úhlu $\beta = 119^\circ$ a efektivní hodnotě proudu 28 A a má hodnotu $3,1 \text{ Nm}$.

Jmenovitý výkon motoru byl vypočítán z jmenovitých otáček a momentu a je $373,85 \text{ W}$. Maximální výkon motoru byl obdobně vypočítán na hodnotu $973,89 \text{ W}$. Tato hodnota je nicméně teoretická, respektive možná, ale po pravděpodobně krátkou dobu. Je to dáno efektivní hodnotou proudu vodičem, jeho oteplením a použitým materiálem statoru.

V závěrečné výpočetní části byl popsán použitý materiál a také je zde uveden orientační výpočet hmotnosti motoru. Hmotnost hřídele nebyla nicméně ve výpočtu zahrnuta, protože není ještě známa její celková délka.

Dalším krokem návrhu by bylo vyrobení prototypu navrženého motoru a zjistit, zda nasimulované a vypočítané parametry jsou reálné, nebo se alespoň částečně realitě blíží a případně by byly provedeny úpravy parametrů motoru.

Literatura

- [1] ŠIMON, Josef. BLDC aneb DC motor s nulovými náklady na údržbu. Elektro [online]. 2011, (13/14) [cit. 10.12.2021]. ISSN 1210-0889. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/44507.pdf>.
- [2] HANSELMAN, Duane C. Brushless permanent magnet motor design. 2nd ed. Cranston: The Writers' Collective, ©2003. xvi, 392 s. ISBN 1-932133-63-1.
- [3] HENDERSHOT, J. R. a MILLER, T. J. E. Design of brushless permanent-magnet motors. Hillsboro: Magna Physics Publishing, ©1994. 1 sv. (různé stránkování). Monographs in electrical and electronic engineering; 37. ISBN 978-1-881855-03-3.
- [4] P. Lindh, I. Petrov, J. Pyrhönen and T. Santa-Nokki, "Comparison of Halbach Rotors with Other PM Structures," 2019 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2019, pp. 721-726, doi: 10.1109/IEMDC.2019.8785353.
- [5] BENEŠOVÁ, Zdeňka a MAYER, Daniel. Základní příklady z teorie elektromagnetického pole. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2008. 167 s. ISBN 978-80-7043-737-7.
- [6] MRAVEC, Rudolf. Elektrické stroje a přístroje I. Praha: SNTL, 1979.
- [7] PETROV, G.N. Elektrické stroje 2: Asynchronní stroje-synchronní stroje. Praha: Academia, 1982, 728 s.
- [8] BARTOŠ, Václav, Teorie elektrických strojů , Plzeň: Západočeská univerzita 2006, 230 s. ISBN 80-7043-50
- [9] Ing. Josef Šimon, Atas elektromotory, Náchod, a. s.. BLDC aneb DC motor s nulovými náklady na údržbu. Elektro [web]. 2006 [cit. 16.3.2022]. Čís. 06. Dostupné online. ISSN 1210-0889.
- [10] MAYER, D.: Magnetická levitace a její využití. Elektro, 2003, č. 1.
- [11] HALBACH, K.: Application of permanent magnets in accelerators and electron storage rings. Journal of Applied Physics, 1985, Vol. 57, s. 3605–3608.

- [12] MALLINSON, J. C. One-sided fluxes – A magnetic curiosity? [online] IEEE Transactions on Magnetics Volume 9, Issue 4, 1973 [cit. 1.3.2022] ISSN: 0018- 9464 Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=1067714>
- [13] POST, Richard F.; RYUTOV, Dmitri D. The Inductrack: a simpler approach to magnetic levitation. Applied Superconductivity, IEEE Transactions on, [online] 2000, 10.1: 901-904. [cit. 30.4.2022] ISSN: 1051-8223 DOI: 10.1109/77.828377 Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=828377>
- [14] FELDHAUS, Josef; ARTHUR, John; HASTINGS, J. B. X-ray free-electron lasers. Journal of Physics B: Atomic, molecular and optical physics, [online] 2005, 38.9: S799. [cit. 25.4.2022] Dostupné z: <http://www.spire.slaac.stanford.edu/pubs/slaacpubs/12250/slaac-pub-12342.pdf>
- [15] KOPYLOV, Igor Petrovič aj. Stavba elektrických strojů. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988. 685 s.
- [16] Aurora PA11 material. [online]. [Cit. 27.4.2022]. Dostupné z: <https://wematter3d.com/materials/>
- [17] Neodymové magnety. [online]. [Cit. 28.4.2022]. Dostupné z: https://www.unimagnet.cz/kv-40-10-10-n_z488/
- [18] Electromagnetic Transducer, James Winey, Figure 29; United States Patent 3,674,946, filed Dec. 23, 1970
- [19] Halbach array. [online]. [Cit. 23.5.2022]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Halbach_array
- [20] Itasaka et al., "Investigation of magnetic performance on the cylinder-shaped PM type linear Halbach array assembled by 45 degree rotating arrangement," 2019 12th International Symposium on Linear Drives for Industry Applications (LDIA), 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/LDIA.2019.8771000.

Přílohy

Obr. 1 Část statoru vyrobená 3D tiskem

