



Fakulta elektrotechnická

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

# BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

NÁVRH MIKROMOTORU S AXIÁLNÍM TOKEM

Autor práce: Radek Calda

Vedoucí práce: Ing. David Pánek, Ph.D.

Plzeň 2020

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2019/2020

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Radek CALDA**  
Osobní číslo: **E16B0024K**  
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**  
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**  
Téma práce: **Návrh mikromotoru s axiálním tokem**  
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

### Zásady pro vypracování

1. Proveďte podrobnou rešerši na téma mikromotory s axiálním tokem.
2. Vytvořte model zadaného mikromotoru v programu Comsol Multiphysics.
3. Navrhněte na základě modelu konstrukci motoru.
4. Vytvořte výrobní dokumentaci, navrhněte technologický postup výroby a experiment pro ověření výsledků.



Rozsah bakalářské práce: **30 – 40 stran**  
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. Jacek F. Gieras, Rong-Jie Wang, Maarten J. Kamper; Axial flux permanent magnet brushless machines, Springer, 2008.
2. S. J. Salon: Finite element analysis of electrical machines, Springer, 1995.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. David Pánek, Ph.D.**  
Katedra teoretické elektrotechniky

Oponent bakalářské práce: **Prof. Ing. Pavel Karban, Ph.D.**  
Katedra teoretické elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **4. října 2019**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **11. června 2020**



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

**Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.**  
vedoucí katedry

# Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá návrhem elektrického mikromotoru s axiálním magnetickým tokem s permanentními magnety. První kapitola práce se věnuje studiu jednotlivých využívaných typů strojů s axiálním tokem. Ve druhé kapitole je popsána volba topologie a návrh modelu v programu COMSOL Multiphysics 5.2. Třetí kapitola shrnuje výsledky provedených analýz se zaměřením na magnetické pole ve stroji a dosažený točivý moment. Ve čtvrté kapitole je popsán návrh způsobů výroby jednotlivých částí stroje a možná optimalizace stroje pro vyšší efektivitu výroby. V závěru se práce zaměřuje na zhodnocení výsledků analýzy modelu a doporučení pro další možné optimalizace a simulace.

## Klíčová slova

mikromotor, magnetický tok, axiální magnetický tok, toroidní jádro, permanentní magnety

# Abstract

The bachelor thesis deals with the design of an electric micromotor with axial magnetic flux with permanent magnets. The first chapter describes individual types of machines with axial flux. The second chapter deals with choosing of topology and designing of model in program COMSOL Multiphysics 5.2. The third chapter summarizes the results of the analysis focusing on the magnetic field and axial torque. The fourth chapter deals with the proposals of production methods of individual parts of machine and describes the possibilities of optimization of the machine for higher production efficiency. In the end, the thesis is focused on evaluation of the results of the model analysis and recommendations for next possible optimizations and simulations.

## Keywords

micromotor, magnetic flux, axial magnetic flux, torus core, permanent magnets

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce, s použitím odborné literatury a dalších pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....  
podpis

V Plzni dne 18. června 2020

Radek Calda

## Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Davidu Pánkovi, Ph.D. za možnost vypracovat tuto práci pod jeho vedením a za pomoc, rady a ochotu po celou dobu zpracovávání.

# Obsah

<b>Úvod</b>	<b>12</b>
<b>1 Stroje s axiálním tokem</b>	<b>13</b>
1.1 Historie a současnost . . . . .	13
1.2 Topologie motorů s permanentními magnety . . . . .	14
1.3 Vinutí statoru . . . . .	15
1.3.1 Křížené vinutí . . . . .	15
1.3.2 Nekřížené vinutí . . . . .	16
1.3.3 Vinutí bez statorového jádra . . . . .	17
1.3.4 Bezdrážkové statorové jádro . . . . .	17
1.3.5 Vinutí s vyniklými póly . . . . .	18
1.3.6 Modulární stator . . . . .	18
1.3.7 Bubnové vinutí (Toroidní) . . . . .	18
1.4 Srovnání strojů s axiálním a radiálním tokem . . . . .	20
<b>2 Návrh stroje</b>	<b>22</b>
2.1 Volba topologie . . . . .	22
2.1.1 Stator . . . . .	22
2.1.2 Rotor . . . . .	23
2.2 Rozměry . . . . .	24
2.2.1 Statorové jádro . . . . .	24
2.2.2 Cívka . . . . .	25
2.2.3 Rotor . . . . .	26
2.2.4 Přehled rozměrů . . . . .	27
2.3 Model v COMSOL Multiphysics 5.2 . . . . .	27
2.3.1 Geometrie modelu . . . . .	27
2.3.2 Materiály . . . . .	28
2.3.3 Fyzika . . . . .	28
2.3.4 Mřížka . . . . .	33
2.3.5 Přehled parametrů . . . . .	34
<b>3 Analýzy modelu</b>	<b>35</b>
3.1 Ověření magnetického toku . . . . .	35
3.2 Točivý moment . . . . .	36
3.3 Sycení magnetického obvodu . . . . .	37



<b>4</b>	<b>Návrh postupu výroby</b>	<b>39</b>
4.1	Statorové jádro . . . . .	39
4.2	Kryt motoru . . . . .	40
4.3	Rotorový disk a hřídel . . . . .	40
4.4	Cívka . . . . .	41
4.5	Permanentní magnety . . . . .	41
4.6	Materiály . . . . .	41
4.7	Efektivita výroby . . . . .	42
<b>5</b>	<b>Závěr</b>	<b>44</b>
	<b>Seznam použité literatury</b>	<b>46</b>
	<b>Seznam obrázků</b>	<b>48</b>

## Seznam použitých symbolů a zkratek

<b>PM</b>		permanentní magnet
$c$	[-]	počet cívek
$s$	[-]	počet drážek
$p$	[-]	počet pól-párů
$m$	[-]	počet fází
<b>U, V, W</b>		fáze napájecího napětí
$R_{0S}$	[mm]	vnější poloměr statorového jádra
$R_{inS}$	[mm]	vnitřní poloměr statorového jádra
$k_d$	[-]	poměr průměrů starového jádra
$\alpha$	[°]	úhel vzájemného natočení dvou sousedních cívek
$d_c$	[mm]	šířka cívkové drážky
$d_s$	[mm]	tloušťka statorového jádra
$d_{inc}$	[mm]	tloušťka cívkového jádra
$d_{PM}$	[mm]	tloušťka PM
$d_r$	[mm]	celková tloušťka rotoru
$d_W$	[mm]	průměr vodiče
$b$	[mm]	tloušťka cívky
$l$	[mm]	střední délka cívky
$R_{0PM}$	[mm]	poloměr vnějšího okraje PM
$R_{inPM}$	[mm]	poloměr vnitřního okraje PM
$\beta$	[°]	úhel výseče PM
$g$	[mm]	šířka vzduchové mezery
$B_r$	[T]	remanentní magnetická indukce
$B_{rZ}$	[T]	remanentní indukce PM vs měru osy z
$\mu_r$	[-]	relativní permeabilita PM
$\mu_0$	[N · A <sup>-2</sup> ]	permeabilita vakua
$\gamma_r$	[S · m <sup>-1</sup> ]	konduktivita
$S_W$	[mm <sup>2</sup> ]	průřez cívkového vodiče
$S_C$	[mm <sup>2</sup> ]	průřez cívky
$N$	[-]	počet závitů cívky
$H$	[A · m <sup>-1</sup> ]	intenzita magnetického pole
$f$	[Hz]	frekvence
$U_m$	[V]	amplituda střídavého napětí
$U_{ef}$	[V]	efektivní hodnota střídavého napětí
$\phi$	[°]	úhel posunu mezi jednotlivými fázemi
$\phi_U$	[°]	úhel posunu fáze U
$\phi_V$	[°]	úhel posunu fáze V
$\phi_W$	[°]	úhel posunu fáze W

---

$R$	[ $\Omega$ ]	úhel posunu mezi jednotlivými fázemi
$R_C$	[ $\Omega$ ]	odpor jedné cívky
$I$	[A]	elektrický proud
$J$	[A · m <sup>-2</sup> ]	plošná hustota elektrického proudu
$t$	[s]	čas
$A$	[Wb · m <sup>-1</sup> ]	vektor magnetického potenciálu
$E$	[N · C <sup>-1</sup> ]	intenzita elektrického pole
$\vec{n}$	[-]	normálový vektor
$F$	[N]	síla
$M$	[N · m]	moment

# Úvod

Cílem této bakalářské práce je prostudovat technologii elektrických motorů s axiálním magnetickým tokem s permanentními magnety, na základě získaných znalostí navrhnout pomocí programu COMSOL Multiphysics mikromotor s využitím této technologie a připravit návrh výrobní dokumentace.

Elektrické motory s axiálním magnetickým tokem vykazují v některých aplikacích lepší vlastnosti než dnes běžněji používané motory s radiálním magnetickým tokem. Vzhledem k celkovým tendencím dnešní doby, zmenšovat technologie pro lepší kompaktnost, je velmi zajímavá právě aplikace motoru s axiálním magnetickým tokem v oblasti malých rozměrů.

Technologie tohoto typu by mohla najít na trhu využití v mnoha oblastech, například drony, vesmírné družice a další, kde je nutné velmi pečlivě řešit poměr výkon / hmotnost / objem.

První kapitola se zabývá obecným popisem strojů s axiálním magnetickým tokem, jejich historickým vývojem a rozlišením jednotlivých využívaných topologií. V závěru kapitoly jsou uvedeny rozdíly mezi stroji s magnetickým tokem axiálním a radiálním.

Druhá kapitola je věnována samotnému návrhu stroje a tvorbě modelu v programu COMSOL Multiphysics. Nejdříve popisuje výběr topologie, geometrie a volbu rozměrů a stroje. Nakonec se zaměřuje na použité materiály, funkce a matematickofyzikální aparát využitý programem k výpočtům.

Ve třetí kapitole jsou uvedeny výsledky výpočtů z programu COMSOL Multiphysics, se zaměřením na magnetické pole a točivý moment stroje.

Čtvrtá kapitola se zabývá návrhem postupů výroby jednotlivých částí stroje a předkládá možnost optimalizace pro dosažení efektivnější výroby.

V závěru práce je zhodnocení výsledků analýzy s vysvětlením jejich důsledků. V závislosti na těchto důsledcích jsou navrženy další možné optimalizace a simulace pro možné zlepšení vlastností navrhovaného stroje.

# 1 Stroje s axiálním tokem

Elektrické stroje s axiálním tokem (označovány také jako *diskové*) jsou alternativou k elektrickým strojům s radiálním tokem. Základním rozdílem mezi těmito dvěma typy strojů je směr magnetického toku uzavírajícího se mezi magnetickými obvody statoru a rotoru. U radiálních strojů prostupuje tok vzduchovou mezerou mezi státorem a rotorem ve směru kolmém k ose otáčení (hřídeli). Zatímco u axiálních strojů prostupuje tok vzduchovou mezerou mezi státorem a rotorem ve směru rovnoběžném s osou.

## 1.1 Historie a současnost

První prototypy obou typů strojů vznikly přibližně ve stejnou dobu, v první polovině 19. století. Stroje s radiálním tokem následně zaznamenaly silný vývoj a staly se zcela převažujícím typem, zatímco stroje s axiálním tokem nebyly téměř využívány. Dle [1] byly hlavní důvody pro nevyužívání diskových strojů následující:

- příliš velká magnetická přitažlivá síla mezi státorem a rotorem
- potíže při výrobě, například při řezání štěrbin v laminovaných jádrech statoru
- vysoké náklady spojené s výrobou jader statoru
- potíže s montáží stroje a udržení rovnoměrné vzduchové mezery

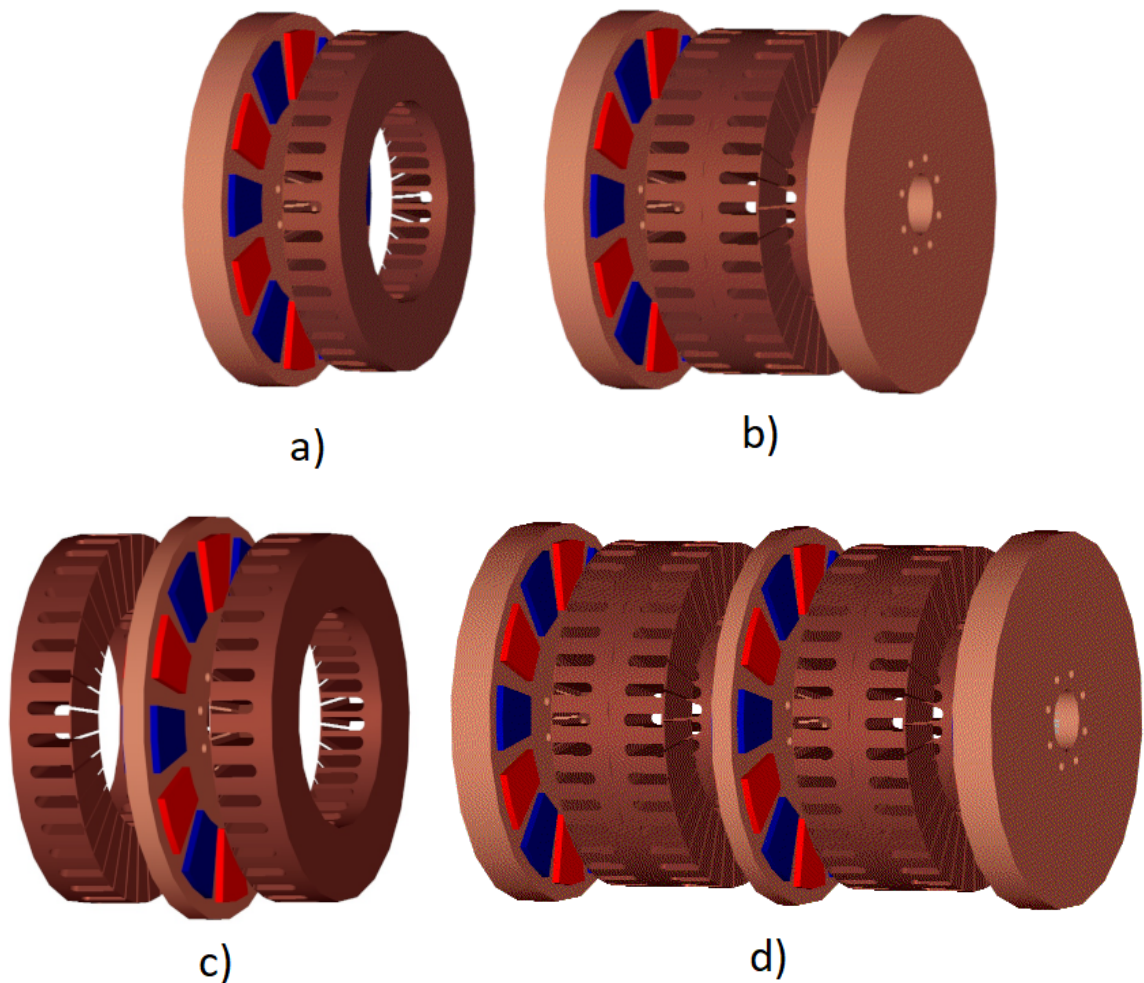
Tyto problémy byly způsobeny především nedostatečně kvalitními materiály a tehdejšími možnostmi výroby stroje po mechanické stránce. Díky těmto technickým nedostatkům nebylo možné v tehdejší době vyrobit stroj s axiálním tokem, který by vykazoval zvláštní výhody oproti strojům radiálním.

Stroje s axiálním tokem využívající permanentní magnety dále narážely na problém špatné kvality materiálů využívaných na výrobu permanentních magnetů. Pomocí těchto materiálů nebylo možné dosáhnout dostatečné magnetické indukce a tudíž dostatečného momentu.

Až koncem 20. století, díky novým konstrukčním metodám a novým materiálům přestaly výše jmenované problémy představovat zásadní problém při konstrukci strojů s axiálním tokem. Pokrok ve výrobě mechanických součástí stroje umožnil zvládat vyšší přitažlivé síly, a nové výrobní metody umožňují levnější výrobu laminovaných jader statoru bez větších technických problémů. Také materiály pro permanentní magnety zaznamaly určitý vývoj a v 80. letech 20. století postupně zmizel problém s dosažením dostatečné magnetické indukce, a to především díky magnetům na bázi vzácných zemin.

V dnešní době se již vyrábí stroje s axiálním tokem pro různé aplikace s výkonem od desítek wattů až do stovek kilowattů a až do několika tisíc otáček za minutu.

## 1.2 Topologie motorů s permanentními magnety



Obrázek 1.1: Převzato z [3]: Základní uspořádání diskových strojů: a) jednostranný, b) dvoustranný se dvěma rotory, c) dvoustranný se dvěma statory, d) vícediskový stroj

Při vypracování této kapitoly byly použity zdroje [1],[3],[12], [14] a [15]. Dle [1] lze obecně říct, že pro každý typ stroje s radiálním magnetickým tokem existuje alternativní stroj s tokem axiálním. Prakticky jsou však stroje dle [1] s axiálním tokem omezeny na následující 3 typy:

- stejnosměrné komutátorové stroje s PM,
- stejnosměrné bezkartáčové stroje a synchronní stroje s PM,
- indukční stroj,

Dále je možné stroje s axiálním tokem rozlišit podle počtu statorů a rotorů (obrázek 1.1):

- jednostranné,
- dvoustranné,
  - se dvěma rotory,

- se dvěma statory,
- vícediskové.

Dvoustranné a vícediskové stroje mají oproti jednostranným zásadní výhodu ve vyvážení elektromagnetických přitažlivých sil působících na rotor. U jednosotranného stroje není působení elektromagnetické přitažlivé síly mezi státorem a rotorem nijak kompenzováno a dochází tak k mechanickému namáhání rotoru a ložisek. Z tohoto důvodu je výroba náročnější na materiály a mechanické provedení. Symetrické uspořádání vícerotorových nebo víceštatorových strojů má výhodu vzájemného vyvážení těchto přitažlivých sil, což snižuje namáhání ložisek a mechanických součástí a tím zjednodušuje výrobu.

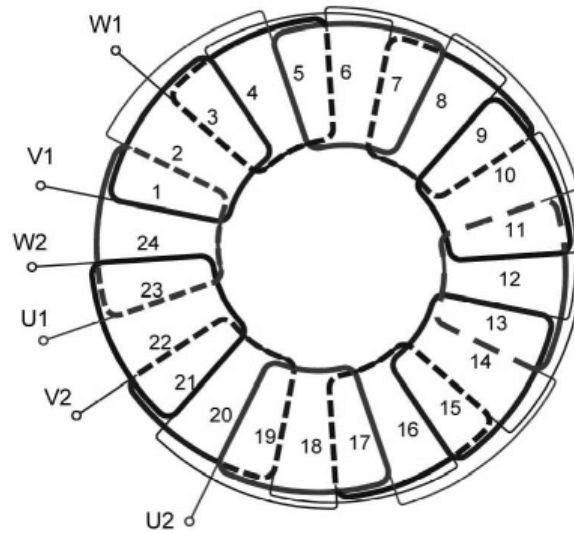
## 1.3 Vinutí statoru

Stroje s axiálním magnetickým tokem s rotorem s permanentními magnety se dají dále rozlišit podle způsobu vinutí statoru. Každý ze způsobů vinutí má své výhody a nevýhody oproti ostatním a každý je tedy vhodný pro určité aplikace. Základní typy vinutí diskových strojů jsou tyto:

- křížené,
  - se statorovým jádrem,
    - \* s drážkami,
    - \* bez drážek,
  - bez statorového jádra,
- nekřížené vinutí,
  - se statorovým jádrem,
    - \* s drážkami,
    - \* bez drážek,
  - bez statorového jádra,
- s vyniklými póly,
- s modulárním státorem,
- bubnové (toroidní),
  - s drážkami,
  - bez drážek.

### 1.3.1 Křížené vinutí

Křížené i nekřížené vinutí je složeno z cívek lichoběžníkového tvaru. U kříženého vinutí se cívky jednotlivých fází překrývají. Vzájemné překrytí cívek pomáhá k vyhlazení průběhu magnetického toku uvnitř vzduchové mezery v závislosti na mechanickém úhlu. Křížené vinutí může být jednovrstvé nebo dvouvrstvé.



Obrázek 1.2: Převzato z [1]: Uspořádání kříženého 3-fázového 8-pólového vinutí, 24 cívek

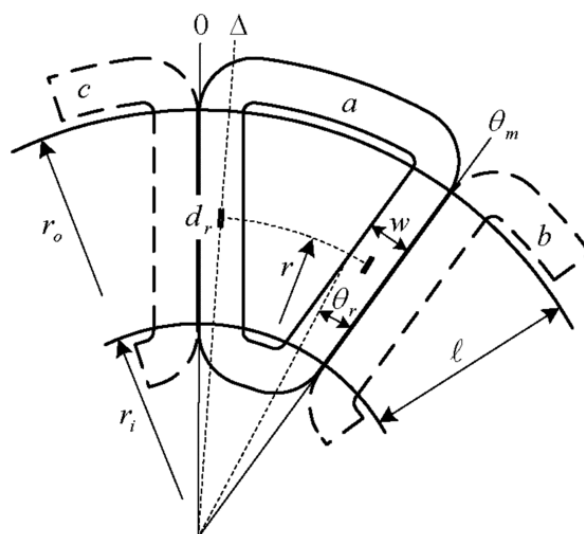
U jednovrstvého kříženého vinutí (viz. obrázek 1.2) je v každé drážce právě jeden svazek vodičů (jedna strana jedné cívky). Znamená to tedy, že počet cívek je:

$$c = \frac{s_1}{2}, \quad (1.1)$$

kde  $s_1$  značí počet drážek.

Dvouvrstvé vinutí znamená, že v každé drážce se setkávají strany dvou cívek. Počet cívek je tedy roven počtu drážek.

### 1.3.2 Nekřížené vinutí



Obrázek 1.3: Převzato z [15]: Uspořádání nekříženého vinutí

Stejně jako křížené je nekřížené vinutí složeno z lichoběžníkových cívek. Rozdílné je



jejich uložení. Cívky u nekříženého vinutí se vzájemně nepřekrývají. Leží tedy všechny ve stejné rovině vedle sebe. Nekřížené vinutí může být také jednovrstvé nebo dvouvrstvé.

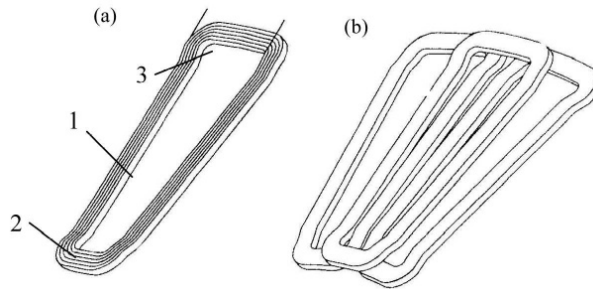
Jednovrstvé nekřížené vinutí je uloženo tak, že v každé drážce je opět jen jeden svazek. Z toho vyplývá, že cívka je navinuta na každém druhém zubu. Počet cívek tedy je opět:

$$c = \frac{s_1}{2}, \quad (1.2)$$

kde  $s_1$  značí počet drážek.

V případě dvouvrstvého nekříženého vinutí (viz. obrázek 1.3) jsou cívky uloženy tak, že se v každé drážce potkávají dva svazky (strany cívek). To znamená, že na každém zubu je namotána právě jedna cívka. Počet cívek je tedy roven počtu drážek.

### 1.3.3 Vinutí bez statorového jádra



Obrázek 1.4: Převzato z [1]: Vytvarování cívek pro křížené bezjádrové vinutí: a) vytvarovaná cívka, b) uložení cívek

Křížené i nekřížené vinutí u dvoustranných strojů se dvěma rotory je možné vyrobit bez statorového jádra z feromagnetického materiálu. Toto uspořádání umožňuje ještě více snížit délku stroje a má nulové výřivé a hysterezní ztráty. Nevýhodou zde je větší rozptylový tok, kvůli kterému je nutný větší počet závitů na statorových cívkách a silnější rotorové permanentní magnety.

Nosnou složkou statorů bez feromagnetického jádra jsou kompozitní materiály. Cívky jsou navinuty na nemagnetický nosný materiál (kostru) a následně zality.

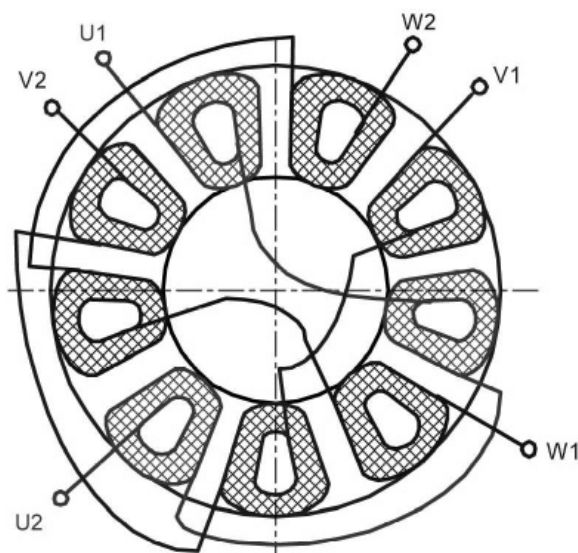
U nekříženého vinutí se cívky pokládají vedle sebe a zálevají. U kříženého vinutí se cívky vyrábějí tak, aby měly aktivní část vodiče ve stejné rovině. Lichoběžníkové cívky se tedy vyrábějí s vystupujícími vnějšími a vnitřními stranami tak, aby při seskládání ležely delší strany v jedné rovině (viz. obrázek 1.4).

### 1.3.4 Bezdrážkové statorové jádro

Statorové jádro z feromagnetického materiálu může být provedeno s drážkami nebo bez. Drážkované jádro zlepšuje vedení magnetického toku a snižuje rozptylový tok. Díky

efektivnějšímu vedení magnetického toku je možné použít jednodušší vinutí než u bezdrážkového statorového jádra. Jádro bez drážek je naopak jednodušší výrobu, ale kvůli zvýšení rozptylového toku je nutné použít silnější rotorové magnety a výkonnější vinutí (např. více závitů).

### 1.3.5 Vinutí s vyniklými póly



Obrázek 1.5: Převzato z [1]: Uspořádání vinutí v vyniklými póly, 9 cívek

Další možný způsob vinutí u axiálního stroje je vinutí s vyniklými póly. Toto vinutí má paralelu v klasických strojích s radiálním tokem (synchronní stroj s vyniklými póly). U axiálního stroje je tento princip také možný. Každá cívka má vlastní feromagnetické jádro, na kterém je navinuta, přičemž mezi jednotlivými cívkami jsou mezery (viz. obrázek 1.5). Feromagnetická jádra jsou uchycena na společný statorový kotouč.

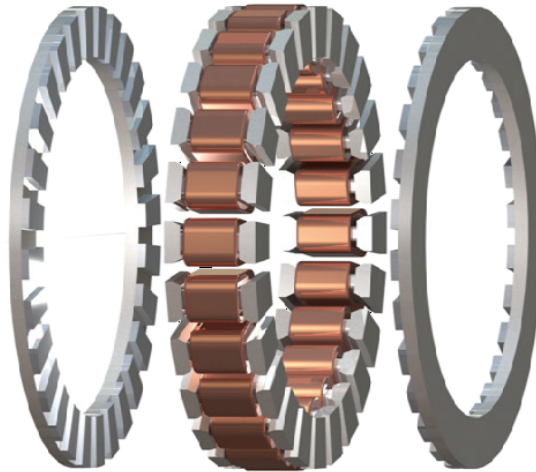
### 1.3.6 Modulární stator

V dvoustranného diskového stroje se dvěma rotory, kde je na jeden zub namotána nejvýše jedna cívka, je možné z výrobních důvodů zvolit modulární stator (obrázek 1.6). Tento způsob sestavení statoru přináší výhody především v oblasti hromadné výroby, protože umožňuje sériovou výrobu oddělených částí a následné sestavení.

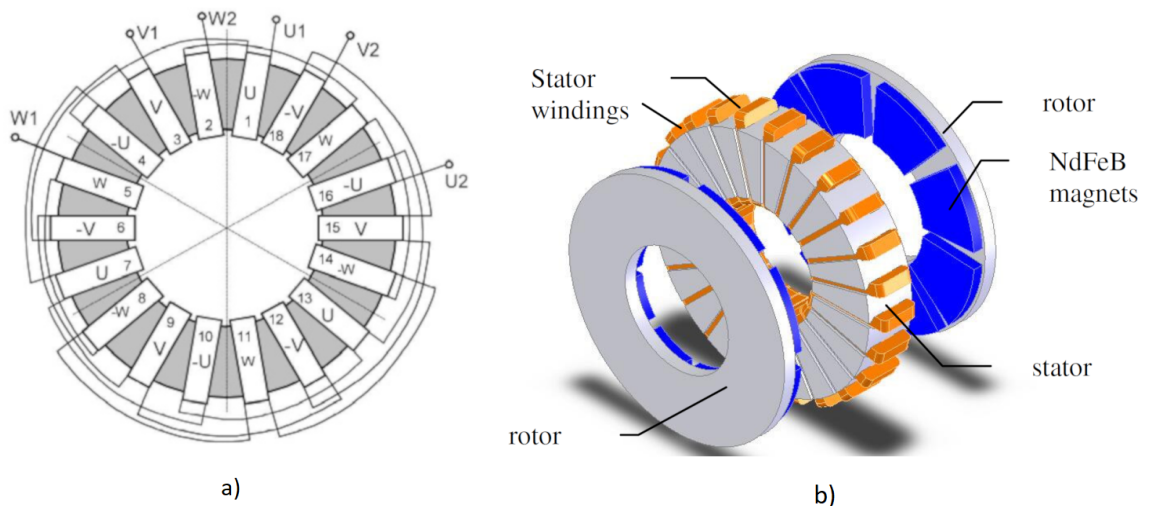
Dle [12] je zde nevýhodou potřeba zvýšené kvality sestavení a vycentrování statoru na konci výroby.

### 1.3.7 Bubnové vinutí (Toroidní)

U dvoustranných diskových strojů se dvěma rotory je možné využít bubnové (také nazýváno *toroidní*) vinutí. Tento způsob vinutí přináší řadu výhod především v oblasti



Obrázek 1.6: Převzato z [10]: Vizualizace stroje s modulárním statorem, 24 cívek



Obrázek 1.7: a) Převzato z [1]: Uspořádání bubnového (toroidního) 6-pólového vinutí, 18 cívek, b) Převzato z [4]: Vizualizace bubnového vinutí, 24 cívek

výroby. Hlavními výhodami jsou jednoduché a krátké pospojení cívek, jednoduchá výroba jádra a více místa pro umístění cívek.

Cívky stejných fází jsou vždy zapojeny proti sobě tak, aby bránily cirkulaci magnetického toku v jádře statoru. To ovšem vede k omezení počtu variant počtů cívek na sudé násobky počtu fází. Pro 3-fázový stroj je tedy možné mít počty cívek 6, 12, 18, 24, ... Počet pól-párů toroidního vinutí se vypočte:

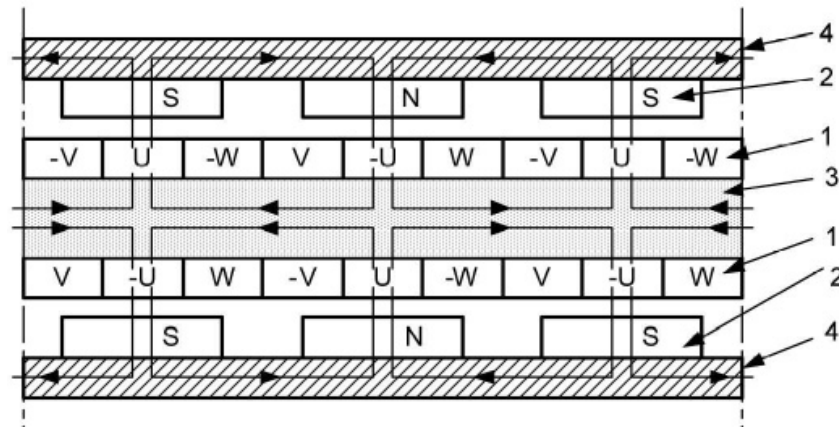
$$p = \frac{c}{2 \cdot m}, \quad (1.3)$$

kde  $c$  je počet statorových cívek a  $m$  je počet fází.

Jádro statoru pro toroidní vinutí může být, z důvodu lepšího vedení magnetického toku a snížení rozptylového toku, uděláno drážkované (obrázek 1.7-b). Tato varianta však

ztrácí výhodu v oblasti jednoduché výroby.

### Dráha magnetického toku



Obrázek 1.8: a) Převzato z [1]: Magnetický tok v toroidním jádře - rozvinuté satorové jádro (1-cívky, 2-PM, 3-satorové jádro, 4-rotorový disk)

Na obrázku 1.8 je ukázána dráha magnetického toku toroidním jádrem satoru. Magnetický tok z permanentního magnetu prochází přes vzduchovou mezeru a vstupuje do satorového jádra, kterým následně pokračuje souběžně s rovinou rotorového disku skrz jednotlivé cívky, až na úroveň dalšího permanentního magnetu. Prochází přes vzduchovou mezeru a permanentní magnet do rotorového disku, kterým se vrací do původního permanentního magnetu.

Jak je z obrázku 1.8 patrné, magnetický tok tedy tvoří více, fakticky oddělených, okruhů toku. Žádná dráha magnetického toku neprotíná oba rotorové disky. Toky z jednotlivých rotorů prochází satorovým jádrem souběžně, přičemž každý využívá přesně poloviny průřezu satorového jádra (za předpokladu stejně silných permanentních magnetů).

## 1.4 Srovnání strojů s axiálním a radiálním tokem

Dle [1] a [24] mají stroje s axiálním tokem oproti strojům s radiálním tokem několik výhod.

Diskové uspořádání strojů s axiálním tokem (dle uspořádání někdy nazýván *diskový stroj*) umožňuje výrazně **snížit délku stroje**. V aplikacích, kde je délka stroje limitující, je tedy stroj s axiálním tokem výhodou.

Dále uspořádání stroje s axiálním tokem umožňuje, díky jednoduššímu rozložení vinutí a magnetů na obvodu satoru a rotoru, dosáhnout **vyššího poměru výkonu na objem**.

Z principu páky vyplývá, že moment síly je dán působící silou násobenou délkou ramene. Stroje s axiálním magnetickým tokem díky tomuto principu dosahují **vyššího to-**

**čivého momentu** snáze, protože magnet na rotoru je umístěn dále od osy, než u stroje s radiálním tokem o stejném průměru.

Vinutí je u strojů s radiálním tokem z velké části nevyužité, protože čela cívek nejsou v magnetickém obvodu aktivní, slouží pouze k přechodu vinutí z jedné drážky do druhé, zvyšují odpor a tím i ztráty stroje a vytváří teplo. U strojů s axiálním tokem je v magnetickém obvodu **využito téměř 100% objemu vinutí**. Díky tomu stroj dosahuje nižších tepelných ztrát a vyššího poměru výkon/hmotnost.

Další výhodou mají stroje s axiálním tokem v oblasti chlazení. Zatímco u strojů s radiálním tokem je nutné přivést chladicí médium k rotoru skrz stator, čímž jsou značně omezeny možnosti kontaktu chladicího média s rotorem, u strojů s axiálním tokem je možné **chladit rotor přímo** a efektivněji odvádět teplo.

Nevýhodou strojů s axiálním tokem s permanentními magnety, dle [12], je nutnost použití frekvenčního měniče při rozběhu. Asynchronní stroj s radiálním tokem je v tomto ohledu výhodnější.

Rovněž může být nevýhodou i samotné axiální uspořádání stroje. V některých aplikacích může být z prostorových důvodů lepší využít stroje radiálního. Toto záleží více na prostorových možnostech dané aplikace.

Z ekonomického hlediska se zatím více vyplatí radiální stroj, díky svému rozšíření a lepšímu zvládnutí sériové výroby. Nejspíš je ale jen otázkou času, než se ekonomická náročnost strojů vyrovná díky aktuálním investicím do vývoje strojů s axiálním tokem.

## 2 Návrh stroje

Tato kapitola se zabývá samotným návrhem stroje dle požadovaných parametrů. Na základě těchto parametrů a zvolené topologie stroje následně bude vytvořen model v programu COMSOL Multiphysics verze 5.2. Pomocí tohoto modelu bude provedena základní analýza pro zjištění funkčních charakteristik navrhovaného stroje.

### 2.1 Volba topologie

Výběr typu stroje s axiálním magnetickým tokem s permanentními magnety, který bude modelován, byl učiněn na základě informací získaných studiem uvedené literatury při zpracovávání první kapitoly s přihlédnutím k možnostem výroby. Základními kritérii pro výběr z řady možných typů strojů byla určena jednoduchost výroby stroje a snížení rozměrů. Kritérium jednoduchosti výroby bylo takto určeno, protože primárním cílem návrhu stroje by měla být možnost jeho realizace, která je vzhledem k navrhovaným rozměrům, značně ztížena.

Z možných typů strojů byl tedy zvolen dvoustranný dvourotorový typ. Výhodou při výrobě tohoto stroje je především vlastní kompenzace přitažlivých sil mezi rotorem a statorem. V případě jednostranného stroje by vznikaly větší mechanické požadavky na ložiska stroje z důvodu většího zatížení v axiálním směru. U dvoustranného stroje dochází ke vzájemné kompenzaci těchto sil mezi rotory a tím se snižují tyto požadavky na ložiska.

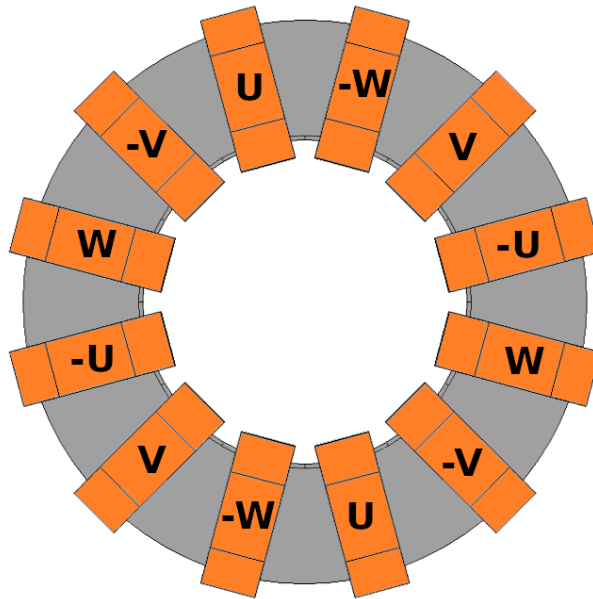
#### 2.1.1 Stator

Pro stator byl zvolen toroidní typ vinutí s drážkami. Hlavním důvodem volby tohoto typu vinutí bylo snížení axiální délky stroje (ostatní typy jádrového vinutí pro dvoustranný dvourotorový typ AFPM stroje vyžadují větší axiální délku stroje z důvodu dvoustranného vinutí statoru). Oproti bezjádrovým statorům, které by teoreticky mohly dosáhnout nižší axiální délky, má toroidní vinutí výhodu v konstrukčním uchycení cívek, které mohou být uchyceny přímo na statorové jádro. Typ statorového jádra se zuby jsem zvolil kvůli zmenšení vzduchové mezery a tím zvýšení magnetického toku respektive momentu, který daný tok tvoří.

S ohledem na zvolená vstupní kritéria byl vybrán třífázový čtyřpólový stroj ( $2p = 4$ ). Dle rovnice 1.3 se spočte počet potřebných statorových cívek:

$$c = 2 \cdot p \cdot m = 12, \quad (2.1)$$

kde  $m$  je počet fází a  $p$  počet pól-párů.



Obrázek 2.1: Vlastní model: Uspořádání toroidního 4-pólového vinutí, 12 cívek

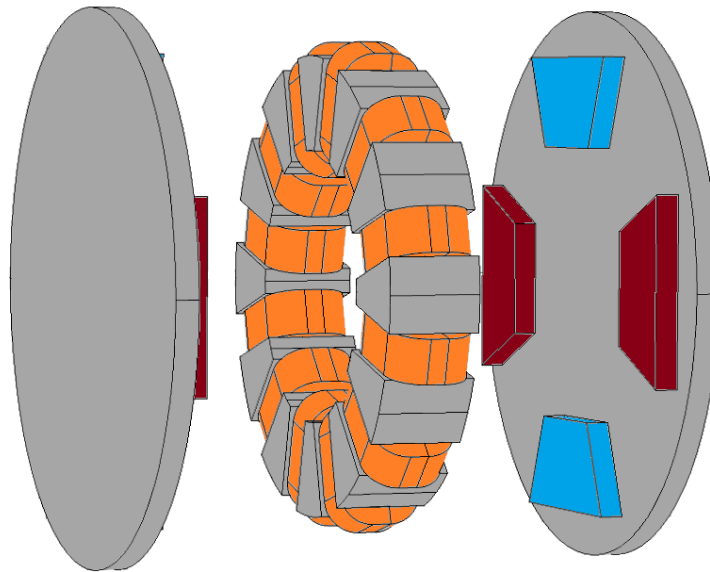
Fáze toroidního vinutí by měly být uspořádány dle obrázku 2.1. Uspořádání, kdy jsou fáze seřazeny pravidelně za sebou ve směru U, V, W a každá druhá je zapojena v opačném směru. Výsledné zapojení je tedy U, -V, W, -U, V, -W, U, ... Toto zapojení zaručuje správný magnetický tok jádrem statoru a vytvoří 4-pólový systém.

### 2.1.2 Rotor

V návaznosti na volbu 4-pólového toroidního vinutí statoru je nutné zvolit adekvátní topologii rotorů. Rotory by při této volbě statorového vinutí měly být také 4-pólové. To znamená, že jeden rotor by měl být tvořen magneticky vodivým diskem se 4 permanentními magnety umístěnými na vnitřní straně disku. Magnety by měly být umístěny po obvodu vnitřní strany disku tak, aby jejich radiální vzdálenost od hřídele odpovídala radiální vzdálenosti statorových zubů od hřídele. Vzájemný úhel natočení sousedních magnetů kolem hřídele by měl být přesně  $90^\circ$ .

Směr magnetizace permanentních magnetů by měl být ve směru osy  $z$ , tedy v axiálním směru, rovnoběžně s hřídelí. Orientace pólů by měla být volena tak, aby dva magnety vzájemně otočené o  $180^\circ$  kolem hřídele směřovaly stejným pólem do vzduchové mezery. Pro magnety vzájemně otočené o  $90^\circ$  kolem hřídele platí, že by měly do vzduchové mezery směřovat opačnými póly (viz. obrázek 2.2).

Pro vzájemnou orientaci permanentních magnetů mezi jednotlivými rotory platí, že dva protilehlé magnety (magnety ležící proti sobě přes rovinu statoru) by měly ke statoru směřovat stejným pólem. Rotory by tedy měly být symetricky uspořádané přes rovinu statoru.



Obrázek 2.2: Vlastní model: Uspořádání dvou 4-pólových rotorů se statorem (pro přehlednost zvětšená vzduchová mezera)

## 2.2 Rozměry

Pro vytvoření modelu stroje v programu COMSOL Multiphysics je nutné specifikovat fyzické rozměry jednotlivých součástí stroje. Základním parametrem, je vnější poloměr statorového jádra  $R_{0S}$ . Ostatní rozměry jsou od tohoto základního parametru odvozeny, nebo jsou zvoleny v souladu s tímto základním rozměrem.

### 2.2.1 Statorové jádro

Základní rozměr, vnější poloměr statorového jádra, je dle zadání práce  $R_{0S} = 5$  mm. Vnitřní poloměr statorového jádra  $R_{inS}$  je možné určit pomocí vzorce:

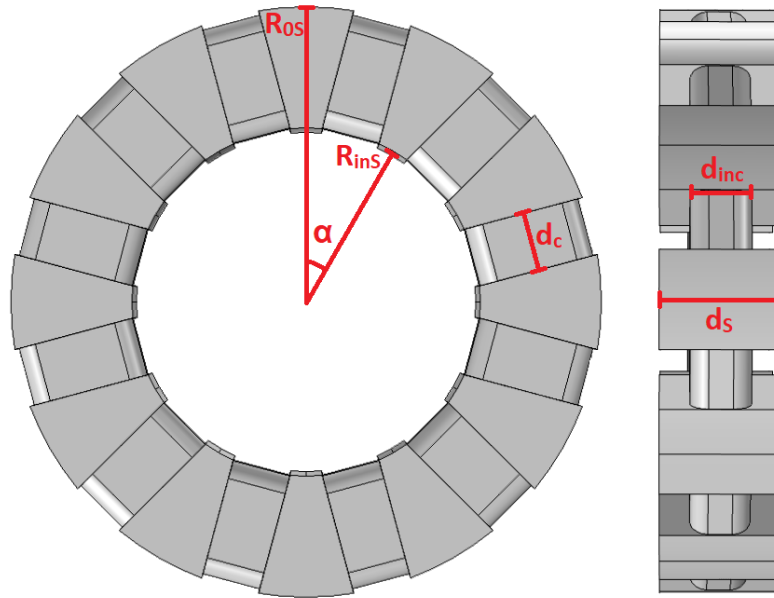
$$k_d = \frac{R_{inS}}{R_{0S}}, \quad (2.2)$$

kde  $k_d$  je poměr průměrů. Dle [3] je z hlediska točivého momentu stroje optimální poměr průměrů  $k_d = 0,58$ . Na základě této skutečnosti byl použit poměr  $k_d = 0,6$ , který je velmi blízký optimální hodnotě.

Parametr  $\alpha$ , úhel vzájemného natočení dvou sousedních cívek, je možné vypočítat z rovnice:

$$\alpha = \frac{360}{c}, \quad (2.3)$$





Obrázek 2.3: Vlastní model: Orientační nákres rozměrů statorového jádra

kde  $c$  je počet cívek statoru. Po dosazení z rovnice 2.1:

$$\alpha = \frac{360}{12} = 30^\circ. \quad (2.4)$$

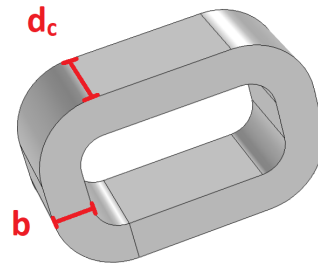
Úhel vzájemného natočení dvou sousedních zubů je shodný s  $\alpha$ .

Podle [5] je výhodnější, z hlediska magnetického toku ve vzduchové mezeře, volit tvar cívkové drážky lichoběžníkového tvaru. Z hlediska výroby je však výrazně jednodušší výroba cívky obdélníkového tvaru. Z důvodu rozměrů navrhovaného stroje, které ztěžují možnosti výroby, je v tomto případě lepší zvolit obdélníkový tvar cívkových drážek, respektive cívek. Šířku cívkové drážky, s přihlédnutím k ostatním rozměrům statorového jádra, jsem zvolil  $d_c = 1$  mm.

Tloušťku statorového jádra v místě zubu jsem zvolil  $d_s = 2$  mm. Tloušťku jádra v místě cívkové drážky, tedy tloušťku cívkového jádra, jsem zvolil  $d_{inc} = 1$  mm.

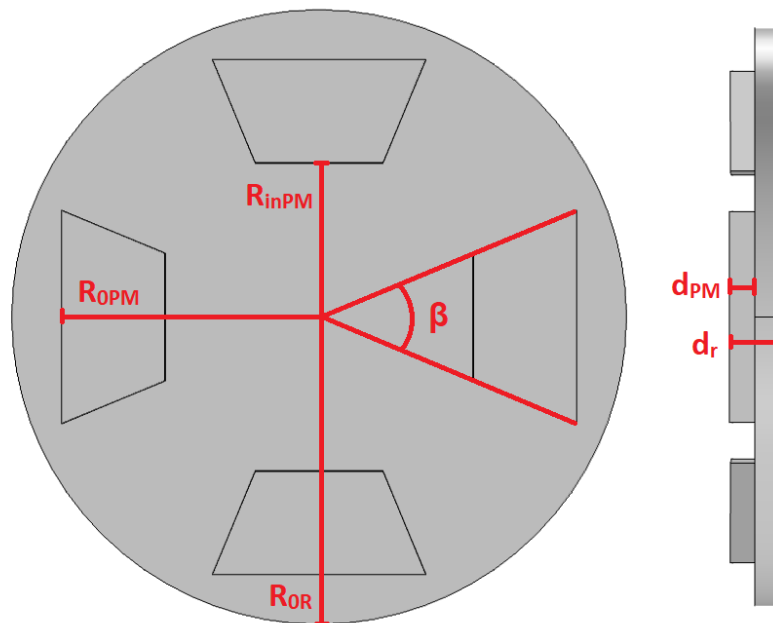
## 2.2.2 Cívka

Cívka bude v modelu reprezentována souvislým blokem zabírajícím prostor, který u reálného modelu bude vyplněn jednotlivými závitů cívky. Tento blok bude obepínat statorové jádro v místě drážky a bude vyplňovat celou šířku drážky  $d_c = 1$  mm. Z důvodu minimální šířky vzduchové mezery bude tloušťka cívky  $b$  menší než výška zubu statorového jádra. Tímto bude zajištěno, že nedojde k přímému kontaktu vodiče cívky s permanentním magnetem na rotoru. Tloušťka cívky bude dosahovat  $4/5$  výšky zubu, tedy  $b = 0,4$  mm.



Obrázek 2.4: Vlastní model: Orientační náčrtek rozměrů cívky

### 2.2.3 Rotor



Obrázek 2.5: Vlastní model: Orientační náčrtek rozměrů rotoru

Rozměry rotoru jsou závislé na rozměrech statorového jádra. Rozměry permanentních magnetů jsou voleny tak, aby docházelo k maximálnímu překrytí s zuby statorového jádra. Vzdálenost vnějšího okraje permanentního magnetu od středu rotorového disku  $R_{0PM}$  jsem zvolil tak, aby byla rovna vnějšímu poloměru statorového jádra  $R_{0S}$ . Vzdálenost vnitřního okraje permanentního magnetu od středu rotorového disku  $R_{inPM}$  jsem zvolil tak, aby byla rovna vnitřnímu poloměru statorového jádra  $R_{inS}$ . Zvolil jsem tedy  $R_{0PM} = 5 \text{ mm}$  a  $R_{inPM} = 3 \text{ mm}$ .

Úhel výseče permanentního magnetu jsem navrhl  $\beta = 50^\circ$  z důvodu, aby permanentní magnet v rovnovážné poloze překlenul celé vzduchové mezery k oběma sousedním zubům.

Tloušťku permanentního magnetu jsem s ohledem na celkové rozměry stroje navrhl

$d_{PM} = 0,5$  mm. Celkovou tloušťku rotoru, rotorového disku i s permanentním magnetem, pak  $d_r = 1$  mm.

Šířku vzduchové mezery mezi permanentním magnetem na rotoru a zubem statorového jádra jsem stanovil na  $g = 0,05$  mm, tedy o jeden řád menší než tloušťka permanentního magnetu.

## 2.2.4 Přehled rozměrů

Veličina	Značka	Hodnota
Vnější poloměr statorového jádra	$R_{0S}$	5 mm
Vnitřní poloměr statorového jádra	$R_{inS}$	3 mm
Tloušťka statorového jádra v místě zubu	$d_S$	2 mm
Tloušťka statorového jádra v místě cívky	$d_{inc}$	1 mm
Šířka cívkové drážky	$d_c$	1 mm
Tloušťka cívky	$b$	0,4 mm
Úhel vzájemného natočení sousedních zubů / cívek	$\alpha$	30°
Vnější poloměr rotoru	$R_{0R}$	6 mm
Vnější poloměr PM	$R_{0PM}$	5 mm
Vnitřní poloměr PM	$R_{inPM}$	3 mm
Tloušťka rotoru	$d_r$	1 mm
Tloušťka PM	$d_{PM}$	0,5 mm
Úhel výseče PM	$\beta$	50°
Šířka vzduchové mezery	$g$	0,05 mm

## 2.3 Model v COMSOL Multiphysics 5.2

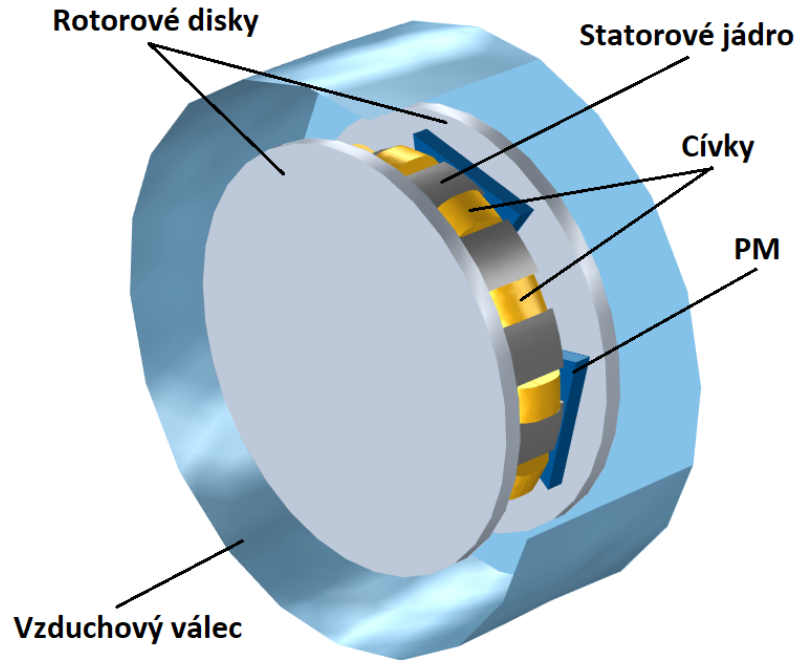
Jak už bylo napsáno výše, k tvorbě modelu použitého pro další výpočty, bylo použito programu COMSOL Multiphysics verze 5.2 (dále jen COMSOL).

### 2.3.1 Geometrie modelu

Model byl vytvořen na základě výše uvedených rozměrů. Model motoru je vytvořen bez hřídele a bez krytu motoru z důvodu, že tyto součásti nebudou vyrobeny z magneticky vodivých materiálů a nestanou se proto významnou součástí magnetického obvodu.

Model byl sestaven na základě uvedených rozměrů z jednoho statoru a dvou rotorů, každého po jedné straně statoru, oddělených od statoru definovanou vzduchovou mezerou, viz obrázek 2.2.

Celý model byl umístěn do **vzduchového prostředí** válcového tvaru, aby přibližně kopírovalo geometrii stroje, viz obrázek 2.6



Obrázek 2.6: Vlastní model: Model motoru umístěný ve vzduchovém prostředí

### 2.3.2 Materiály

Při návrhu modelu v COMSOLu jsem se snažil maximálně využít materiály definované v knihovně programu. Jejich výběr jsem učinil na základě studia obdobných příkladů použití v [16], [17] a [18]. Materiály obsažené v knihovně programu mají již definované vlastnosti potřebné pro výpočty, jako například konduktivitu, permitivitu, permeabilitu, a pro magneticky vodivé materiály hysterezní smyčku.

Statorové jádro a rotorové disky budou vytvořeny z feromagnetického materiálu. Při tvorbě modelu v COMSOLu jsem použil materiál z knihovny programu s názvem: **Soft Iron (without losses)**.

Pro bloky představující cívky jsme použil materiál z knihovny programu představující měď: **Copper**.

Vzduchové prostředí jsem definoval pomocí materiálu z knihovny programu: **Air**.

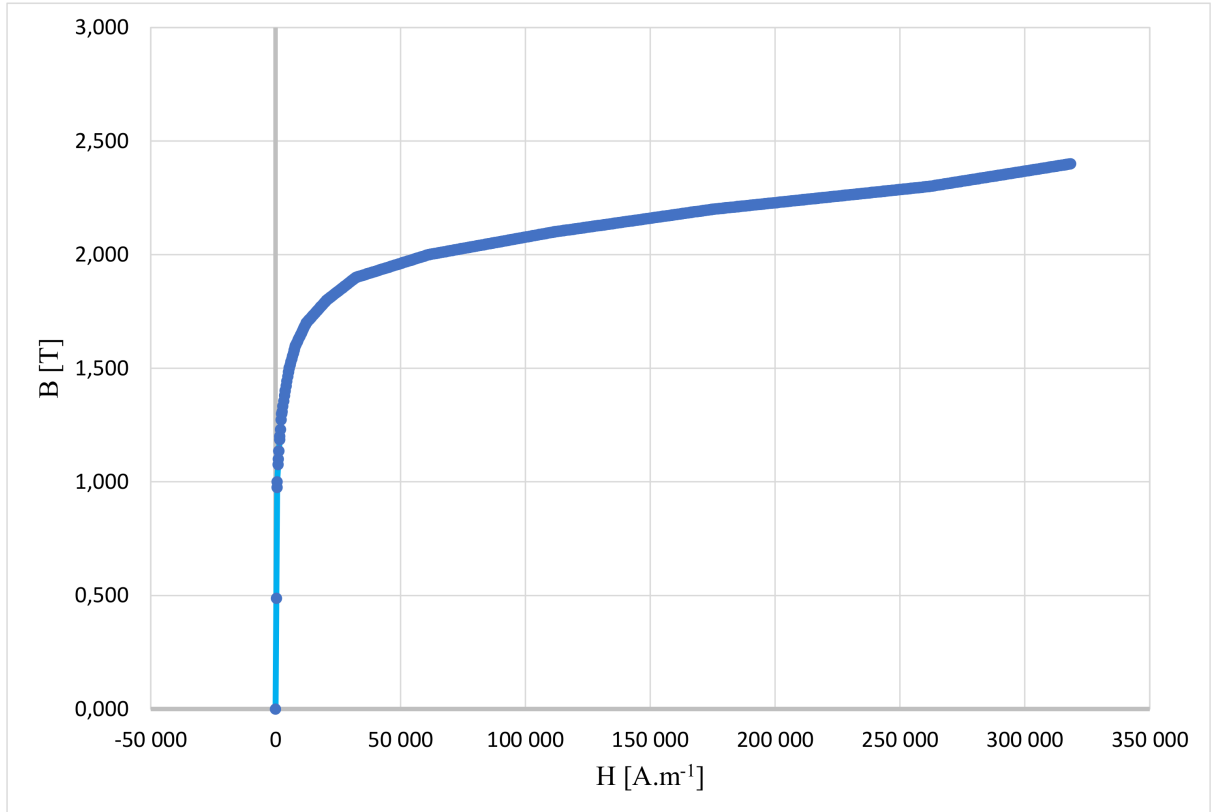
Pro permanentní magnety jsem si definoval vlastní materiál, přičemž jsem vycházel z veřejně dostupných informací o magnetických materiálech, například z [19] a [20]. Pro výpočty magnetického obvodu je zásadní parametr remanentní indukce a relativní permeability. Remanentní indukce je pro Neodymové magnety  $B_r \approx 1$  T a relativní permeabilita  $\mu_r \approx 1,05$ .

### 2.3.3 Fyzika

Pro výpočty v COMSOLu jsem použil části modulu AC/DC, přímo pak **Rotating Machinery, Magnetic** (dále jen RMM) použité pro definici magnetických obvodů, cí-

vek a permanentních magnetů, a **Electric Circuit** (dále jen EC) použité pro definici napájecího obvodu pro cívky.

## Magnetický obvod



Obrázek 2.7: COMSOL Multiphysics: Příklad BH křivky pro materiál Soft Iron (without losses)

Pro správnost výpočtů je nutné u magnetických materiálů počítat s chováním materiálu dle BH křivky. Pro tuto definici jsem využil funkci **Ampere's Law - HB Curve** z části RMM. Tato funkce do výpočtů zanáší definované vlastnosti feromagnetických materiálů. Výpočet obecně probíhá podle rovnice:

$$H = f(|B|) \cdot \frac{B}{|B|}. \quad (2.5)$$

Vlastnosti materiálu pro tento výpočet jsou vzaty z knihovny programu, viz obrázek 2.7, kde je příklad BH křivky pro použitý materiál Soft Iron (without losses).

## Cívka

Pro definici fyzikálního chování cívky jsem využil funkci **Multi-Turn Coil - Numeric** z části RMM. Tato funkce modeluje chování cívky v magnetickém obvodu.

Vstupními parametry pro tuto funkci jsou: počet závitů  $N$ , konduktivita vodiče  $\gamma$ , průřez vodiče  $S_W$  a přiložené napětí. Napětí je definováno obvodem, ve kterém je cívka

zapojena a konduktivita vodiče je brána z definovaného materiálu. Počet závitů a průřez vodiče je nutné definovat. Zjednodušeně lze říci:

$$S_C = N \cdot S_W, \quad (2.6)$$

kde  $S_C$  je průřez bloku představující cívku v modelu. Po dosažení skutečného průřezu bloku:

$$S_C = N \cdot S_W = 0,4 \text{ mm}^2. \quad (2.7)$$

Pro svůj návrh budu uvažovat vodič o průměru  $d_W = 0,1 \text{ mm}$ , pak  $S_W = 0,01 \text{ mm}^2$  a  $N = 40$ .

### Permanentní magnet

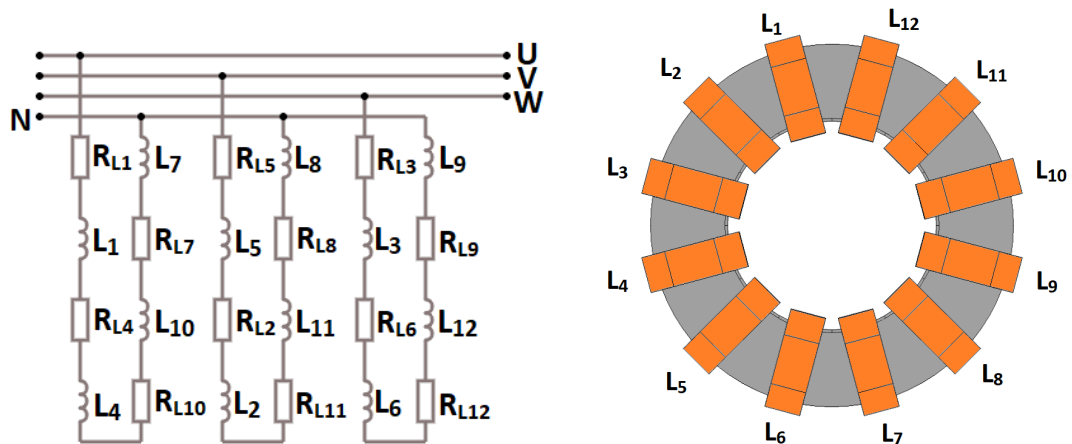
Permanentní magnet jsem definoval pomocí funkce **Ampere's Law - Remanent flux density** z části RMM, kde je možné definovat vektor remanentní magnetické indukce pro dané bloky. Vstupním parametrem pro tuto funkci jsou jednotlivé složky (x,y,z) tohoto vektoru. V případě mého modelu definuji remanentní indukci pouze ve směru osy z, která je souběžná s osou stroje. Zadávám tedy pouze parametr  $B_{rZ}$ .

Celková magnetická indukce v permanentním magnetu bude:

$$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H + B_{rZ}, \quad (2.8)$$

kde  $H$  je velikost intenzity magnetického pole způsobená vnějším prostředím - v tomto případě cívkami.

### Napájecí obvod



Obrázek 2.8: Vlastní model: Ukázka zapojení části obvodu pro jeden napěťový zdroj

Napájecí obvod, vytvořený pomocí funkcí z EC, jsou tři napěťové zdroje zapojené do hvězdy a na každý z nich jsou zapojeny 4 cívky v sériovém zapojení. Na obrázku 2.8 je

schéma zapojení obvodu. Vždy dvě po sobě jdoucí cívky jsou zapojeny v obrácené polaritě. Toto zapojení vychází z původního požadavku (viz obrázek 2.1), aby mohlo vzniknout 4-pólové magnetické pole v jádře statoru, musí být cívky zapojeny v dané posloupnosti.

Napájecí napětí je zadáno jako střídavé, harmonické, pomocí časové funkce:

$$u(t) = U_m \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \phi), \quad (2.9)$$

kde  $U_m$  je maximální hodnota napětí,  $f$  je frekvence napětí,  $\phi$  je fázový posun dané fáze a  $t$  je časová proměnná.

Hodnotu frekvence jsem určil  $f = 50$  Hz. Fázové posuny jednotlivých fází jsou dány stejně jako u standardní symetrické třífázové soustavy:  $\phi_U = 0^\circ$ ,  $\phi_V = 120^\circ$  a  $\phi_W = -120^\circ$ .

Poslední vstupní parametr, maximální hodnotu napětí, je nutné vypočítat:

$$U_m = \sqrt{2} \cdot U_{ef} = \sqrt{2} \cdot R \cdot I, \quad (2.10)$$

kde  $R$  představuje celkový odpor obvodu pro jeden napěťový zdroj a  $I$  představuje požadovaný proud v tomto obvodu. Odpor  $R$  je možné vypočítat ze sériového zapojení čtyř stejných cívek:

$$R = 4 \cdot R_C, \quad (2.11)$$

kde  $R_C$  je odpor jedné cívky, který lze vypočítat pomocí výše uvedených parametrů:

$$R_C = \frac{N \cdot l}{\gamma \cdot S_W}, \quad (2.12)$$

kde  $N$  je počet závitů jedné cívky,  $l$  je střední délka závitu,  $\gamma$  je konduktivita materiálu a  $S_W$  je průřez cívkového vodiče. Po dosazení dříve uvedených hodnot a konduktivity mědi:

$$R_C = \frac{N \cdot l}{\gamma \cdot S_W} = 0,45 \Omega. \quad (2.13)$$

Po odsazení do rovnice 2.11:

$$R = 4 \cdot R_C = 1,8 \Omega. \quad (2.14)$$

Proud obvodem pro jeden napěťový zdroj můžeme vypočítat pomocí průřezu vodiče a proudové hustoty pro daný materiál:

$$I = J \cdot S_W, \quad (2.15)$$

kde  $J$  je proudová hustota, která je pro měď  $J \approx 3$  MA/m<sup>2</sup>.

$$I = J \cdot S_W = 0,03 \text{ A} \quad (2.16)$$

Po dosazení  $R$  a  $I$  zpět do rovnice 2.10:

$$U_m = \sqrt{2} \cdot U_{ef} = \sqrt{2} \cdot R \cdot I = \sqrt{2} \cdot 0,055 = 0,08 \text{ V.} \quad (2.17)$$

### Výpočet momentu

Pro výpočet točivého momentu jsem použil funkci **Force Calculation** z RMM. Tato funkce umožňuje nastavit osu, kolem které potřebujeme měřit točivý moment (v tomto případě osa  $z$ ).

Výpočet probíhá dle rovnic:

$$\vec{F} = \int_{\partial\Omega} \vec{n}T dS \quad (2.18)$$

$$\vec{\tau} = \int_{\partial\Omega} (\vec{r} - \vec{r}_0) \times (\vec{n}T) dS \quad (2.19)$$

$$\tau_{ax} = \frac{r_{ax}^{\vec{}}}{|r_{ax}^{\vec{}}|} \cdot \vec{\tau} \quad (2.20)$$

### Přednastavená fyzika

V rámci nastavení fyzikálních vlastností byly v modelu použity ještě další definice automaticky přidané programem COMSOL v rámci volby fyzik RMM a EC.

V rámci části EC byla využita funkce **Ground Node**. Tato funkce umožňuje pro daný uzel elektrického obvodu definovat potenciál země.

V RMM byly využity funkce **Initial Values** a **Magnetic Insulation** pro definici výchozí hodnoty magnetického pole  $A = 0 \text{ Wb} \cdot \text{m}^{-1}$  a okrajové podmínky  $\vec{n} \cdot \vec{B} = 0$ , kde  $A$  je vektor magnetického potenciálu,  $\vec{n}$  normálový vektor okrajové plochy modelu (v tomto případě vzduchového obalu stroje) a  $B$  magnetická indukce. Dále je v RMM standardně využita funkce **Ampere's Law - Relative permeability**, která, pokud není pro určitou část určeno jinak, počítá vektor magnetické indukce z lineárního vztahu:

$$\vec{B} = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot \vec{H}, \quad (2.21)$$

kde  $H$  je intenzita magnetického pole.

Základní rovnice podle kterých RMM provádí výpočty:

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} \quad (2.22)$$

$$\vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A} \quad (2.23)$$

$$\vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (2.24)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.25)$$



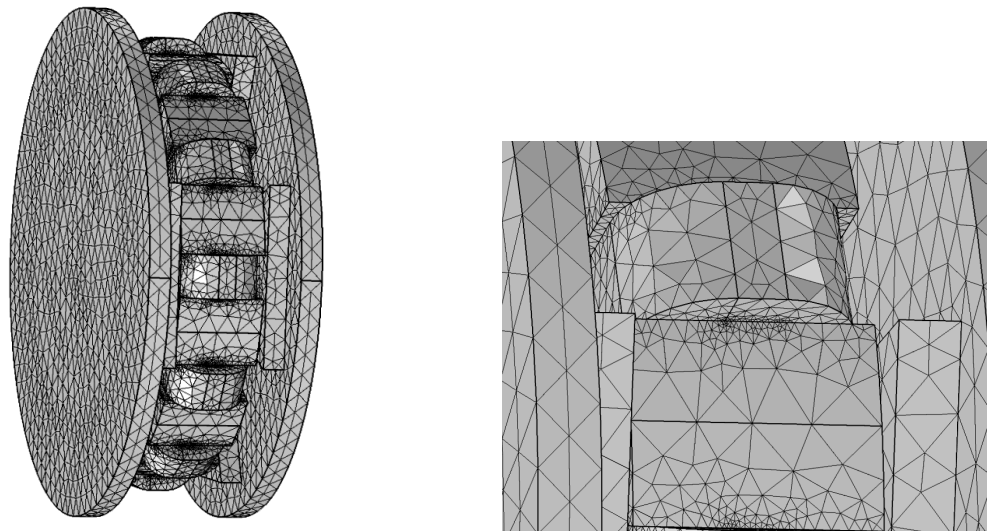
Rovnice 2.22 udává vztah mezi elektrickým proudem ve vodiči a intenzitou magnetického pole. Rovnice říká, že rotace intenzity magnetického pole je rovna proudové hustotě ve vodiči.

Rovnice 2.23 definuje vztah mezi magnetickou indukcí  $\vec{B}$  a magnetickým vektorovým potenciálem  $\vec{A}$ . Magnetický vektorový potenciál popisuje chování vektorového pole a výpočtem jeho rotace dostaneme vektor magnetické indukce.

Rovnice 2.24 popisuje vztah mezi elektrickým polem a magnetickým vektorovým potenciálem. Rovnice říká, že vektor intenzity elektrického pole je roven mínus derivaci magnetického vektorového potenciálu podle času. To znamená, že změna magnetického vektorového potenciálu s časem je rovna mínus intenzitě elektrického pole.

Rovnice 2.25 říká, že divergence magnetické indukce je rovna nule. To znamená, že magnetické pole je nezřídlové a magnetické indukční čáry jsou uzavřené smyčky.

### 2.3.4 Mřížka



Obrázek 2.9: Vlastní model: Ukázka výpočetní mřížky, vpravo detail oblasti cívky

Výpočetní mřížka byla nastavena pro různé součásti rozdílně s ohledem na kvalitní výsledky výpočtu a zároveň dostupné výpočetní kapacity. V oblasti cívek a vzduchové mezery mezi statorem a PM na rotoru byla mřížka značně jemnější (viz. obrázek 2.9 - nejmenší rozměr mřížky 0,05 mm) než v jiných oblastech - nastaven velký gradient změny velikosti mřížky (umožňuje ušetřit výpočetní kapacitu, ale zároveň ponechat dostatečně jemnou mřížku v oblastech, kde je to nutné).

V případě dostupné vyšší výpočetní kapacity by bylo vhodné provést analýzy s jemněji definovanou mřížkou v celé oblasti stroje a vzduchového okolí.

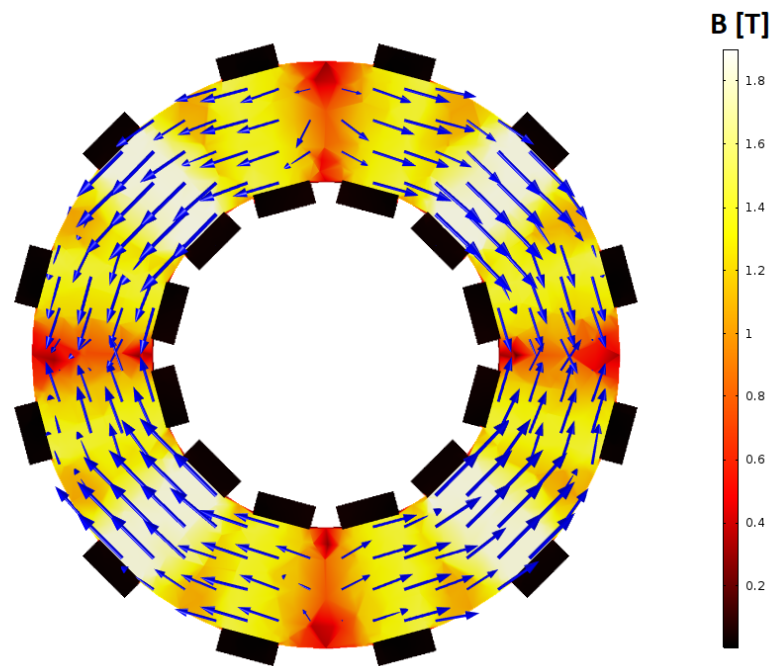
### 2.3.5 Přehled parametrů

<b>Veličina</b>	<b>Značka</b>	<b>Hodnota</b>
Průřez cívkového vodiče	$S_W$	0,01 mm <sup>2</sup>
Průměr cívkového vodiče	$d_W$	0,1 mm
Počet závitů cívky	$N$	40
Remanentní indukce PM	$B_{rZ}$	1 T
Frekvence napájecího napětí	$f$	50 Hz
Fázový posun pro fázi U	$\phi_U$	0°
Fázový posun pro fázi V	$\phi_V$	120°
Fázový posun pro fázi W	$\phi_W$	-120°
Maximální hodnota napájecího napětí	$U_m$	0,08 V

## 3 Analýzy modelu

Tato kapitola se bude zabývat výsledky výpočtů v programu COMSOL Multiphysics 5.2 získané na základě modelu navrženém v kapitole 2.

### 3.1 Ověření magnetického toku

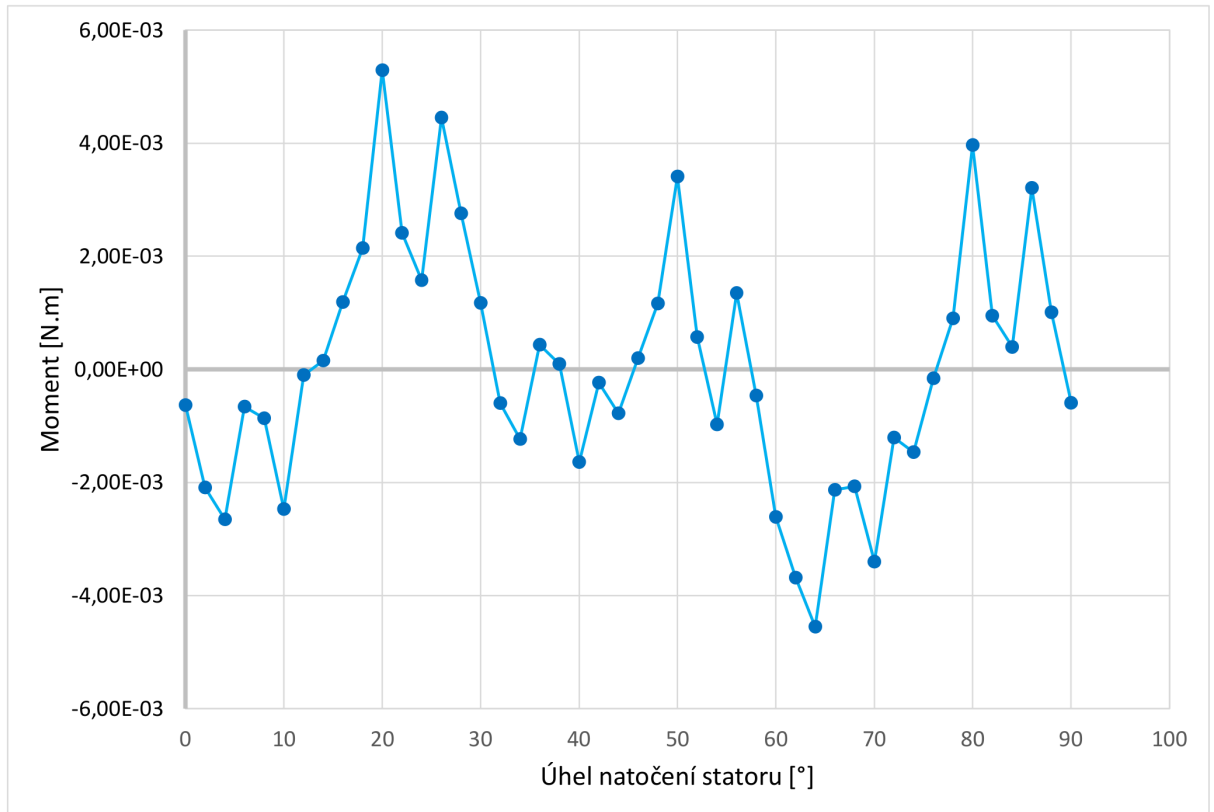


Obrázek 3.1: Vlastní model: Barevná škála - Magnetická indukce, Šipky - Směr magnetického toku

V bodech 1.3.7 a 2.1.1 je uvedena teoretická dráha magnetického toku v toroidním statorovém jádře. Na základě navrženého modelu jsem provedl ověření této teorie. Na obrázku 3.1 je vidět, že ve statorovém jádře skutečně dojde k vytvoření 4-pólového systému. Na obrázku jsou póly vidět jako červená místa, kde je slabší magnetická indukce. Naopak v místě mezi póly je vidět větší magnetická indukce - bílá místa. Šipky ukazují směr magnetického toku - je jasně rozlišitelné, kde magnetický tok do statorového jádra vtéká a kde vytéká.

Na základě tohoto ověření můžeme říci, že cívky jsou zapojeny ve správném pořadí a permanentní magnety jsou na rotorech umístěny správnými polaritami. Nesymetricky umístěné magnety, proměnlivá vzduchová mezera, špatně zapojené cívky by se v tomto grafickém znázornění projevíly nesymetrií magnetického toku a magnetické indukce.

## 3.2 Točivý moment



Obrázek 3.2: Vlastní model: Moment v závislosti na úhlu natočení statoru a rotoru

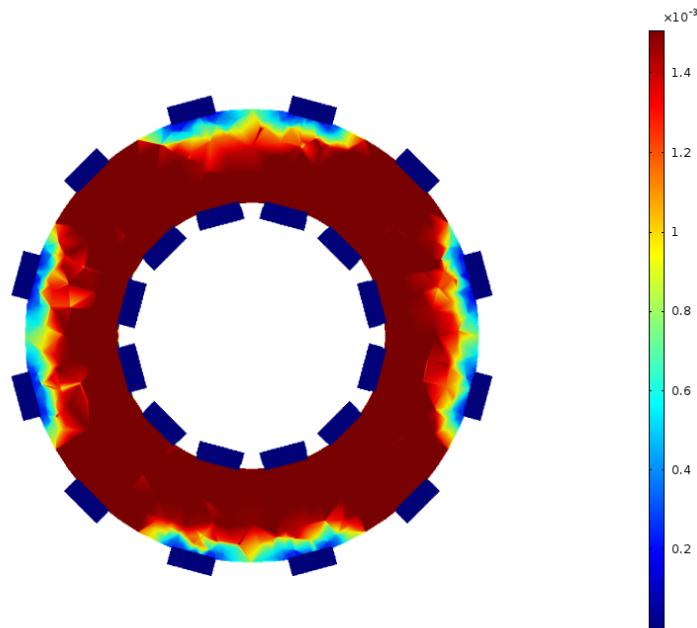
Pro výpočet momentu stroje byla použita parametrická analýza přes úhel natočení mezi státorem a rotorem (neboli zátěžný úhel). Výsledný průběh momentu je vidět na grafu 3.2.

Z grafu je možné vyčíst maximální moment, kterého stroj může dle analýzy dosáhnout, až  $M = 5,3 \text{ mN} \cdot \text{m}$ .

Z grafu můžeme dále vyčíst 2 důležité informace. Zaprvé, analýza průběhu momentu je velmi hrubá. V rámci této práce nebylo z důvodu nedostatečných výpočetních kapacit možné udělat jemnější parametrickou analýzu. Pro přesnější představu o průběhu momentu by bylo potřeba jemnější analýzu udělat.

A zadruhé, průběh momentu v závislosti na zátěžném úhlu je značně zvlněný s několika lokálními extrémy. Toto zvlnění může být způsobeno více faktory. Pro zlepšení průběhu by bylo nutné udělat další parametrické analýzy. Faktory, které mohou ovlivnit zvlnění průběhu momentu, a které by tedy bylo dobré parametrizovat a analyzovat mohou být tyto: velikost remanentní indukce PM, tvar a rozměry PM, šířka vzduchové mezery, tvar a rozměry statorových cívek. Z důvodu nedostatečných výpočetních kapacit nebylo možné tyto parametrické analýzy v rámci této práce provést.

### 3.3 Sycení magnetického obvodu



Obrázek 3.3: Vlastní model: Poměr  $B / H$  ve statorovém jádře

Dle úvahy o dráze magnetického toku z kapitoly 1.3.7, která je zobrazena na obrázku 1.8 je zřejmé, že statorovým jádrem prochází magnetické toky vztahující se k oboum rotorům. Je tedy nutné provést kontrolu sycení magnetického obvodu.

Na obrázku 3.1 vidíme dosaženou magnetickou indukci ve statorovém jádře. Na obrázku 3.3 je zobrazena permeabilita vypočtena ze vztahu:

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (3.1)$$

kde  $B$  je magnetická indukce a  $H$  intenzita magnetického pole ve statorovém jádře.

Při porovnání s grafem zobrazeném na obrázku 2.7 je zřejmé, že ve statorovém jádře dochází o odklonu od lineárního průběhu permeability, tedy poměru magnetické indukce a intenzita magnetického pole.

Konec lineární části průběhu permeability je přibližně okolo hodnoty  $B = 1,25$  T. Z obrázku 3.1 ale vidíme, že ve statorovém jádře dochází k dosažení hodnoty více než  $B = 1,8$  T, z čehož plyne, že ve statorovém jádře dochází k magnetickému přesycení.

Přesycení magnetického obvodu může mít vliv na zvlnění průběhu a velikost kroutícího momentu v závislosti na zátěžném úhlu.

Aby došlo k zamezení přesycení magnetického obvodu, bylo by vhodné buď změnit materiál magnetického obvodu, u kterého bude lineární část průběhu permeability dosahovat do vyšších hodnot magnetické indukce, nebo snížit magnetickou indukci ve statorovém jádře pomocí optimalizace permanentních magnetů. Tuto optimalizaci můžeme provést

změnou materiálu permanentních magnetů nebo optimalizací jejich rozměrů (například tloušťky). Tuto optimalizaci také nebylo možné provést v rámci této práce z důvodu nedostatečných výpočetních kapacit pro parametrické analýzy.

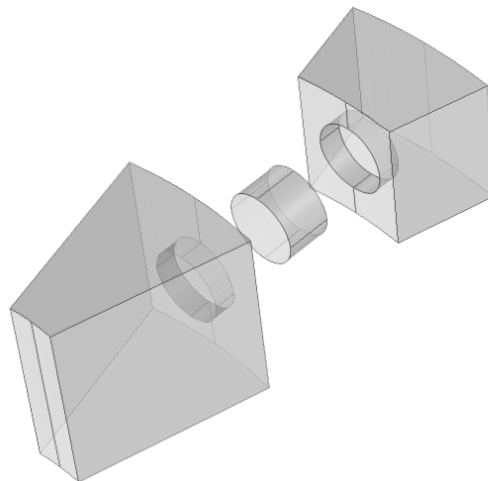
## 4 Návrh postupu výroby

Tato kapitola se bude zabývat základním návrhem výroby jednotlivých částí navrženého stroje.

### 4.1 Statorové jádro

K výrobě statorového jádra z feromagnetického materiálu bych navrhl využít obráběcích technologií. Jako základ bych navrhl využít feromagnetický toroid čtvercového průřezu o hraně 2 mm. Do tohoto toroidu by postupně byly vyřezány jednotlivé drážky pro umístění cívek dle zadaných a určených rozměrů v bodě 2.2.1 (viz Příloha č. 1).

Uchycení statorového jádra na kryt motoru, a tedy i stabilizaci jádra proti pohybu vyvolanému vzájemných působením stator-rotor, bych navrhl udělat pomocí kontaktního čepu na vnější plošce statorového jádra. Do této vnější plošky zubu statorového jádra a do vnitřní plošky zubu na krytu stroje (viz. sekce 4.2) by byla vyvrtána díra a při spojení by byl mezi zuby statoru a krytu motoru vložen kontaktní čep z magneticky nevodivého materiálu (viz. obrázek 4.1).



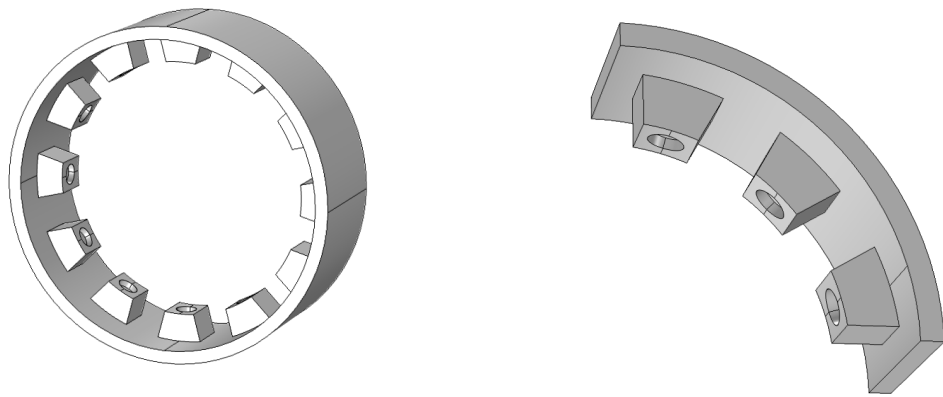
Obrázek 4.1: Vlastní model: Zobrazení návrhu spojení zubu statorového jádra a zubu krytu motoru pomocí kontaktního čepu

Drážky pro cívky bych navrhl vyrobít pomocí laserových obráběcích technologií, které dosahují i v menších rozměrech dostatečné přesnosti. Díry na kontaktních ploškách bych navrhl vyrobít vrtáním.

## 4.2 Kryt motoru

K výrobě krytu motoru bych navrhl využít moderních technologií 3D tisku z důvodu snížení hmotnosti krytu a zvýšení efektivity výroby. Kryt motoru musí být vyroben z magneticky nevodivého materiálu a je tedy možné ho snadno vyrobit 3D tiskem.

Kryt motoru bude muset být opatřen vystouplými zuby směrem dovnitř, které budou přiléhat k zubům statorového jádra a tvořit tak kontaktní plošky pro uchycení statoru do krytu. Z důvodu těchto plošek, které by znemožňovaly pohyb statoru, by bylo nutné vyrobit kryt z více částí (viz. obrázek 4.2), které se následně složí kolem statoru a stáhnou.



Obrázek 4.2: Vlastní model: Zobrazení návrhu krytu motoru a detail na část pro sezazení kolem statoru

K uchycení hřídele do krytu motoru bych navrhl využít mikroložiska. Dle [23] se vyrábí i klasická kuličková ložiska v požadovaných rozměrech průměru hřídele  $< 1$  mm.

## 4.3 Rotorový disk a hřídel

U výroby samotného rotorového disku je nejsložitější součástí uchycení hřídele, v tom smyslu, aby nedocházelo k prokluzování rotoru po hřídeli. Tento problém by bylo možné řešit například uložením s přesahem a zalisováním za tepla. Průměr hřídele by tedy byl větší než díra v rotorovém disku. Toto uchycení rotorového disku by zároveň zabránilo i posunutí disku po hřídeli směrem ke statorovému jádru vlivem magnetických přitažlivých sil.

Rotorový disk by byl vyroben z feromagnetického materiálu dle rozměrů uvedených v bodě 2.2.3 (viz Příloha č. 2). V jeho středu by bylo nutné vyříznout díru pro zalisování hřídele. Samotná hřídel by byla vyrobena z magneticky nevodivého materiálu.

Výřez díry v rotoru (viz. výkres v příloze č.2) bych navrhl vyrobit pomocí obráběcích technologií. Například laserové mikroobráběcí technologie zvládají vysokou míru přesnosti



i pro menší rozměry (dle [21] a [22]).

## 4.4 Cívka

Výroba cívky rozměrů dle bodu 2.2.2 je technicky možná navinutím drátu. V tomto případě bych navrhl využít lakovaný měděný drát o průměru 0,1 mm. V případě využití tohoto drátu by bylo možné navinout dříve uvedených 40 závitů - 10 v jedné vrstvě ve čtyřech vrstvách.

Pro zefektivnění výroby by bylo vhodné uvažovat, zdali by nebylo možné využít k výrobě moderních technologií, například 3D tisku.

Uchycení cívky proti posuvu není nutné řešit, protože toto je vedlejší efekt uložení vinutí do drážek u toroidního typu vinutí.

## 4.5 Permanentní magnety

Pro své výpočty jsem uvažoval remanentní indukce blízkou hodnotě 1T. Z toho důvodu je nutné správně zvolit i materiál pro výrobu permanentních magnetů. Například Neodymové magnety (dle [19]) dosahují i vyšších hodnot.

Při výrobě prototypu bych navrhl nechat vyrobit permanentní magnety na zakázku u specializovaného výrobce, vzhledem ke složitější výrobě magnetů ze vzácných zemin.

Pro zefektivnění výroby by bylo možné uvažovat o změně materiálu magnetů, který by umožňoval jednodušší výrobu požadovaného tvaru, ale udržoval podobnou hodnotu remanentní indukce.

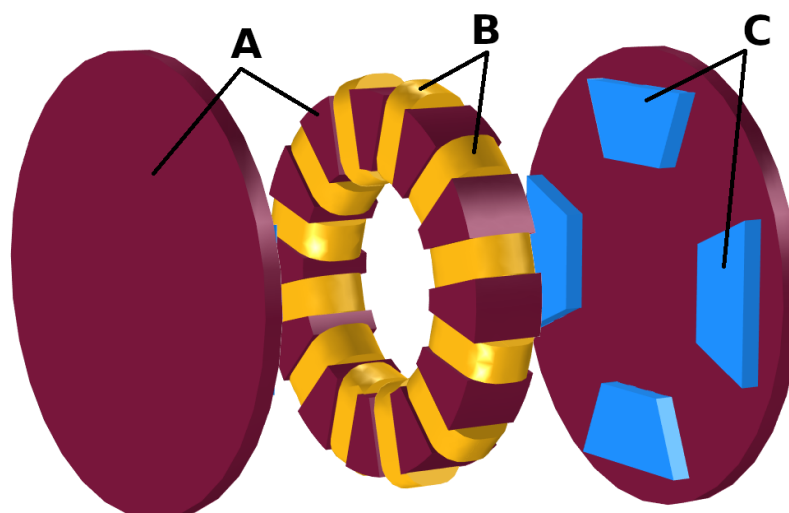
Upevnění magnetů na rotorový disk bych navrhl přilepením, například pomocí dvou-složkového lepidla s epoxidovou pryskyřicí. Je možné, že během výroby a testování bude objeveno nedostatečnost tohoto upevnění a bude nutné hledat jinou variantu. Například formu mechanického upevnění pomocí nemagnetických materiálů.

## 4.6 Materiály

Pro výrobu statorového jádra a rotorových disků navrhuji využít feromagnetického materiálu s relativní permeabilitou řádově  $5 \cdot 10^3$  a více, aby bylo dosaženo co nejnižšího magnetického odporu.

Dle sekce 4.4 navrhuji na výrobu cívek měděné vodiče kvůli jejich dobré vodivosti a tím dosažení větší indukce.

Dle sekce 4.5 navrhuji využít permanentní magnety na bázi vzácných zemin z důvodů jejich přirozeně vysokých hodnot remanentní indukce. Díky těmto vysokým hodnotám je možné dosáhnout vyšší hodnoty momentu.



Obrázek 4.3: Vlastní model: Návrh výrobních materiálů (A-feromagnetický materiál, B-měď, C-materiál PM na bázi vzácných zemin)

## 4.7 Efektivita výroby

Navrhovaný mikromotor je z hlediska výroby náročný především v oblasti výroby statoru. Statorové jádro má poměrně složitý tvar a navíjení cívky by při rozměrech motoru bylo značně komplikované. Pro zlepšení efektivity výroby by proto bylo vhodné zaměřit se na celkové zjednodušení statoru.

### Způsob výroby toroidního jádra

První možností je změna způsobu výroby toroidního statorového jádra. V poslední době došlo k rozšíření 3D tisku past s magnetickou vodivostí i samotných kovů. Bylo by tedy možné zvážit výrobu statorového jádra pomocí těchto moderních technologií. Ale předpokládám, že alespoň zatím by se tato varianta vyplatila pouze pro větší množství kusů.

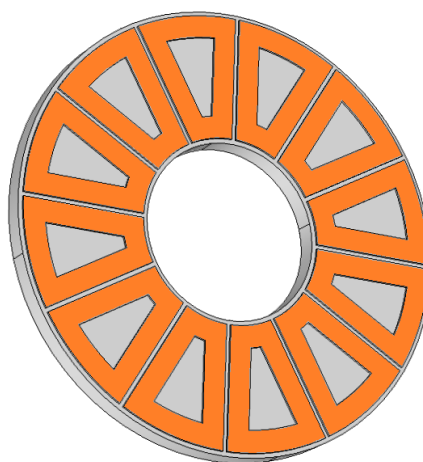
### Topologie stroje

Druhou možností je změna topologie stroje. Například zvážit možnost bezjádrového statoru s klasickým třífázovým jednovrstvým vinutím. Zde by se však mohl naskytnout problém kvalitního zpevnění statoru. Vzduchová mezera je extrémně malá a je tedy nutné, aby stator nebyl jakkoli pružný (pouze malá pružnost by mohla způsobit dotyk statoru o permanentní magnet).

## Modulární toroidní stator

Třetí možností by bylo zvážit možnost výroby modulární toroidního statoru. Zuby a jádra cívek by byly vyrobeny zvlášť (například s určitým přesahem, aby do sebe jednotlivé díly zapadly) a cívka navinuta (případně vytištěna pomocí 3D tisku) přímo na hranol jádra cívky. Teprve po navinutí cívek by byl stator složen z jednotlivých částí. Zde by však mohl vzniknout problém se složením statorového jádra - vznik druhotných vzduchových mezer mezi jednotlivými díly a ne zcela pevné statorové jádro.

## Využití rovinných tisknutých cívek



Obrázek 4.4: Vlastní model: Vizualizace možnosti řešení statoru pomocí rovinných cívek vyrobených 3D tiskem

Další možností by bylo využít předchozí úvahy o změně topologie a využití 3D tisku a hledat ideální variantu. Například pouze jednostranný stroj, kde by byly využity rovinné cívky spirálovitého charakteru lichoběžníkového tvaru, vytisknuté pomocí 3D tisku přímo na povrch statorového jádra. Statorové jádro by tedy kruhového tvaru bez jakýchkoliv zubů. U této varianty by bylo nutné opět vytvořit model a provést znovu všechny výpočty, jestli by magnetická síla cívek byla dostatečná pro funkčnost stroje.

## 5 Závěr

Závěr práce bude zaměřen na stručné shrnutí cílů práce, zhodnocení získaných poznatků a na doporučení pro další rozvoj dané problematiky.

Základní cíle této práce byly:

**Provést rešerši na téma mikromotory s axiálním tokem** - nastudovat užívané topologie strojů a zorientovat se v dané problematice.

**Vytvořit model v programu COMSOL Multiphysics 5.2** - na základě informací získaných rešerší navrhnout a vytvořit matematický model.

**Navrhnout konstrukci a výrobní postup mikromotoru včetně technologií výroby.**

Na základě získaných poznatků studiem dané problematiky byla vybrána topologie stroje. Následně byl vytvořen matematický model v programu COMSOL Multiphysics 5.2 s využitím vybrané topologie. Nad modelem byly provedeny parametrické analýzy a následně byl navržen postup výroby, včetně výrobních nákrešů v programu AutoCAD.

Model byl v průběhu práce několikrát upravován a pozměňován až do výsledně navrhovaného provedení. Úpravy proběhly z důvodu dosažení lepších vlastností, především točivého momentu.

Podle počítačové analýzy je možné říct, že model byl z technického hlediska udělán správně, protože směr a lokální extrémy magnetického toku a magnetické indukce dopadly dle očekávání. Maximální dosažený moment stroje dle analýzy byl  $M = 5,3 \text{ mN} \cdot \text{m}$ . Dalšími poznatkem z analýzy bylo, že ve statorovém jádru se magnetická indukce pohybuje na hranici magnetického sycení.

Po provedení počítačové analýzy byl stanoven návrh postupu výroby. Pro nejnáročnější část, tedy výrobu cívek, bylo navrženo navinout cívky z měděného drátu. Na základě navržených postupů výroby byly navrženy i možné optimalizace navrhovaného stroje vzhledem k výrobním postupům.

Na základě návrhu by bylo možné postavit prototyp, provést měření skutečných vlastností a porovnat s výsledky počítačové analýzy modelu. Pro dosažení lepších vlastností stroje, je však možné doporučit další analytický výzkum a následné úpravy navrhovaného modelu.

Z výsledků počítačové analýzy a návrhů výrobních postupů lze vyvodit, že navrhovaný stroj ještě vykazuje řadu překážek pro praktické využití v efektivní hromadné výrobě. Z těchto důvodů je dále shrnuta řada navrhovaných optimalizací a dalších postupů k dosažení lepších vlastností stroje.

V rámci práce bylo zmíněno více možných optimalizací a vylepšení stroje.

V oblasti počítačové analýzy bych navrhl provést další parametrické analýzy (viz kapitoly 2.3.4, 3.2 a 3.3) pro získání lepších poznatků chování stroje a především pro optima-

lizaci jeho vlastností. V rámci práce byly navrženy například tyto optimalizace analýzy, které nemohly být plně provedeny z důvodu nedostačující výpočetní kapacity:

- využití jemnější mřížky
- parametrizace tvaru a rozměrů PM
- využití různých materiálů s ohledem na výrobu
- parametrizace šířky vzduchové mezery
- parametrizace tvaru a rozměrů cívkové drážky

Využití parametrizace by při těchto analýzách umožnilo najít vhodné kombinace všech proměnných. Vzhledem k tomu, že je pro každou kombinaci nutné udělat parametrickou analýzu točivého momentu v závislosti na zátěžném úhlu, vyžadovaly by tak analýzy značnou výpočetní kapacitu.

Z hlediska efektivní automatizované hromadné výroby (viz kapitola 4.7 se zvolená topologie ukazuje jako problematická. Z těchto důvodů by mohly nastávat překážky i při snaze stroj dále zmenšit. Z těchto důvodů by bylo vhodnější přehodnotit výběr topologií některých prvků stroje.

# Seznam použité literatury

- [1] Jacek F. Gieras, Rong-Jie Wang, Maarten J. Kamper: Axial Flux Permanent Brushless Machines (2nd ed.), Springer, 2008
- [2] Jacek F. Gieras: Permanent magnet motor technology: design and applications (3rd ed.), CRC Press, 2010
- [3] Asko Parviainen: Design of axial-flux permanent-magnet low-speed machines and performance comparison between radial-flux and axial-flux machines, Lappeenranta University of Technology, 2005
- [4] Metin Aydin: Magnet Skew in Cogging Torque Minimization of Axial Gap Permanent Magnet Motors, Proceedings of the 2008 International Conference on Electrical Machines, Kocaeli University, Paper ID 1186, 2008
- [5] Tianjie Zou, Ronghai Qu, Jian Li, Dawei Li, And Leilei Wu: A Consequent Pole, Dual Rotor, Axial Flux Vernier Permanent Magnet Machine, Tenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, 430074, China, 2015
- [6] Rüya Akinci, Mehmet Polat: Design and Optimization with Genetic Algorithm of Double Rotor Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Motor (TORUS Type) for Electrical Vehicles, The 4th International Conference on Power Electronics and their Applications (ICPEA), Elazig, Turkey, 2019
- [7] Sunil Kumar, Wenliang Zhao, Zhentao S. Du, Thomas A. Lipo, IEEE, Byung-Il Kwon: Design of Ultrahigh Speed Axial-Flux Permanent Magnet Machine With Sinusoidal Back EMF for Energy Storage Application, IEEE Transactions on magnetics, vol. 51, No. 11, ID 8113904, 2015
- [8] Abdullah Al-Badi, Adel Gastli, Hadj Bourdouden, Joseph Jervase: Evolution of Axial-Field Electrical Machines, Science and Technology, Special Review (2000) 227-245, Sultan Qaboos University, 2000
- [9] Zahra Nasiri-Gheidari, Hamid Lesani: A Survey on Axial Flux Induction Motors, ISSN 0033-2097, R. 88 NR 2/2012, University of Tehran, 2012
- [10] Somaloy®: Axial Flux Machine Solutions, Höganäs AB (publ.), August 2016
- [11] Daan Moreels, Peter Leijnen: MAGNAX White Paper: High Efficiency Axial Flux Machines, V1.1, 2018

- [12] Zdeněk Knapp: Diplomová práce: Motor s axiálním magnetickým tokem pro přímý pohon čerpadla, VUT Brno, 2015
- [13] Vladimír Krajánek: Diplomová práce: Návrh synchronního motoru s permanentními magnety pro pohon elektromobilu, ZČU Plzeň, 2016
- [14] Václav Srogončík: Bakalářská práce: Elektrické stroje s axiálním magnetickým tokem, ZČU Plzeň, 2017
- [15] David Lacina: Bakalářská práce: Elektrický stroj s axiálním magnetickým tokem, ZČU Plzeň, 2015
- [16] COMSOL Multiphysics version 5.2: Introduction to AC/DC Module
- [17] COMSOL Multiphysics version 5.2: AC/DC Module: Application Library Manual
- [18] COMSOL Multiphysics version 5.2: AC/DC Module: User's Guide
- [19] ShinEtsu Rare Earth Magnets, Magnet Products List, [https://www.shinetsu-rare-earth-magnet.jp/e/products/data\\_nd.html](https://www.shinetsu-rare-earth-magnet.jp/e/products/data_nd.html), Navštíveno 16.5.2020
- [20] BJMT Ideal Magnet Solutions, Understanding Magnetic Permeability, <https://idealmagnetsolutions.com/knowledge-base/magnetic-permeability-table/>, Navštíveno 16.5.2020
- [21] LASCAM Mikroobrábění, Navštíveno 23.5.2020 na: <https://www.lascam.cz/mikroobrabeni/>, Navštíveno 23.5.2020
- [22] GF Machining Solutions - Laserové Mikroobrábění, [https://www.gfms.com/country\\_CZ/cs/Products/advanced-manufacturing/laser-micromachining.html](https://www.gfms.com/country_CZ/cs/Products/advanced-manufacturing/laser-micromachining.html), Navštíveno 23.5.2020
- [23] Korbel Ložiska - Mikroložiska, <https://www.korbel-loziska.cz/sortiment/miniaturni-loziska-5>, Navštíveno 23.5.2020
- [24] MAGNAX.com, Axial Flux vs. Radial Flux, <https://www.magnax.com/magnax-blog/axial-flux-vs-radial-flux.-4-reasons-why-does-axial-flux-machines-deliver-a-higher-power-density>, Navštíveno 14.3.2020

# Seznam obrázků

1.1	Převzato z [3]: Základní uspořádání diskových strojů: a) jednostranný, b) dvoustranný se dvěma rotory, c) dvoustranný se dvěma statory, d) vícediskový stroj . . . . .	14
1.2	Převzato z [1]: Uspořádání kříženého 3-fázového 8-pólového vinutí, 24 cívek . . . . .	16
1.3	Převzato z [15]: Uspořádání nekříženého vinutí . . . . .	16
1.4	Převzato z [1]: Vytvarování cívek pro křížené bezjádrové vinutí: a) vytvořená cívka, b) uložení cívek . . . . .	17
1.5	Převzato z [1]: Uspořádání vinutí v vyniklými póly, 9 cívek . . . . .	18
1.6	Převzato z [10]: Vizualizace stroje s modulárním statorem, 24 cívek . . . . .	19
1.7	a) Převzato z [1]: Uspořádání bubnového (toroidního) 6-pólového vinutí, 18 cívek, b) Převzato z [4]: Vizualizace bubnového vinutí, 24 cívek . . . . .	19
1.8	a) Převzato z [1]: Magnetický tok v toroidním jádře - rozvinuté statorové jádro (1-cívky, 2-PM, 3-statorové jádro, 4-rotorový disk) . . . . .	20
2.1	Vlastní model: Uspořádání toroidního 4-pólového vinutí, 12 cívek . . . . .	23
2.2	Vlastní model: Uspořádání dvou 4-pólových rotorů se statorem (pro přehlednost zvětšená vzduchová mezera) . . . . .	24
2.3	Vlastní model: Orientační nákres rozměrů statorového jádra . . . . .	25
2.4	Vlastní model: Orientační nákres rozměrů cívky . . . . .	26
2.5	Vlastní model: Orientační nákres rozměrů rotoru . . . . .	26
2.6	Vlastní model: Model motoru umístěný ve vzduchovém prostředí . . . . .	28
2.7	COMSOL Multiphysics: Příklad BH křivky pro materiál Soft Iron (without losses) . . . . .	29
2.8	Vlastní model: Ukázka zapojení části obvodu pro jeden napěťový zdroj . . . . .	30
2.9	Vlastní model: Ukázka výpočetní mřížky, vpravo detail oblasti cívky . . . . .	33
3.1	Vlastní model: Barevná škála - Magnetická indukce, Šipky - Směr magnetického toku . . . . .	35
3.2	Vlastní model: Moment v závislosti na úhlu natočení statoru a rotoru . . . . .	36
3.3	Vlastní model: Poměr $B / H$ ve statorovém jádře . . . . .	37
4.1	Vlastní model: Zobrazení návrhu spojení zubu statorového jádra a zubu krytu motoru pomocí kontaktního čepu . . . . .	39
4.2	Vlastní model: Zobrazení návrhu krytu motoru a detail na část pro sezazení kolem statoru . . . . .	40
4.3	Vlastní model: Návrh výrobních materiálů (A-feromagnetický materiál, B-měď, C-materiál PM na bázi vzácných zemin) . . . . .	42



---

4.4	Vlastní model: Vizualizace možnosti řešení statoru pomocí rovinných cívek vyrobených 3D tiskem . . . . .	43
-----	--	----

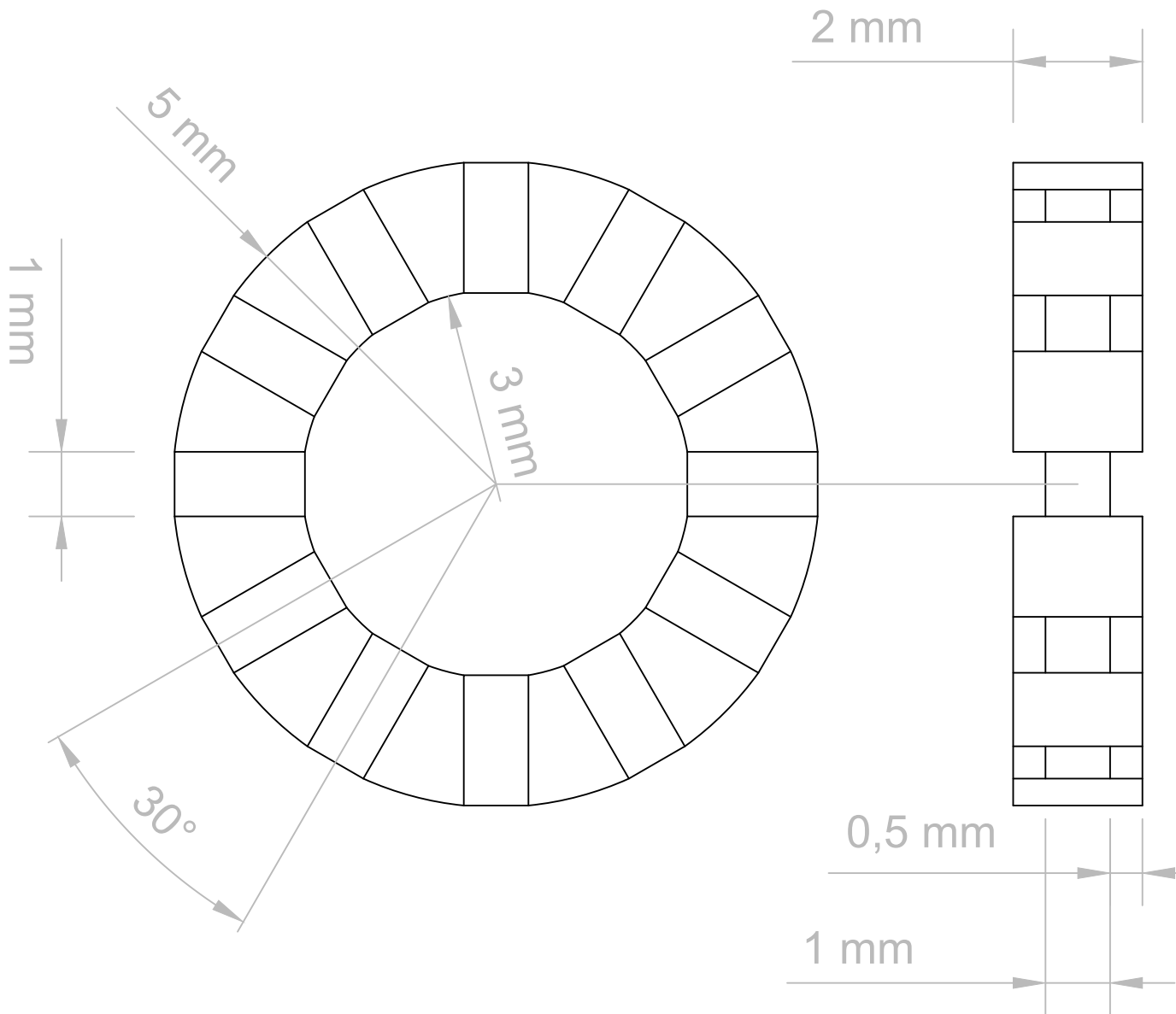
# Přílohy

## Seznam příloh

Příloha 1 - Výkres statorového jádra


Příloha 2 - Výkres rotoru

VYTVORENO VE STUDENTSKÉ VERZI PRODUKTU AUTODESK

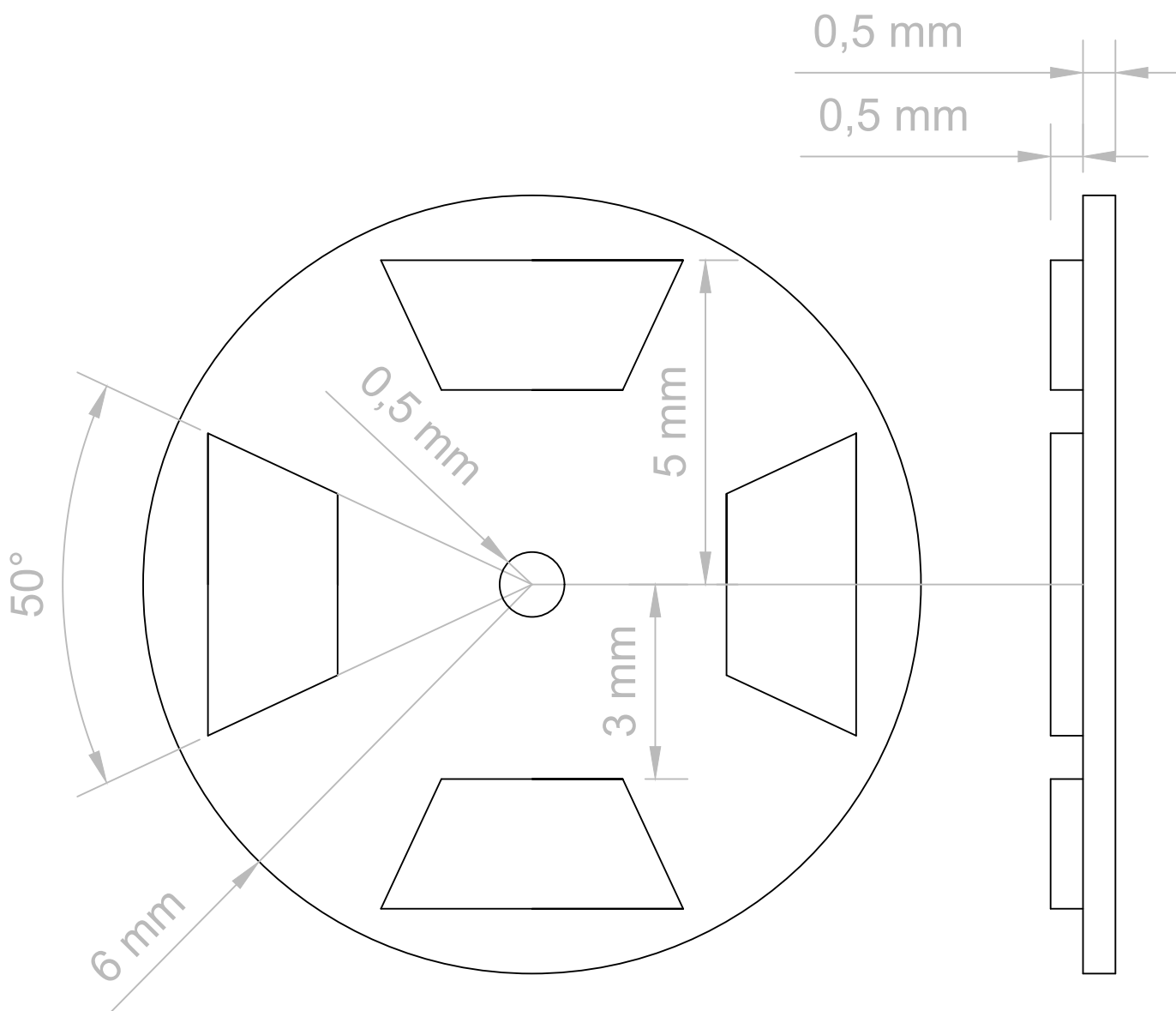



VYTVORENO VE STUDENTSKÉ VERZI PRODUKTU AUTODESK

VYTVORENO VE STUDENTSKÉ VERZI PRODUKTU AUTODESK

 <p>FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ ZÁPADOČESKÉ UNIVERZITY V PLZNI</p>	Výkres č. 1	Statorové jádro	12.06.2020
	M 10:1	Bakalářská práce: Návrh mikromotoru s axiálním tokem	Autor: Radek Calda

VYTVORENO VE STUDENTSKÉ VERZI PRODUKTU AUTODESK



 <p>FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ ZÁPADOČESKÉ UNIVERZITY V PLZNI</p>	Výkres č. 2	Rotor	12.06.2020
	M 10:1	Bakalářská práce: Návrh mikromotoru s axiálním tokem	Autor: Radek Calda