

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Návrh a modelování reluktančního motoru s permanentními magnety

Autor práce: Bc. Karel Pavlíček
Vedoucí práce: Ing. David Pánek, Ph.D.

Plzeň 2013

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Karel PAVLÍČEK**
Osobní číslo: **E11N0149P**
Studijní program: **N2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Návrh a modelování reluktančního motoru s permanentními magnety**
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :


1. Proveďte podrobnou rešerši v oblasti reluktančních motorů a popište současný stav.
2. Navrhněte uspořádání reluktančního motoru. Vytvořte numerický model a ověřte principiální funkčnost zařízení.
3. Vytvořte výrobní dokumentaci pro výrobu prototypu reluktančního motoru.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:


1. **Fitzgerald A.E., Kingsley CH. jr., Umans Stephen D.: Electric Machinery, McGraw-Hill, New York 2003, ISBN 978-0-07-366009-7**
2. **Boldea, I.: Reluctance Synchronous Machines and Drives, Clarendon Press-Oxford, 1996, ISBN 978-0-19-859391-1**
3. **Hanselman D.C.: Brushless Permanent Magnet Motor Design, Magna Physics Pub, 2006, ISBN, 978-1881855156**

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

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2012**
Termín odevzdání diplomové práce: **9. května 2013**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

Abstrakt

Cílem diplomové práce je navrhnout a numericky modelovat reluktanční motor s permanentními magnety ve statoru. Hlavní částí práce předchází rešerše současné problematiky reluktančních motorů a možností užití permanentních magnetů v této oblasti. Stěžejní částí práce je základní návrh stroje a především počítačové modelování jeho magnetického pole pomocí metody konečných prvků v programu Agros2D. Simulace má za úkol ověřit principiální funkčnost zařízení a ukázat rozložení magnetického pole ve stroji. V závěru jsou diskutovány a shrnuty výsledky simulace. K práci je přiložen výkres navrženého a simulovaného stroje.

Klíčová slova

reluktanční motor, permanentní magnety, modelování elektromagnetického pole, metoda konečných prvků, Flux Switching Permanent Magnet

Abstract

Pavlíček, Karel. *Design and Model of Reluctance Motor with Permanent Magnets* [Návrh a modelování reluktančního motoru s permanentními magnety]. Pilsen, 2013. Master thesis (in Czech). University of West Bohemia. Faculty of Electrical Engineering. Department of Theory of Electrical Engineering. Supervisor: Ing. David Pánek, Ph.D.

The goal of this Master's thesis is to design and numerically model the reluctance motor with permanent magnets in the stator. At first, the research of contemporary reluctance motors and possibility of permanent magnets application in it is made. The main part of the thesis is the basic design of the machine and the computer modelling of its magnetic field using the finite element method in the program called Agros2D. The simulation is supposed to verify device working principle and show magnetic field distribution within the machine. The simulation results are summarized and discussed in the conclusion. The designed machine drawing is enclosed in the Appendix.

Keywords

reluctance motor, permanent magnets, electromagnetic field modelling, finite element method, Flux Switching Permanent Magnet

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

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

.....

podpis

V Plzni dne 30. dubna 2013

Bc. Karel Pavlíček

Poděkování

Tímto chci poděkovat vedoucímu práce Ing. Davidu Pánkovi, Ph.D. z Katedry teoretické elektrotechniky za profesionální vedení práce, rady a postřehy, které vedly ke vzniku této práce.

Obsah

Úvod	11
1 Reluktanční motor - teorie	12
1.1 Princip reluktančního motoru	12
1.2 Vznik točivého momentu	14
2 Druhy reluktančních motorů	16
2.1 Synchronní reluktanční motor	16
2.2 Spínaný reluktanční motor	17
2.3 Krokový motor s proměnlivou reluktancí	18
2.4 Použití permanentních magnetů	19
2.5 Výhody a nevýhody reluktančního motoru	20
2.5.1 Výhody	20
2.5.2 Nevýhody	20
2.6 Použití reluktančního motoru	20
3 Elektrické stroje typu Flux Switching Permanent Magnet	21
3.1 Princip činnosti	21
3.2 Koncepce FSPM motoru	22
3.3 Trendy ve výzkumu FSPM motorů	23
3.4 Výhody a nevýhody FSPM motorů	25
4 Návrh reluktančního motoru s permanentními magnety	26
4.1 Rozměry stroje, počet pólů a počet fází	26
4.2 Magnetický obvod stroje	26
4.3 Zvolené permanentní magnety	27
4.4 Vinutí stroje	27
4.5 Uspořádání navrženého stroje	29
4.6 3D Model stroje	30
5 Počítačové modelování reluktančního motoru s permanentními magnety	31
5.1 Popis programu Agros2D	31
5.2 Popis řešené fyzikální úlohy	32
5.3 Definice problému	33
5.3.1 Řešená geometrie motoru	33
5.3.2 Okrajová podmínka a podmínky na rozhraní	34
5.3.3 Definované oblasti a materiály	35

5.3.4	Řešená výpočetní síť a řád polynomu aproximační funkce	36
5.4	Postup simulace	37
6	Výsledky simulace	38
6.1	Rozložení magnetické indukce	38
6.2	Rozložení siločar magnetického pole	39
6.3	Rozložení hustoty energie magnetického pole	40
6.4	Závislost statického momentu na úhlu natočení rotoru	41
7	Závěr	44
	Seznam použité literatury	45
	Přílohy	47

Seznam použitých symbolů a zkratek

A	[Wb · m ⁻¹]	vektorový magnetický potenciál
B	[T]	magnetická indukce
B_r	[T]	remanentní magnetická indukce
<i>d</i>	[m]	průměr
H	[A · m ⁻¹]	intenzita magnetického pole
H_c	[A · m ⁻¹]	koercitivní intenzita magnetického pole
<i>h</i>	[m]	výška
<i>I</i>	[A]	stejnoseměrný elektrický proud
<i>i</i>	[A]	elektrický proud
J	[A · m ⁻²]	proudová hustota
<i>L</i>	[H]	indukčnost
<i>l</i>	[m]	délka
<i>M</i>	[Nm]	velikost momentu
<i>m</i>	[-]	počet fází
<i>N</i>	[-]	počet
<i>P</i>	[W]	elektrický výkon
<i>R_m</i>	[H ⁻¹]	reluktance (magnetický odpor)
<i>r</i>	[m]	poloměr
<i>S</i>	[m ²]	plocha
<i>U</i>	[V]	napětí
v	[m · s ⁻¹]	rychlost
<i>W</i>	[J]	energie
<i>w</i>	[J · m ⁻³]	hustota energie
<i>X</i>	[Ω]	reaktance
<i>γ</i>	[S · m ⁻¹]	měrná elektrická vodivost
<i>μ</i>	[H · m ⁻¹]	permeabilita
<i>μ_r</i>	[-]	relativní permeabilita
<i>ϑ</i>	[rad]	úhel natočení
Ψ	[Wb]	spřažený magnetický tok
<i>ω</i>	[rad · s ⁻¹]	úhlová rychlost

Zkratky

DSPM	Doubly Salient Permanent Magnet
FSPM	Flux Switching Permanent Magnet
MKP	Metoda konečných prvků
PM	Permanentní magnety
SRM	Spínaný reluktanční motor (Switched Reluctance Motor)

Úvod

Jedním ze známých druhů elektrických motorů je reluktanční motor. V současné době se v oblasti moderních elektrických strojů zkoumají možnosti aplikace permanentních magnetů. Tato diplomová práce se zabývá možností jejich užití v reluktančním motoru. Cílem práce je provést návrh reluktančního stroje s permanentními magnety umístěnými ve statoru a následně provést jeho numerické počítačové modelování, které slouží především k ověření principiální funkčnosti motoru.

Návrh každého elektrického stroje je složitým technickým úkolem. Jednou z možností, jak návrh usnadnit, je užití výpočetní techniky. Při návrhu elektrických strojů je velmi výhodné použít metodu konečných prvků pro počítačové modelování magnetického pole ve stroji. Díky těmto numerickým počítačovým modelům je možné řešit magnetické pole i u elektrických strojů složitých tvarů, které by bylo analyticky neřešitelné.

V případě této diplomové práce vlastnímu návrhu a modelování stroje předcházelo studium problematiky reluktančních motorů. Toto studium je shrnuto v teoretické části práce, která kromě vysvětlení principu reluktančního motoru také obsahuje rešerši jejich současného stavu a popisuje možnosti použití permanentních magnetů v nich.

Následující kapitoly diplomové práce se týkají návrhu a počítačových simulací navrženého stroje. Bylo vypočteno magnetické pole stroje a byla vytvořena závislost statického momentu na poloze natočení rotoru. K modelování stroje byla využita metoda konečných prvků vyšších řádů přesnosti v programu Agros2D. V závěru jsou shrnuty výsledky simulace a jsou naznačeny návrhy pro další zkoumání.

Dále je třeba podotknout, že s ohledem na rozsah a účel práce nejsou pokryty všechny nutné aspekty návrhu elektrického motoru. Před vlastní výrobou prototypu by bylo potřebné provést tepelný výpočet, vyzkoušet dynamické chování motoru a vyzkoušet mnoho dalších věcí a vlivů.

Práce předpokládá znalosti teorie elektromagnetického pole a základní znalosti z oblasti elektrických strojů.

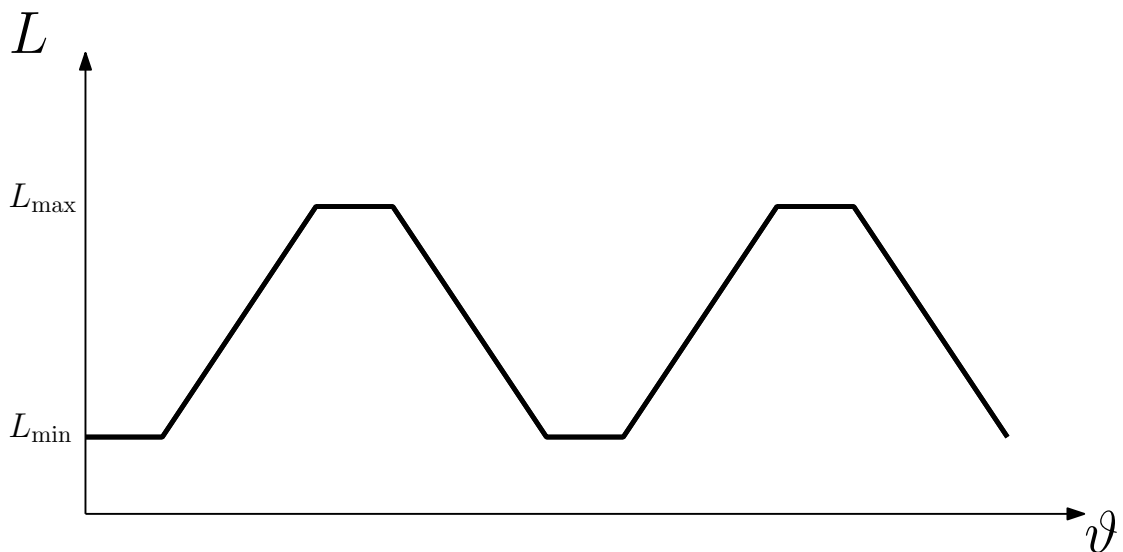
1 Reluktanční motor - teorie

1.1 Princip reluktančního motoru

Reluktanční motor je druh elektromechanického měniče využívajícího tzv. reluktanční moment. Základním principem reluktančního momentu je silové působení magnetického pole dosažené změnou magnetického odporu (reluktance) stroje. U reluktančních motorů je veškerý vznikající moment reluktančního charakteru [1].

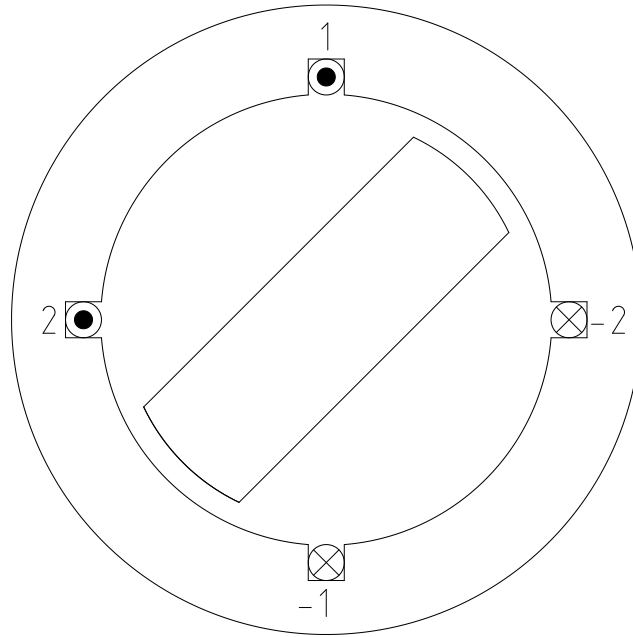
Aby docházelo ke změně reluktance během otáčení rotoru, musí se jednat o stroj s vyniklými póly. Rotor stroje se natáčí vždy tak, aby stroj dosáhl minimální reluktance. Překrývají-li se zuby rotoru a statoru, je magnetický odpor stroje minimální, v opačném případě je maximální. S polohou rotoru se mění i indukčnost stroje, která je úměrná jeho reluktanci [2].

Na následujícím obrázku je naznačen idealizovaný průběh indukčnosti v závislosti na úhlu natočení rotoru [3].

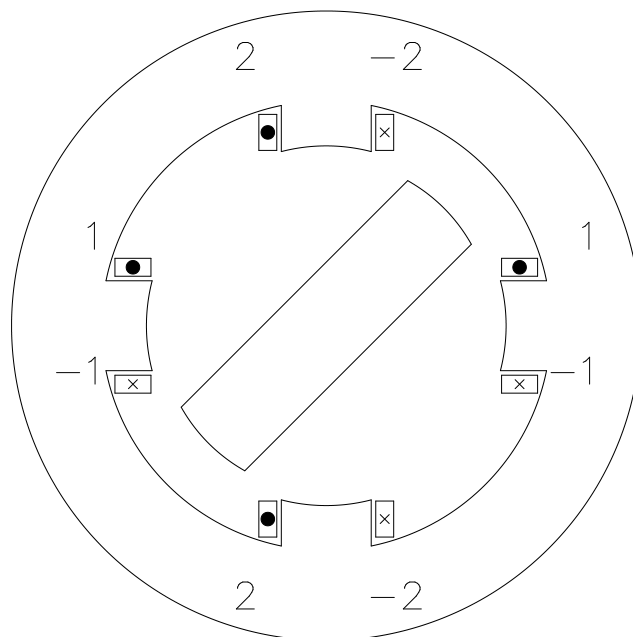


Obrázek 1.1: Závislost indukčnosti na poloze rotoru - podle [3]

Dle vyniklosti se reluktanční motory dělí na stroje s jednoduchou (*singly-salient*) nebo dvojitou vyniklostí (*doubly-salient*) [2]. Jednoduchá vyniklost znamená, že stator je hladký a rotor je s vyniklými póly. U dvojitě vyniklosti jsou vyniklé póly na statoru i rotoru stroje. Rozdíl mezi oběma typy je vidět na obrázcích 1.2 a 1.3.



Obrázek 1.2: Reluktanční stroj s jednoduchou vyniklostí - podle [2]



Obrázek 1.3: Reluktanční stroj s dvojitou vyniklostí - podle [2]

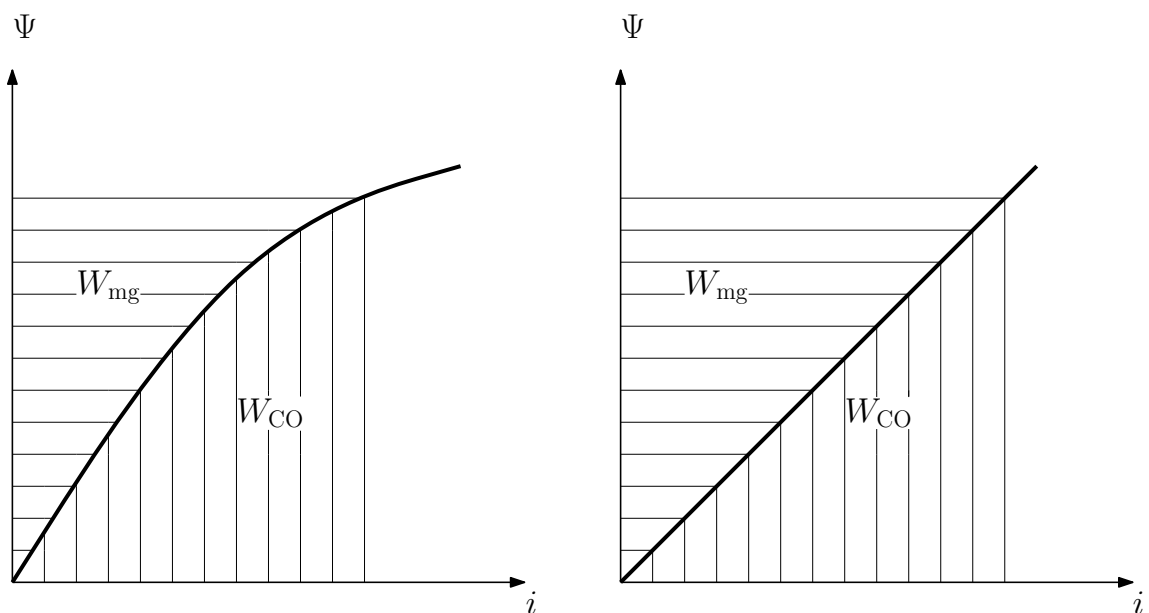
V následující podkapitole je princip motoru stručně popsán pomocí matematických vzorců. Je použito označení veličin a metodika používaná na Západočeské univerzitě v Plzni, viz literatura [3] a [4]. Další knihou, která se zabývá popisem reluktančního momentu, je literatura [2].

1.2 Vznik točivého momentu

Jednou z možností, jak určit moment stroje, je výpočet z akumulované energie, respektive koenergie. Na obrázku 1.4 je naznačena energie a koenergie akumulované v magnetickém poli stroje.

Pro točivý moment reluktančního stroje obecně platí rovnice:

$$M = \frac{\partial W_{CO}}{\partial \theta} . \quad (1.1)$$



Obrázek 1.4: Definice energie a koenergie - nelineární a lineární magnetický obvod - podle [4]

Pro energii platí:

$$W_{mg} = \int_{\Psi_1}^{\Psi_2} i d\Psi , \quad (1.2)$$

kde i je elektrický proud a Ψ spřažený elektrický tok.

Pro koenergii platí:

$$W_{CO} = \int_{i_1}^{i_2} \Psi di . \quad (1.3)$$

V případě lineárního modelu stroje se energie a koenergie magnetického pole rovnají.

Pro moment stroje potom platí:

$$M = \frac{\partial W_{\text{mg}}}{\partial \vartheta} . \quad (1.4)$$

V případě lineárního magnetického obvodu je možné určit energii magnetického pole podle jednoduchého vzorce pomocí indukčnosti. Indukčnost stroje je úměrná proudu a pro stroje s vyniklými póly i poloze rotoru. Při uvažování konstantního proudu je indukčnost úměrná pouze poloze rotoru.

Energie magnetického pole:

$$W_{\text{mg}} = \frac{1}{2} \cdot L(\vartheta) \cdot i^2 . \quad (1.5)$$

Statická definice indukčnosti:

$$L = \frac{\Psi}{I} = \frac{N \cdot \Phi}{I} = \frac{N \cdot B \cdot S}{I} = \dots = \frac{N^2}{R_m} . \quad (1.6)$$

Magnetický odpor (reluktance):

$$R_m = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{l}{S} . \quad (1.7)$$

Další informace k popisu elektromechanických přeměn jsou popsány v literatuře [2], [4], a [5].

Analytické vztahy použité v této kapitole stručně popisují hlavní myšlenky funkce reluktančního motoru. V případě modelování magnetického pole elektrických strojů v počítačových programech, jako je program Agros2D použitý v této práci, se energie magnetického pole určuje objemovým integrálem z hustoty energie akumulované ve vzduchové mezeře stroje.

Na závěr první kapitoly je ještě vhodné zmínit, že reluktanční moment vzniká i u synchronních strojů s vyniklými póly a ovlivňuje tvar jejich výsledné momentové charakteristiky.

2 Druhy reluktančních motorů

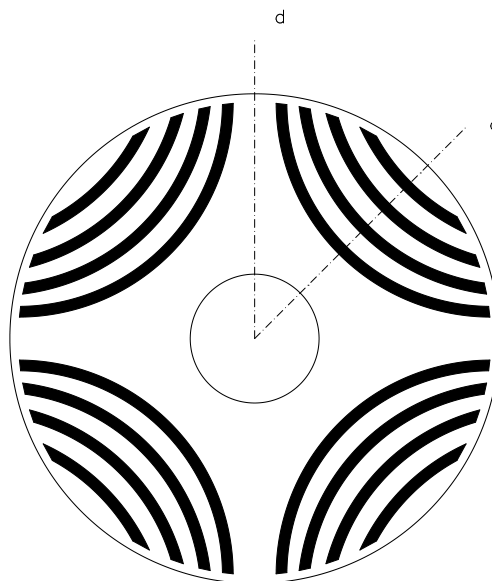
2.1 Synchronní reluktanční motor

Nejstarším druhem reluktančního motoru je synchronní reluktanční motor. Jedná se o synchronní motor s vyniklými póly, který nemá budicí rotorové vinutí. Stator stroje je hladký (válcový) a rotor má vyniklé póly [6].

Stator stroje je obdobný jako u klasického indukčního nebo synchronního stroje. Rotor stroje se otáčí synchronně s polem statoru. Stejně jako u synchronního stroje nesmí dojít k překročení zátěžného úhlu [6].

U synchronního reluktančního motoru má klíčový vliv konstrukce rotoru. V současné době je jednou z možností, jak zajistit vyniklost rotoru, radiálně vrstvený rotor, který je vidět na obrázku 2.1. Na obrázku 2.1 jsou černě vyplněny magnetické bariéry, které způsobují velkou magnetickou vodivost ve směru osy d a malou magnetickou vodivost ve směru osy q . Sledovaným parametrem je podíl příčné a podélné reaktance X_d/X_q . Čím je tento poměr větší, tím má stroj výhodnější parametry [1]. Poměr X_d/X_q v současné době typicky dosahuje hodnot 2 až 3 [6].

Dalším důležitým parametrem, který velmi ovlivňuje vlastnosti tohoto motoru je šířka vzduchové mezery. Čím je vzduchová mezera větší, tím je menší zvlnění momentu a klesá také vydávaný akustický hluk. Při větší vzduchové mezeře se ale zároveň sníží výkon a zhorší účinnost [6].



Obrázek 2.1: Radiálně vrstvený rotor - podle [1]

Možným vylepšením tohoto druhu motoru je vložení permanentních magnetů do rotoru [6]. Tímto opatřením se motor stane klasickým synchronním motorem s vyniklými póly a buzením pomocí permanentních magnetů.

Další informace k synchronnímu reluktančnímu motoru, jako je matematický model stroje a podrobnosti k návrhu, je možné najít v literatuře [1] a [6].

2.2 Spínaný reluktanční motor

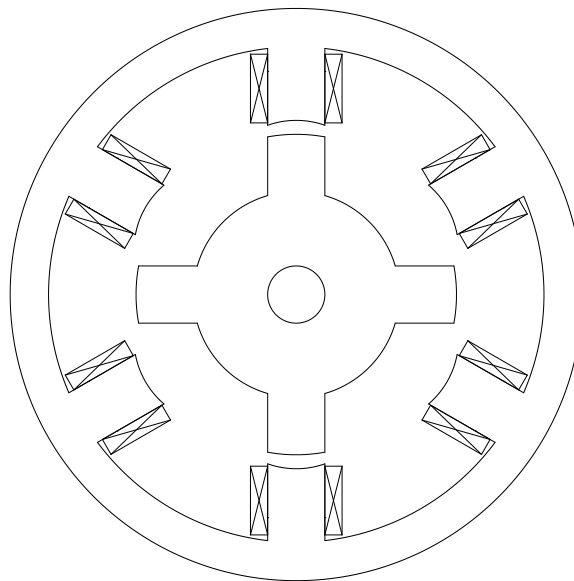
Velmi rozšířeným typem reluktančního motoru je spínaný reluktanční motor. V současné době se pod pojmem reluktanční motor většinou myslí právě ten.

Stator i rotor stroje mají vyniklé póly, pouze na statorových pólech jsou navinuty cívky, které budí magnetický tok [1]. Tyto cívky statorového vinutí jsou pomocí řídicí elektroniky spínány (elektronická komutace) tak, aby se rotor plynule otáčel. Současně je sepnuta vždy jen jedna fáze stroje [6]. Pro správnou funkci stroje je tedy nutné čidlo polohy rotoru [5].

Směr otáčení stroje závisí na sledu spínání statorových fází [7]. Moment spínaného reluktančního motoru závisí na kvadrátu velikosti napájecího proudu. Nezávisí tedy na polaritě protékajícího proudu [7].

Hlavními technickými parametry spínaného reluktančního motoru jsou počet zubů statoru N_S , počet zubů rotoru N_R a počet statorových fází.

Dvojitě vyniklé stroje se označují například jako 6/4, viz obrázek 2.2. První číslo udává počet pólů statoru, druhé číslo určuje počet rotorových pólů.



Obrázek 2.2: Trojfázový spínaný reluktanční motor typu 6/4 - podle [5]

Jednofázový a dvoufázový spínaný reluktanční motor není vhodný, protože nastává problém s rozběhem stroje. V určitých polohách natočení rotoru nevzniká dostatečný točivý moment. Řešením mohou být rozběhové hliníkové vložky (při rozběhu vzniká přídatný asynchronní moment) [1] nebo asymetrický tvar rotoru v případě dvoufázového motoru [1].

Vhodné vlastnosti mají trojfázové, čtyřfázové a pětifázové stroje. Točivý moment vzniká ve všech pozicích natočení rotoru. Nejčastější jsou trojfázové stroje typu 3/2, 6/4, 6/8, 12/8 nebo 12/10. Čtyřfázové stroje jsou typu 8/6 a pětifázové 10/8 [1].

Detaily ke SRM je možné najít v literatuře [1], kde jsou poznámky ke konstrukci a návrhu stroje, matematický model a dynamické chování. Podrobnější informace k řízení SRM je v literatuře [2], [5] a [8].

2.3 Krokový motor s proměnlivou reluktancí

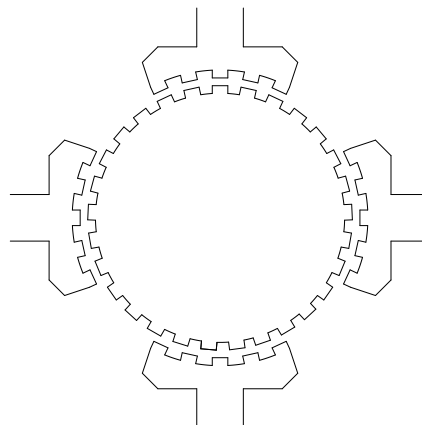
Druhem reluktančního motoru je i krokový motor s proměnlivou reluktancí. Princip tohoto motoru je stejný jako u spínaného reluktančního motoru.

Hlavním rozdílem krokového motoru s proměnlivou reluktancí oproti SRM je charakter provozu, který je u krokových motorů nespojitý [4]. A rychlost otáčení je nižší než u SRM [1]. Krok je přesně definovaný úhel natočení, úměrný počtu statorových a rotorových zubů. Na jednu celou otáčku rotoru připadá poměrně velké množství kroků, např. 50, 100 nebo 200 kroků [2].

Krokový motor má větší počet statorových a rotorových zubů než spínaný reluktanční a také nepotřebuje znát polohu natočení rotoru [1].

Směr otáčení motoru je, stejně jako u SRM, dán sledem spínání jednotlivých pólůvých dvojic.

Dalším druhem krokového motoru je krokový motor s permanentními magnety. Tento stroj však nemá čistě reluktanční moment, proto mu není věnována další pozornost.



Obrázek 2.3: Stator a rotor krokového motoru - podle [3]

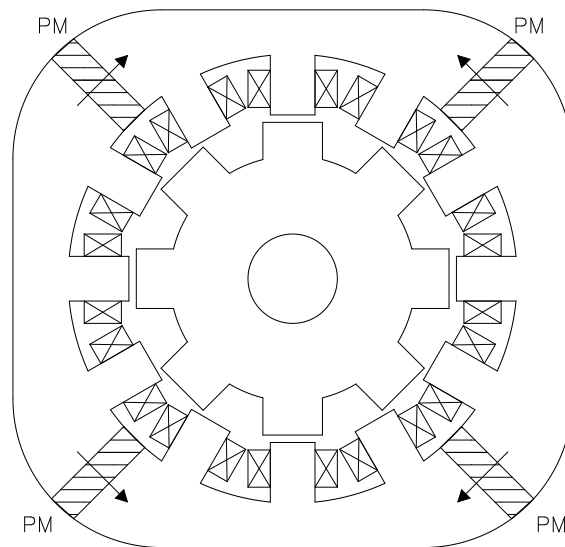
2.4 Použití permanentních magnetů

Obecně v elektrických strojích se pro zvýšení výkonu a účinnosti stroje používají permanentní magnety [6]. V současné době se pro své vlastnosti používají permanentní magnety typu SmCo a NdFeB. Nevýhodou obou typů magnetů je jejich vysoká pořizovací cena.

U permanentních magnetů jsou nejdůležitějšími technickými parametry: remanentní indukce B_r , koercitivní intenzita H_c , energetický součin $B \cdot H$ a Curieova teplota. Tyto parametry PM určují vlastnosti a omezení stroje s permanentními magnety.

V současné době jsou zkoumány různé koncepce reluktančních motorů s permanentními magnety umístěnými ve statoru - například DSPM (Doubly Salient Permanent Magnet) nebo FSPM (Flux Switching Permanent Magnet). Umístění PM do statoru je výhodné, protože na ně nepůsobí odstředivé síly, na statoru je také lze lépe chladit [11].

DSPM stroj typu 12/8 je vidět na obrázku 2.4. Konstrukčně připomíná klasický spínaný reluktanční motor, přičemž má PM umístěné tangenciálně v magnetickém obvodu statoru. Ve stroji vzniká reluktanční moment, který je způsoben silovým působením magnetického pole vyvolaného permanentními magnety a buzeným vinutím.



Obrázek 2.4: 12/8 DSPM motor - podle [11]

Pro vlastní návrh a simulaci byla zvolena koncepce Flux Switching Permanent Magnet, které je věnována samostatná kapitola. Ve FSPM strojích by měla vznikat větší hustota momentu než v DPSM stroji [11].

2.5 Výhody a nevýhody reluktančního motoru

2.5.1 Výhody

Hlavní výhodou reluktančních motorů je jednoduchá konstrukce rotoru, která na sobě nenese žádné vinutí. V rotoru v podstatě nevznikají Jouleovy ztráty a tím odpadá problém s jeho chlazením. Díky absenci rotorového vinutí, na které nepůsobí odstředivé síly, může stroj pracovat při velmi vysokých rychlostech [1].

V případě spínaného reluktančního motoru je jednoduše navinutý i stator. Čela vinutí jsou krátká a fáze se vzájemně nekřížují [1].

Reluktanční stroje mají malý moment setrvačnosti a výborné dynamické vlastnosti [8]. Vynikající vlastností reluktančních strojů je veliký záběrný moment [1].

Reluktanční stroje bez PM mohou pracovat při vyšší pracovní teplotě, protože většina ztrát vzniká ve statoru, který se snáze chladí [9].

Z hlediska provozní spolehlivosti jsou reluktanční stroje výhodné, protože nemají kartáče ani komutátor.

2.5.2 Nevýhody

Nevýhodou všech druhů reluktančních strojů je pulzační moment, s čímž je spojena i vyšší hlučnost stroje.

V reluktančních strojích jsou zvýšené ztráty v železe, protože pracují při vysokém nasycení magnetického obvodu [6].

Další nevýhodou u spínaného reluktančního motoru je nutnost elektroniky pro řízení chodu a snímání polohy rotoru.

2.6 Použití reluktančního motoru

Vzhledem ke svým výhodným vlastnostem se reluktanční motor používá v mnoha průmyslových aplikacích, především tam, kde je potřeba vysokých otáček.

Může se jednat například o:

- pohony pásků, disků a tiskařských hlav [6]
- pohony pro výrobu syntetických vláken [6]
- pohony strojních vřeten [2]
- pohon turbodmychadla pro odstranění turboefektu [3]
- pohon pro startování tryskových motorů [3]

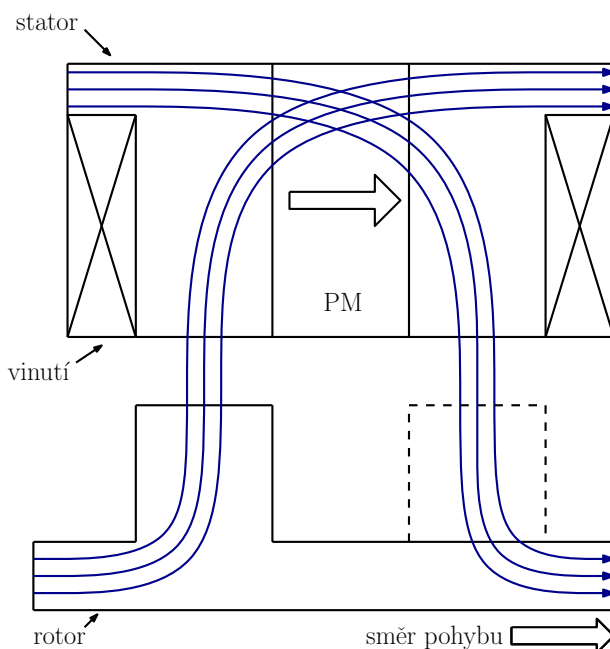
3 Elektrické stroje typu Flux Switching Permanent Magnet

3.1 Princip činnosti

V současné době jsou předmětem výzkumu stroje s anglickým názvem Flux Switching Permanent Magnet (zkratka FSPM) Machines. Jsou to stroje kombinující vlastnosti synchronního motoru s permanentními magnety a spínaného reluktančního motoru, tedy vysokou hustotu výkonu synchronního motoru s permanentními magnety a robustní konstrukcí SRM [10].

Motor svojí konstrukcí připomíná spínaný reluktanční motor, který má v zubech statoru vloženy permanentní magnety, které jsou tangenciálně orientovány a působí směrem proti sobě [11]. Stator i rotor stroje mají vyniklé póly, vznikající moment je proto reluktančního charakteru.

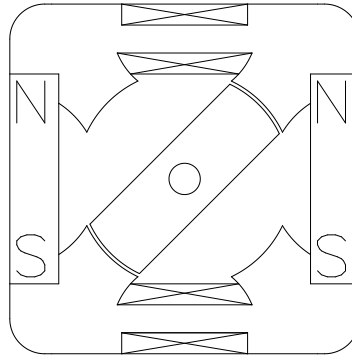
Ve stroji dochází k superpozici magnetického pole permanentních magnetů a magnetického pole vybuzeného cívkami vinutí. Výsledný magnetický tok se uzavírá přes vzduchovou mezeru a vyvolává točivý moment. Směr toku se během otáčení rotoru mění (viz obrázek 3.1). Cílem je maximalizace síly (momentu) působícího na rotorové zuby.



Obrázek 3.1: Princip FSPM stroje - podle [10]

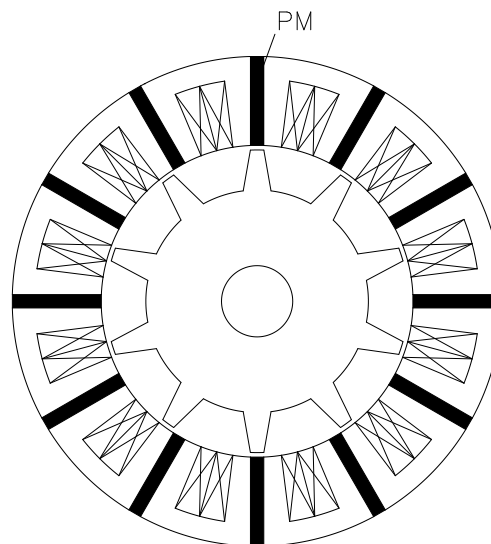
3.2 Koncepce FSPM motoru

Jak již bylo zmíněno, FSPM motor je svojí konstrukcí podobný SRM. Důležitým parametrem je tedy počet statorových fází a počet statorových pólů N_S a rotorových pólů N_R . Nejjednodušším (a spíše teoretickým) reluktančním strojem využívajícím principu FSPM je stroj jednofázový, který je vidět na obrázku 3.2.



Obrázek 3.2: Jednofázový FSPM motor - podle [11]

Zajímavější jsou stroje vícefázové, protože mají výhodnější parametry z hlediska zvlnění momentu a dalších provozních parametrů. Vhodnou momentovou charakteristiku pro praktické použití mají trojfázové stroje 12/10 a 12/14. Na obrázku 3.3 je naznačen navržený trojfázový 12/10 FSPM motor.



Obrázek 3.3: Navrhovaný trojfázový FSPM motor 12/10

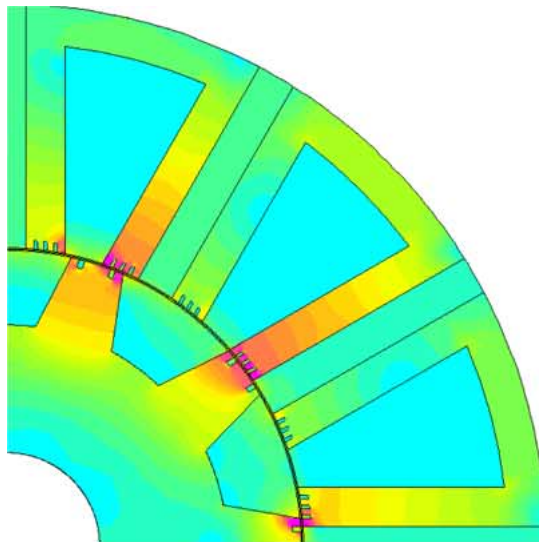
Stroj je navržen na základě literatury [10], [11], [12]. Další informace k navrženému stroji jsou v kapitole týkající se jeho návrhu.

3.3 Trendy ve výzkumu FSPM motorů

V současné době se vědecké týmy snaží především o návrh, optimalizaci a praktické provedení FSPM strojů.

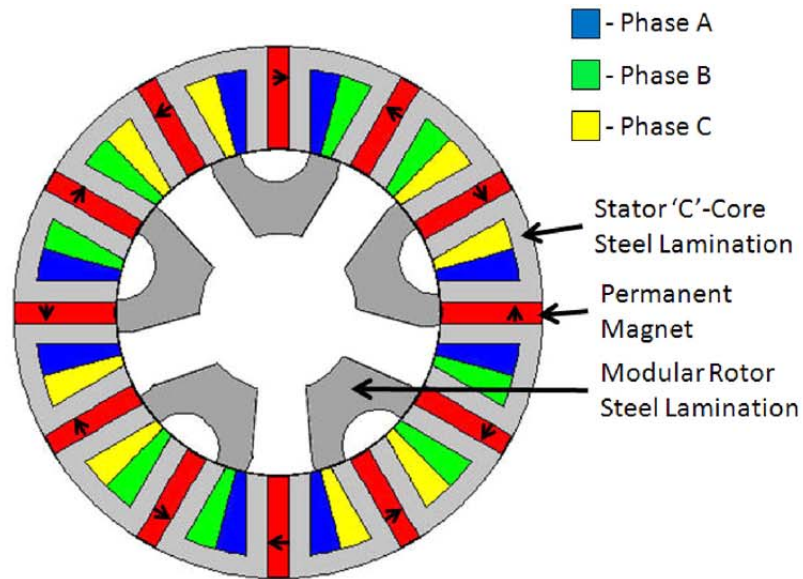
K analýze elektromagnetického pole stroje se ve většině případů používá metoda konečných prvků. Díky získaným poznatkům z počítačových simulací je možné optimalizovat parametry stroje před vlastní výrobou prototypu. Jsou zkoušeny různé počty statorových a rotorových zubů.

Velmi sledovanou veličinou u FSPM motorů je tzv. Cogging torque, což je moment vyvolaný čistě permanentními magnety v důsledku dvojitě vyniklosti stroje. Tento moment způsobuje zvlnění momentové charakteristiky, které je požadováno minimální. Možným opatřením, které vede k redukci tohoto momentu, je přidání drážek do statorových, nebo rotorových zubů (nebo do obojího), viz obrázek 3.4 [13].



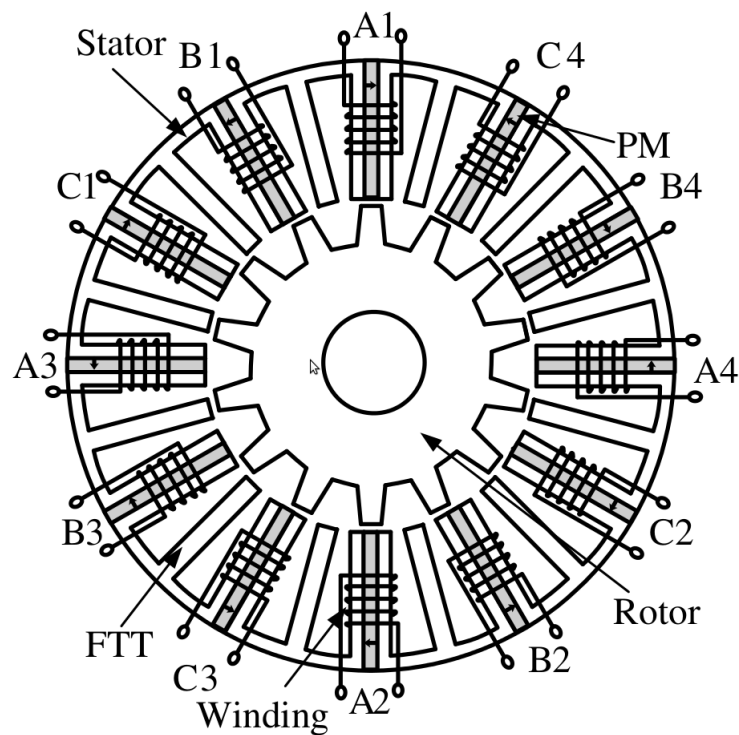
Obrázek 3.4: Opatření ke snížení zvlnění momentu - převzato z [13]

Objektem zkoumání jsou i možnosti úpravy jednotlivých prvků stroje. V případě rotoru je to například použití modulárního rotoru, viz obrázek 3.5. Modulární rotor se od konvenčního liší v tom, že není z jednoho magneticky vodivého kusu. Modulární rotor se skládá z magneticky vodivé části a části, která slouží jako magnetická bariéra (nemagnetický materiál, nebo vzduch). Výhodou tohoto rotoru je menší hmotnost rotoru a menší ztráty v železe. Nevýhodou je o něco menší moment [14].

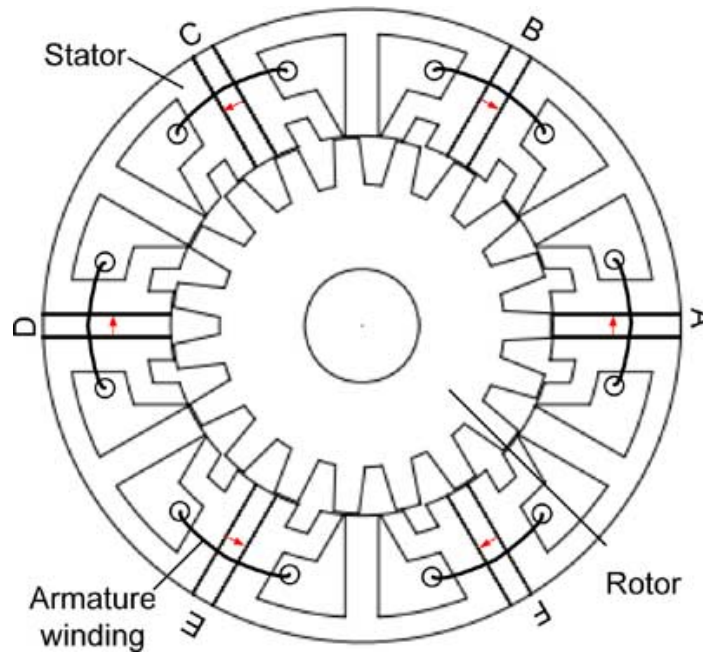


Obrázek 3.5: FSPM stroj s modulárním rotorem - převzato z [14]

FSPM stroje jsou zkoumány pro aplikace v oblastech s požadavkem na vysokou provozní spolehlivost v tzv. Fault-Tolerant systémech. Stroj musí správně fungovat i při poruše části zařízení, v případě FSPM stroje vinutí. Pro tyto aplikace se uvažují Multi Tooth - FSPM stroje, které mají vedle zubů nesoucích vinutí ještě pasivní zuby bez vinutí. Konkrétní příklady jsou vidět na obrázcích 3.6 a 3.7.



Obrázek 3.6: Multi Tooth FSPM motor - převzato z [15]



Obrázek 3.7: Multi Tooth FSPM motor - další druh - převzato z [16]

3.4 Výhody a nevýhody FSPM motorů

Výhodnou vlastností FSPM motorů je fakt, že mají vysokou účinnost a vysokou hustotu výkonu [15]. Velkou výhodou FSPM motorů je jako u spínaného reluktančního motoru jednoduchý rotor bez vinutí. Odpadá tedy problém s chlazením rotorového vinutí nebo permanentních magnetů na rotoru. Stroj tak může fungovat s vysokými otáčkami, protože není nutné řešit odstředivou sílu působící na rotorové vinutí nebo permanentní magnety na rotoru. Stroje mohou pracovat i s otáčkami 50 000 ot/min [10].

Nevýhodami FSPM motorů jsou zvlnění momentové charakteristiky a vysoká cena permanentních magnetů ze vzácných zemin (SmCo a NdFeB).

4 Návrh reluktančního motoru s permanentními magnety

4.1 Rozměry stroje, počet pólů a počet fází

Navrhovaný FSPM motor 12/10 je koncipován jako trojfázový, na každou fázi připadají čtyři protilehlé satorové zuby. Hlavní rozměry stroje jsou uzpůsobeny rozměrům permanentních magnetů. Otáčky stroje jsou uvažovány 400 otáček za minutu.

Před návrhem trojfázového FSPM motoru 12/10 byla zvažována možnost návrhu jednofázového FSPM motoru 4/2. Tento motor se vyznačuje velmi jednoduchou a robustní konstrukcí a malým počtem permanentních magnetů. Tato varianta byla však na základě provedených simulací následně zamítnuta. Hlavní nevýhodou jednofázového stroje byl problém s rozběhem stroje z určitých poloh rotoru, ve kterých nevznikal točivý moment. Pokud by takovýto motor startoval z těchto poloh, nedošlo by k jeho roztočení. Byla by nutná další technická opatření, která by tento problém vyřešila. Bylo by možné například přidat na rotor rozběhové vložky jako u konvenčních jednofázových reluktančních motorů, viz [1].

Dalším problémem jednofázového FSPM motoru je velké zvlnění momentu. Proto byla upřednostněna a zvolena konstrukčně složitější trojfázová varianta, která nemá problém s rozběhem a zvlnění momentové charakteristiky je menší.

Nakonec byly zvažovány dvě varianty trojfázového FSPM motoru: 12/10 a 12/14. Jak již bylo zmíněno dříve, byla upřednostněna varianta s dvanácti satorovými a deseti rotorovými zuby.

4.2 Magnetický obvod stroje

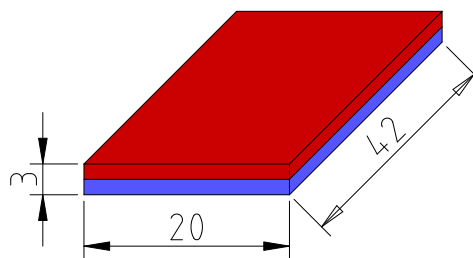
Magnetický obvod stroje (stator i rotor) je skládaný ze vzájemně izolovaných plechů k omezení ztrát v železe. Stator stroje se skládá z jednotlivých segmentů připomínajících tvar písmena C. Celková aktivní délka magnetického obvodu je dána délkou permanentního magnetu. Vzduchová mezera je zvolena 1 mm.

Vzduchová mezera má zásadní vliv na velikost magnetické indukce. Čím je vzduchová mezera menší, tím větší magnetická indukce se vybudí. Byly zvažovány dvě varianty šířky vzduchové mezery 0,5 a 1 mm. Vzduchová mezera 1 mm se jeví jako výhodnější jak z hlediska sycení, tak z hlediska konstrukčního.

Kompletní rozměry magnetického obvodu jsou ve výkresu v Příloze.

4.3 Zvolené permanentní magnety

Pro své vlastnosti jsou zvoleny permanentní magnety NdFeB (typ N35H) s remanentní indukcí 1,2 T. Počet permanentních magnetů se rovná počtu statorových pólů, tzn. 12. Rozměry a směr magnetování je naznačen na Obrázku 4.1. Curieova teplota je 310 °C a maximální provozní teplota do 120 °C. Koercitivita je větší než 876 kA/m a vnitřní koercitivita je větší než 1353 kA/m. Energetický součín $B \cdot H_{\max}$ je 263-287 kJ/m. Přídržná síla je přibližně 5,5 kg. Váha magnetu je 18,9 g. Antikorozní povrchová ochrana je třívrstvá - Nikl + Měď + Nikl [17].



Obrázek 4.1: Rozměry zvolených permanentních magnetů

4.4 Vinutí stroje

Vinutí stroje musí být navrženo tak, aby vybudilo dostatečný magnetický tok. U navrhovaného druhu motoru je nezbytné určit způsob spínání statorových cívek tak, aby se rotor plynule otáčel.

Problém spočívá v nalezení poloh rotoru, ve kterých se sepne následující cívka statoru. Pro správnou funkci motoru je nutné čidlo polohy a řídicí elektronika, která by řídila spínání statorových fází.

Směr otáčení stroje je úměrný sledu spínání fází a otáčky stroje jsou úměrné frekvenci spínání.

Vinutí stroje je velmi jednoduché, na každém statorovém zubu je navinuta cívka, přičemž každá fáze je tvořena čtyřmi protilehlými cívkami, viz následující kapitola. Podrobný návrh vinutí není klíčovou součástí práce, protože vinutí se musí přizpůsobit napájecímu napětí, které nebylo zadáno. Je ale proveden ilustrativní návrh vinutí pro zvolené napájecí napětí 12 V. Pro vlastní simulace to není klíčové, v simulacích se pouze nastavuje proudová hustota, která prochází oblastí vinutí.

Postup návrhu vinutí

Na základě simulace byl zjištěn celkový proud tekoucí plochou vinutí:

$$I_d = 177,1 \text{ A z. .}$$

V oblasti vinutí je uvažována proudová hustota:

$$J = 2,5 \text{ A/m}^2 \text{ .}$$

Celá plocha vinutí není vyplněna mědí, čistě v mědi je uvažována proudová hustota o velikosti:

$$J_{\text{Cu}} = 5 \text{ A/m}^2 \text{ .}$$

Na základě simulací je určen průměrná velikost momentu:

$$M = 0,5 \text{ Nm .}$$

Zvolené jsou otáčky:

$$n = 400 \text{ ot/min .}$$

Pro výkon stroje platí relace:

$$P = M \cdot \omega = 0,5 \cdot \frac{\pi \cdot 400}{30} = 21 \text{ W .}$$

Při napájecím napětí:

$$U_n = 12 \text{ V .}$$

Vychází proud vodičem:

$$I = \frac{P}{U_n} = \frac{21}{12} = 1,75 \text{ A .}$$

Průřez vodiče vychází:

$$S_{\text{Cu}} = \frac{I}{J_{\text{Cu}}} = \frac{1,75}{5} = 0,35 \text{ mm}^2 = \pi \cdot r^2 \text{ .}$$

Poloměr vodiče:

$$r = \sqrt{\frac{S}{\pi}} = 0,33 \text{ mm .}$$

Průměr vodiče je tedy:

$$d_{\text{Cu}} = 0,67 \text{ mm .}$$

Počet závitů se určí ze vztahu:

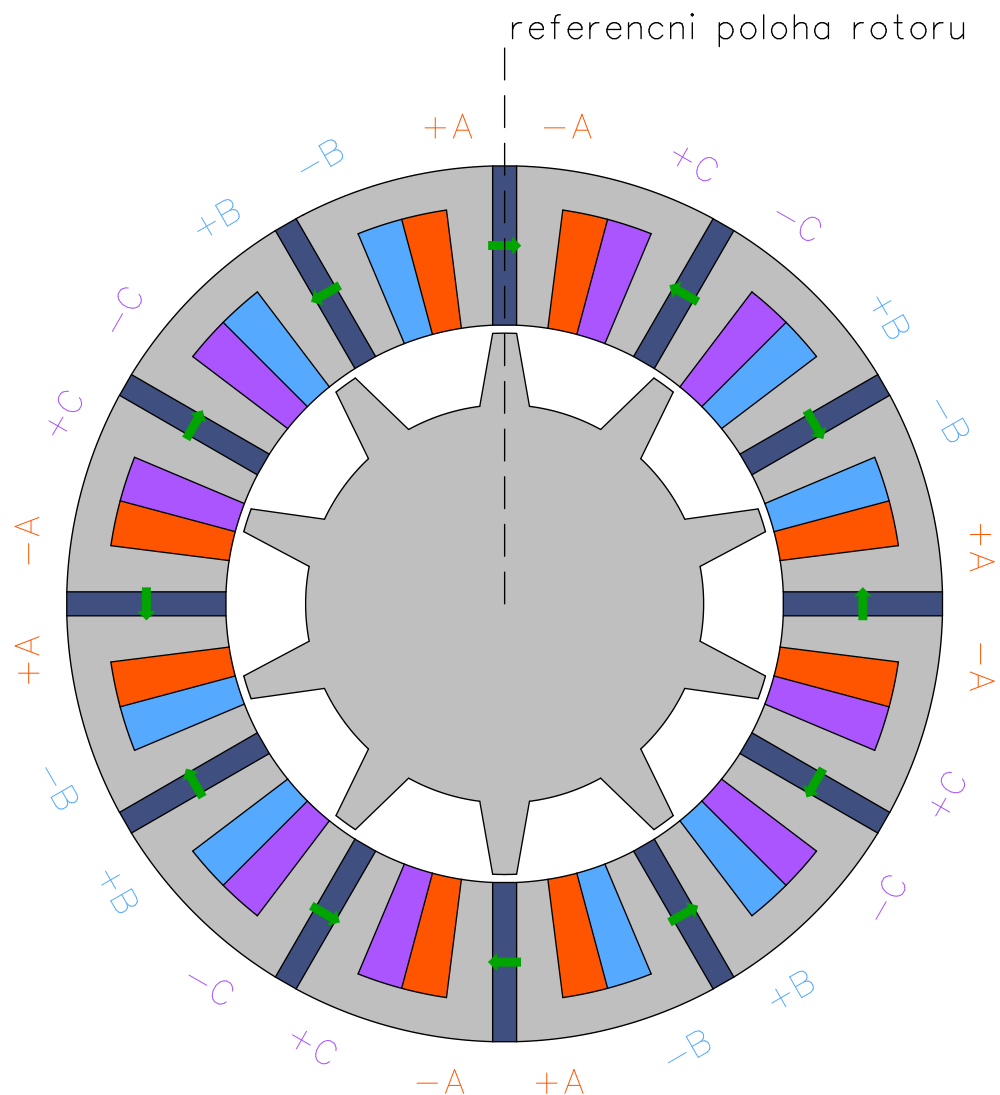
$$N_z = \frac{I_d}{I} = \frac{177,1}{1,75} = 101 \text{ .}$$

4.5 Uspořádání navrženého stroje

Nákres v této podkapitole je ilustrativní a slouží k pochopení uspořádání stroje. Okótovaný nákres stroje je uveden v Příloze.

Vinutí stroje je rozděleno do tří fází: A (oranžová), B (modrá), C (fialová). V chodu je současně buzena vždy jedna fáze. Zelené šipky ukazují orientaci permanentních magnetů.

V následujících kapitolách se pracuje s úhlem natočení rotoru. Na obrázku 4.2 je definována referenční poloha rotoru, tzn. 0° .



Obrázek 4.2: Uspořádání navrženého FSPM stroje

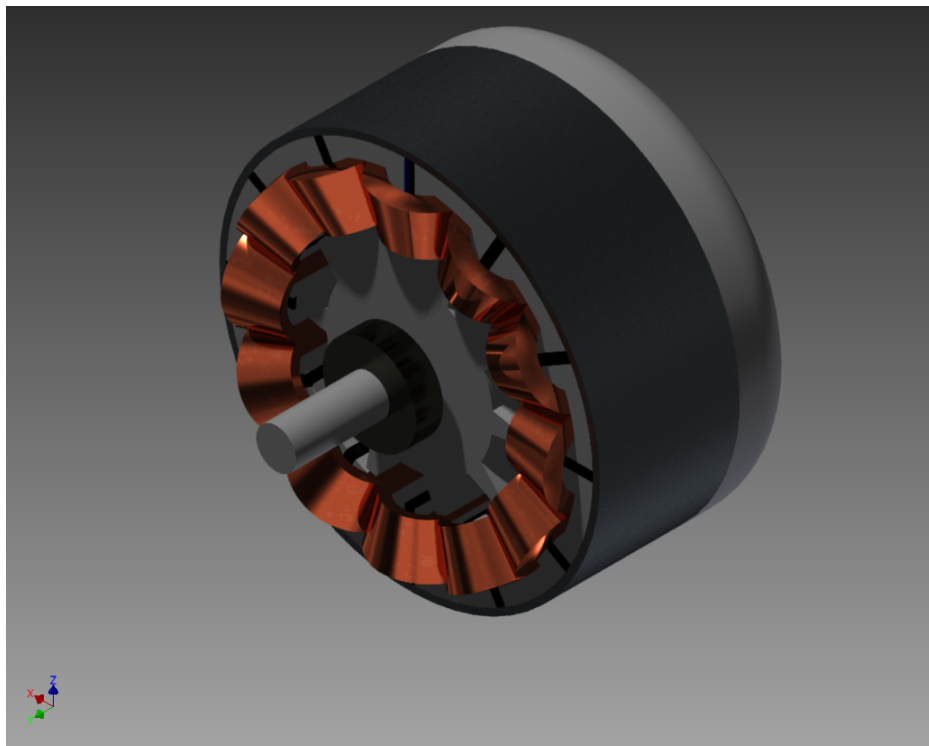
Shrnutí rozměrů stroje

Následující tabulka stručně shrnuje hlavní rozměry stroje.

počet fází	3
počet pólů statoru N_S	12
počet pólů rotoru N_R	10
vnější průměr statoru	110 mm
vnitřní průměr statoru	35 mm
vnější průměr rotoru	34 mm
vzduchová mezera	1 mm
výška statorového zuby	15 mm
šířka statorového zuby	11 mm
výška rotorového zuby	9 mm
šířka rotorového zuby	3 mm
šířka permanentního magnetu	3 mm
výška permanentního magnetu	20 mm
aktivní délka stroje	42 mm

Tabulka 4.1: Hlavní rozměry a parametry stroje

4.6 3D Model stroje



Obrázek 4.3: 3D model navrženého FSPM stroje

5 Počítačové modelování reluktančního motoru s permanentními magnety

5.1 Popis programu Agros2D

Program Agros2D slouží k modelování fyzikálních polí, například elektrostatického, elektrického proudového, magnetického, teplotního atd. K řešení parciálních diferenciálních rovnic využívá program Agros2D metodu konečných prvků (MKP, angl. FEM).

Program je aktivně vyvíjen na Katedře teoretické elektrotechniky na Západočeské univerzitě v Plzni a je volně ke stažení na oficiálních stránkách <http://www.agros2d.org>.

V současné době se připravuje nová verze programu s vylepšeným uživatelským rozhraním a novou funkcionalitou (řešení slabě a silně sdužených úloh, nelineární výpočty atd.) [18].

Program se skládá ze tří částí:

- Pre-processor - slouží k definici geometrie a nastavení oblastí a okrajových podmínek.
- Procesor - výpočetní část programu
- Post-processor - vizualizace vypočtených výsledků

Mezi hlavní výhody programu patří:

- možnost zapnutí *hp*-adaptivity
- možnost psaní skriptů v programovacím jazyku Python
- program je multiplatformní (Windows, Linux, MacOS)

Program Agros2D byl zvolen kvůli použití metody konečných prvků vyšších řádů přesnosti, snadné dostupnosti a jednoduchému skriptování v jazyce Python.

5.2 Popis řešené fyzikální úlohy

Řešená fyzikální úloha je analýza ustáleného magnetického pole uvnitř elektrického stroje. Parciální diferenciální rovnice je řešena numericky jako okrajová úloha pro potenciály pomocí metody konečných prvků vyšších řádů přesnosti v programu Agros2D.

Řešená parciální diferenciální rovnice má obecný tvar:

$$\operatorname{rot}\left(\frac{1}{\mu}(\operatorname{rot}(\mathbf{A} - \mathbf{B}_r))\right) - \gamma \cdot \mathbf{v} \times \operatorname{rot}\mathbf{A} = \mathbf{J}_{\text{ext}} . \quad (5.1)$$

Počítá se se dvěma hlavními zjednodušeními:

1. dvourozměrný model v kartézských souřadnicích (2D x-y),
2. linearizace magnetického obvodu stroje.

Kvůli uvažování lineárního magnetického obvodu stroje je možné moment stroje se určit z již dříve zmíněné rovnice:

$$M = \frac{\partial W_{\text{mg}}}{\partial \vartheta} . \quad (5.2)$$

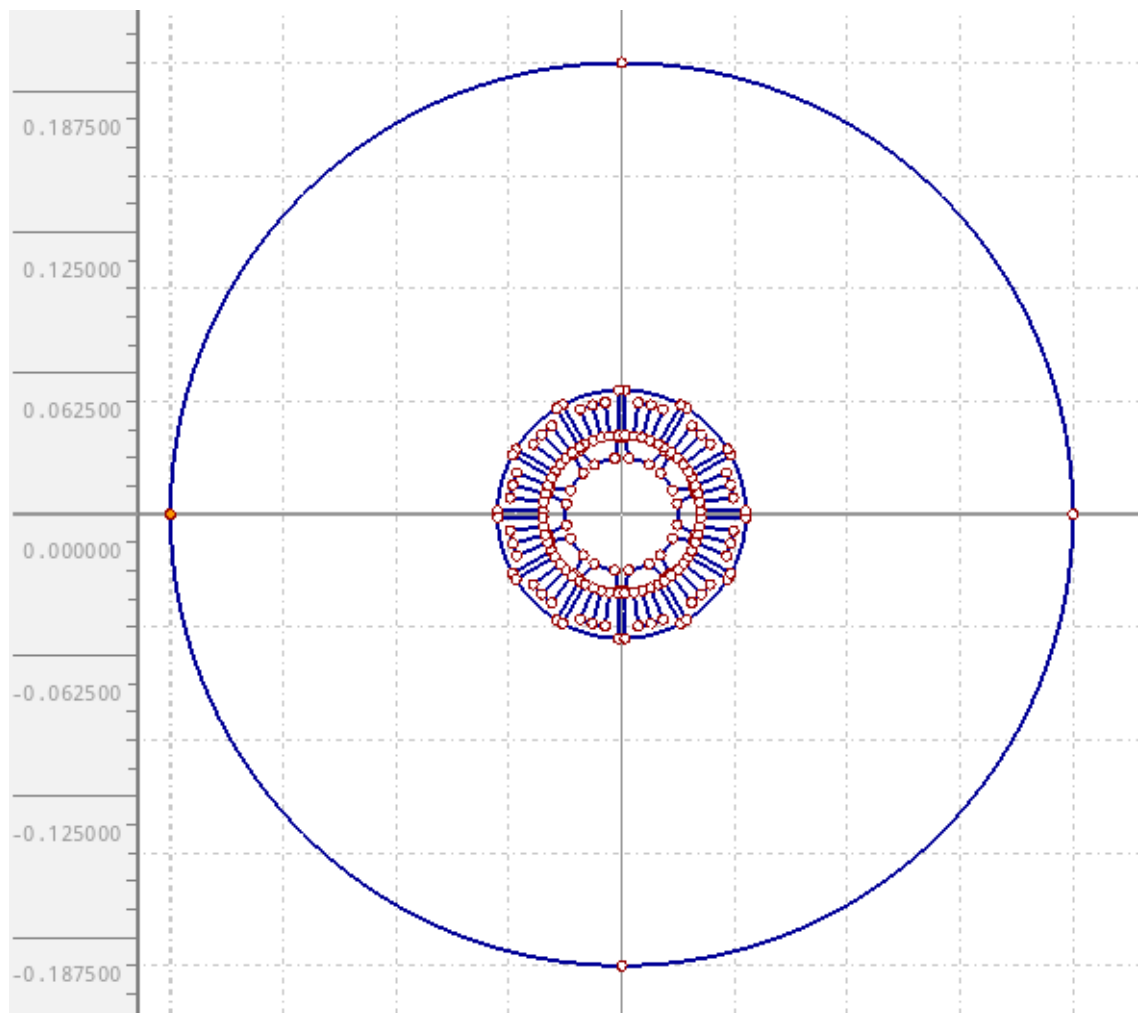
Aby bylo možné řešit rovnici 5.1, musí se jednoznačně definovat simulovaná fyzikální úloha, tzn. geometrie řešeného stroje, přiřadit materiálové vlastnosti jednotlivým oblastem, určit okrajové podmínky a podmínky na rozhraní, viz následující kapitola.

Velký vliv na výpočty pomocí MKP má výpočetní síť a řád polynomu aproximační funkce.

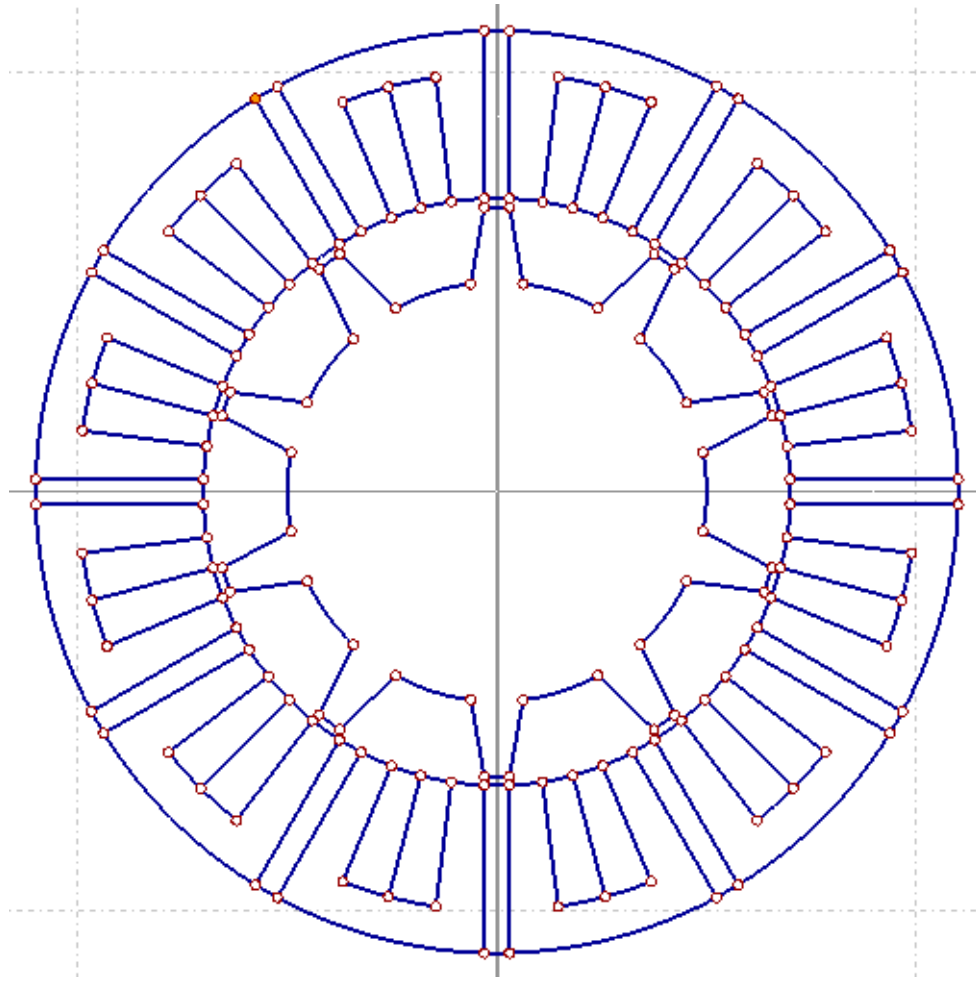
5.3 Definice problému

5.3.1 Řešená geometrie motoru

Vzhledem ke složitosti simulovaného motoru je geometrie stroje vytvořena v externím CAD programu a do programu Agros2D naimportována ve výměnném formátu DXF. Každé křivce naimportované geometrie je přiřazeno číslo. Důležité je zjistit čísla křivek, ze kterých se skládá rotor, protože tyto křivky jsou otáčeny. Na obrázcích 5.1 a 5.2 je k vidění naimportovaná geometrie stroje v programu Agros2D. Kružnice kolem motoru omezuje okolní oblast.



Obrázek 5.1: Řešená geometrie v programu Agros2D



Obrázek 5.2: Detail řešené geometrie v programu Agros2D

5.3.2 Okrajová podmínka a podmínky na rozhraní

Pro jednoznačné řešení rovnice (5.1) se musí definovat okrajová podmínka a podmínky na rozhraní.

Na kružnici omezuující okolí stroje platí okrajová podmínka 1. druhu (Dirichletova) pro magnetický potenciál:

$$\mathbf{A}_z = 0 \text{ Wb} \cdot \text{m}^{-1} . \quad (5.3)$$

Bylo vyzkoušeno, že okolní oblast (kružnice) s poloměrem větším než 0,2 m neměla vliv na přesnost výpočtu magnetické energie ve vzduchové mezeře.

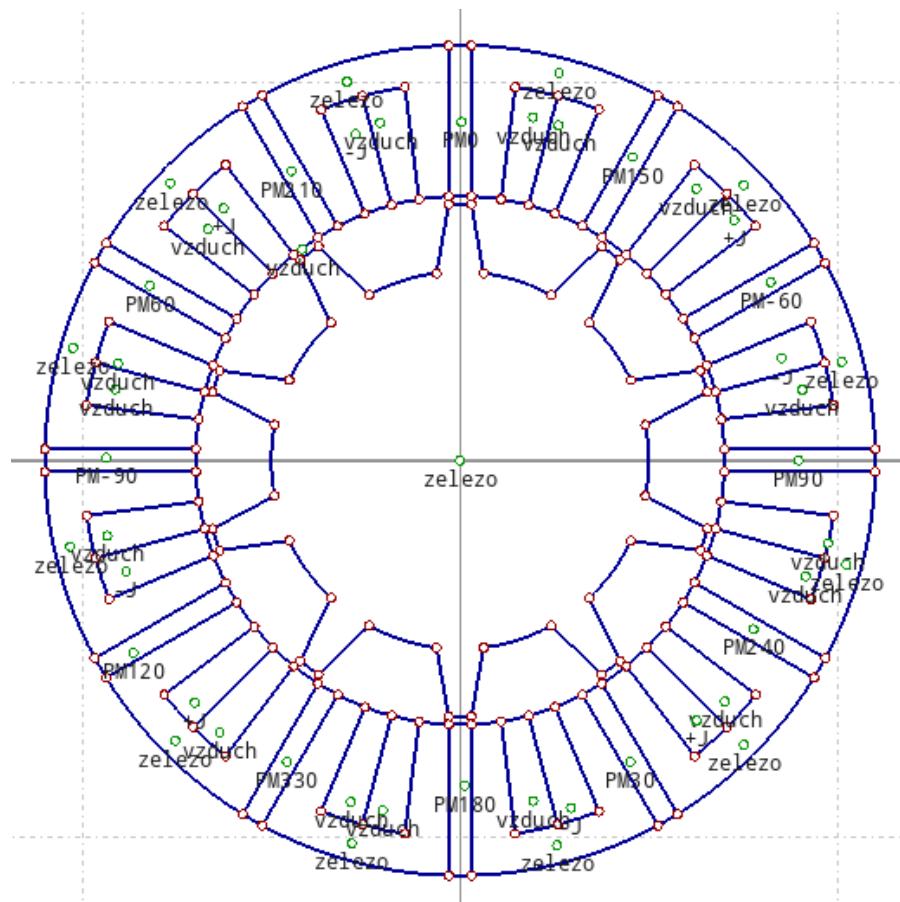
Podmínky na rozhraní jsou při použití metody konečných prvků programem Agros2D automaticky splněny, není nutné je definovat.

5.3.3 Definované oblasti a materiály

Každá uzavřená oblast modelu musí mít přiřazenou oblast definující materiálové parametry. Oblasti jsou: vzduch (vzduchová mezera, neaktivní vinutí, okolí), železo (magnetický obvod statoru, rotor) a permanentní magnety (u každého úhlem definován směr remanentní indukce). Oblastí s permanentními magnety je celkem 12. Každá oblast s PM má jiný úhel orientace remanentní indukce B_r dle obrázku 4.2. Vně stroje je vzduch.

vzduch	$\mu_r = 1$
železo	$\mu_r = 1000$
vinutí napájené +J	$\mu_r = 1$ $J = 2,5 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$
vinutí napájené -J	$\mu_r = 1$ $J = -2,5 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$
permanentní magnety	$\mu_r = 1,05$ $B_r = 1,2 \text{ T}$

Tabulka 5.1: Materiálové vlastnosti

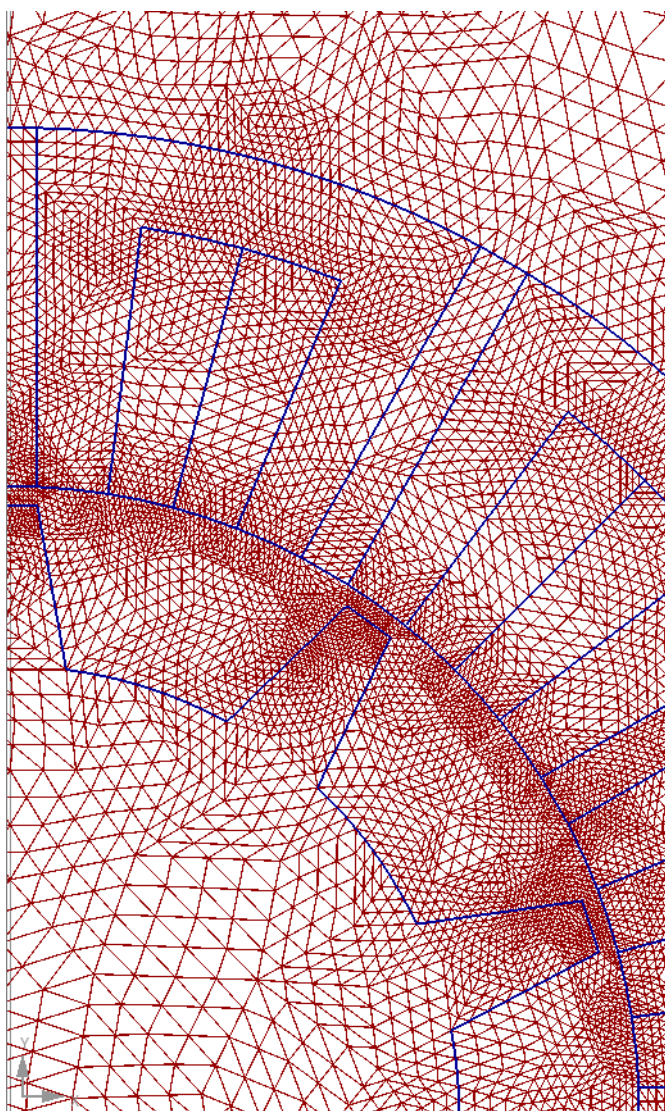


Obrázek 5.3: Oblasti a přiřazené materiály - nabuzena fáze B

5.3.4 Řešená výpočetní síť a řád polynomu aproximační funkce

Zasíťování MKP modelu je provedeno dvakrát zjemněnou trojúhelníkovou sítí. Celkový počet uzlů je 125 000.

Síť je nejhustší ve vzduchové mezeře, kde je požadována nejvyšší přesnost výpočtu kvůli určení velikosti energie magnetického pole.



Obrázek 5.4: Ukázka výpočetní sítě - výřez

Na elementech sítě je parciální diferenciální rovnice aproximována polynomem třetího řádu. Pro výpočet pole by bylo výhodné použít *hp*-adaptivitu, ta ale nemohla být použita vzhledem k hardwaru počítače použitého k výpočtům.

5.4 Postup simulace

Elektromagnetické pole je počítáno pro různé úhly pootočení rotoru vůči referenční poloze definované v předchozí kapitole. Statický moment stroje je počítán z magnetické energie koncentrované ve vzduchové mezeře.

K tomuto účelu je napsán skript v jazyce Python, který provede výpočet energie magnetického pole (objemovým integrálem z hustoty energie ve vzduchové mezeře, vztaženo na 1 m délky), uloží dílčí výsledek a následně provede rotaci rotoru o nastavený úhel, konkrétně o 1° po směru hodinových ručiček, a takto pokračuje až do úhlu 359° .

Tento postup bylo nutné opakovat celkem pětkrát. Tři výpočty pro nabuzené jednotlivé fáze, poté bez nabuzeného vinutí a na závěr simulace s přepínáním fází.

Všechna získaná data byla následně zpracována v tabulkovém procesoru, šlo především o tři úkony: výpočet derivace, přepočítání na aktivní délku stroje 42 mm a přepočítání ze stupňů na radiány.

Postup simulace v bodech:

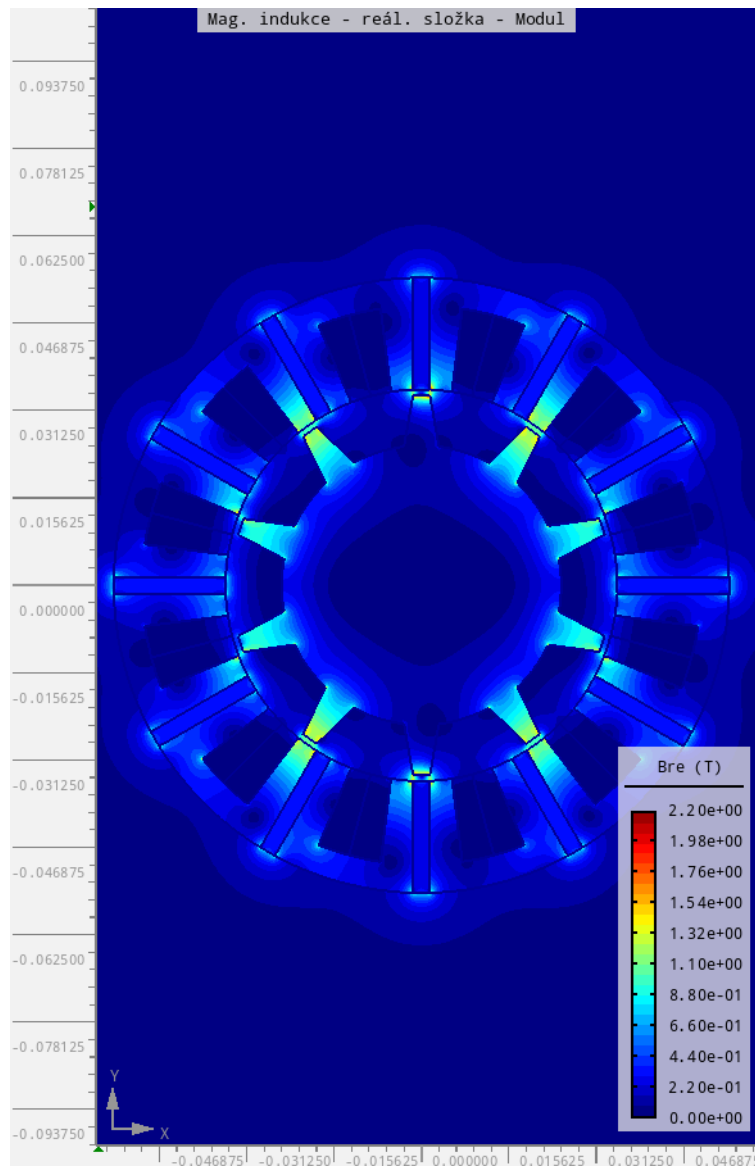
1. definice problému v programu Agros2D
2. spuštění výpočtu magnetické energie ve vzduchové mezeře stroje (vztaženo na 1 m aktivní délky stroje) pro aktuální natočení rotoru
3. uložení výsledků
4. pootočení rotoru o 1 stupeň a spuštění výpočtu pro novou polohu rotoru
5. po skončení všech výpočtů energie: výpočet momentu z energie v tabulkovém procesoru
6. vizualizace výsledků

Z výsledků simulace je důležité rozložení magnetické indukce B , pro názornost je vhodné nechat program vykreslit siločáry magnetického pole. Zajímá nás také rozložení hustoty magnetické energie.

6 Výsledky simulace

6.1 Rozložení magnetické indukce

V elektrických strojích je nejsledovanější veličinou magnetická indukce B .

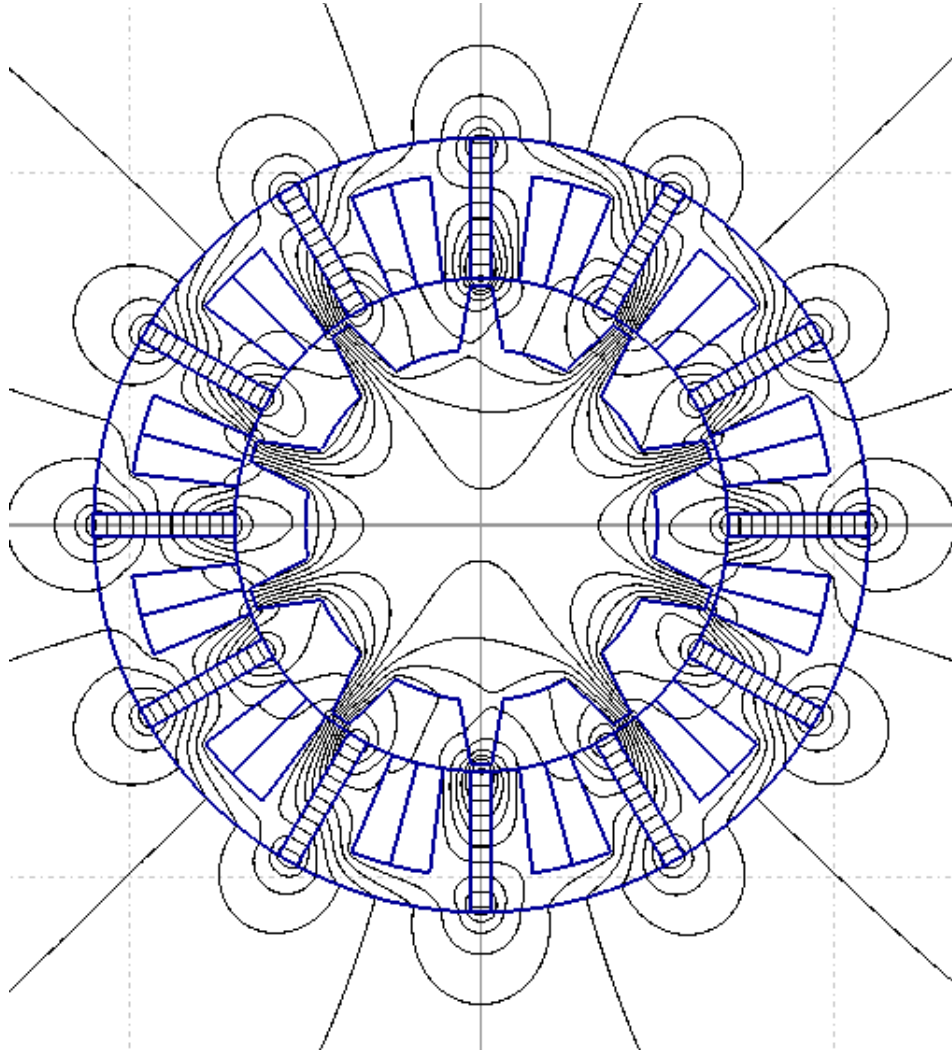


Obrázek 6.1: Rozložení magnetické indukce B pro počáteční polohu rotoru

Na obrázku 6.1 je vidět, že ve stroji je největší indukce v rotorových zubech. V těchto částech stroje se železo blíží nasycení magnetického obvodu. Indukce ve vzduchové mezeře je přibližně 1 T.

6.2 Rozložení siločar magnetického pole

Rozložení siločar magnetického pole umožňuje si udělat rychlý přehled o silovém působení.

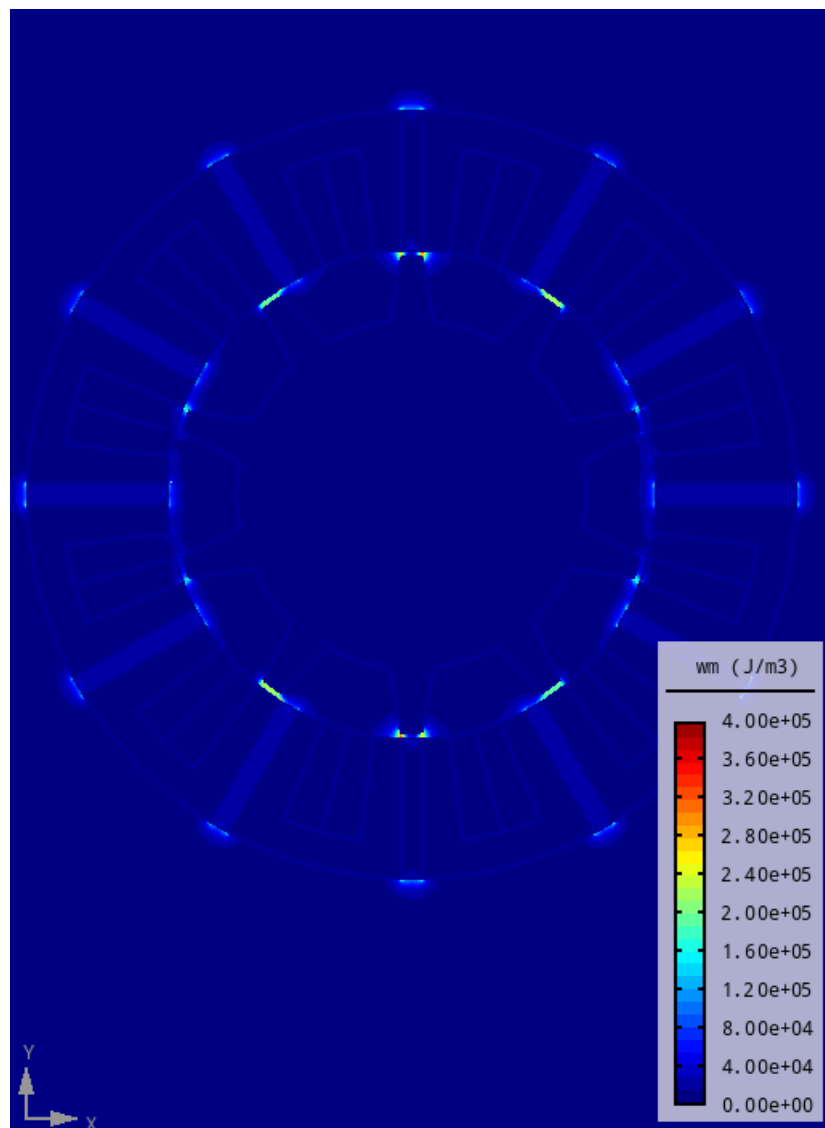


Obrázek 6.2: Rozložení siločar pro počáteční polohu rotoru a nabuzenou fázi B

Na obrázku 6.2 jsou vykresleny siločáry magnetického pole, které se uzavírají nejen přes vzduchovou mezeru, ale také vně stroje. Žádoucí je, aby byly siločáry pouze uvnitř stroje. Stroj se vyznačuje rozptylem magnetického pole do okolního vzduchu.

V místech, kde jsou siločáry nejvíce nahuštěny, prochází největší magnetický tok. Točivý moment vzniká, protože se siločáry v některých zubech „snaží narovnat“.

6.3 Rozložení hustoty energie magnetického pole



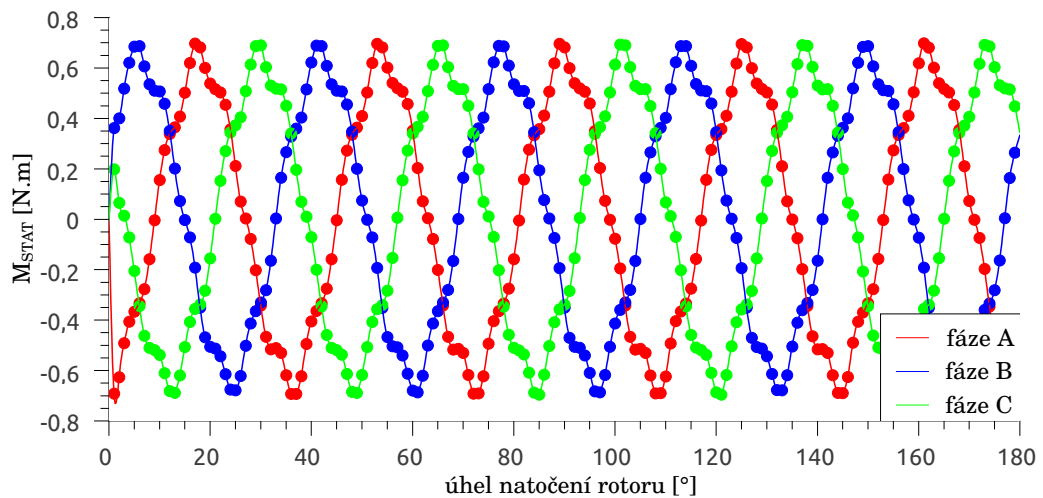
Obrázek 6.3: Rozložení hustoty energie magnetického pole pro počáteční polohu rotoru a nabuzenou fázi B

Z obrázku 6.3 je zřejmé, že hustota magnetické energie je dle předpokladů koncentrována ve vzduchové mezeře stroje. Z hustoty energie magnetického pole se objemovým integrálem výpočte velikost magnetické energie. Energie akumulovaná ve vzduchové mezeře se podílí na elektromechanické přeměně.

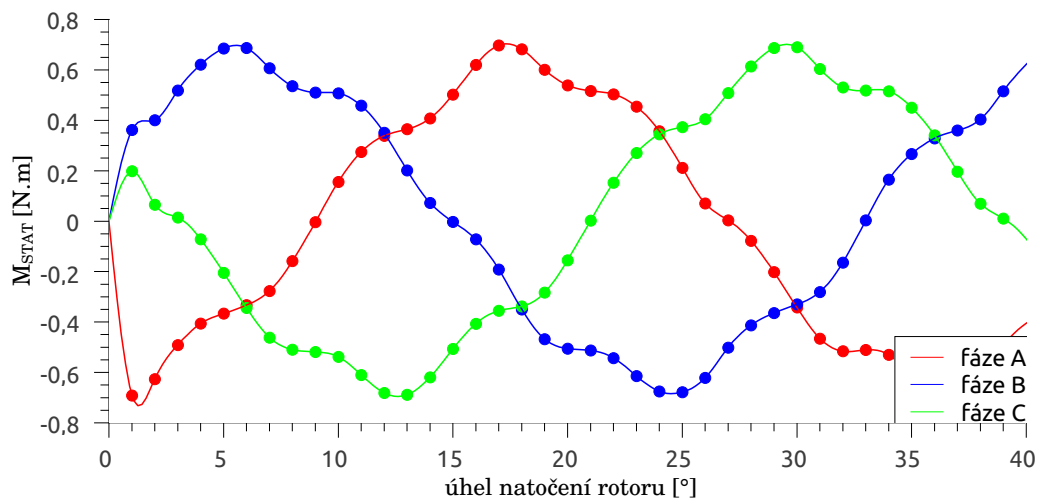
6.4 Závislost statického momentu na úhlu natočení rotoru

Na obrázku 6.4 je vykreslena závislost statického momentu na úhlu natočení pro všechny tři fáze. Na první pohled je vidět, že křivka momentu je zvlněná. Ve skutečnosti by se to projevilo vibracemi a hlučností motoru.

Zajímavými body jsou průsečíky křivek. V těchto bodech se musí přepnout fáze stroje, aby byl moment kladný. Graf je vykreslen pouze pro úhly 0° až 180° , poté by se znovu opakoval.

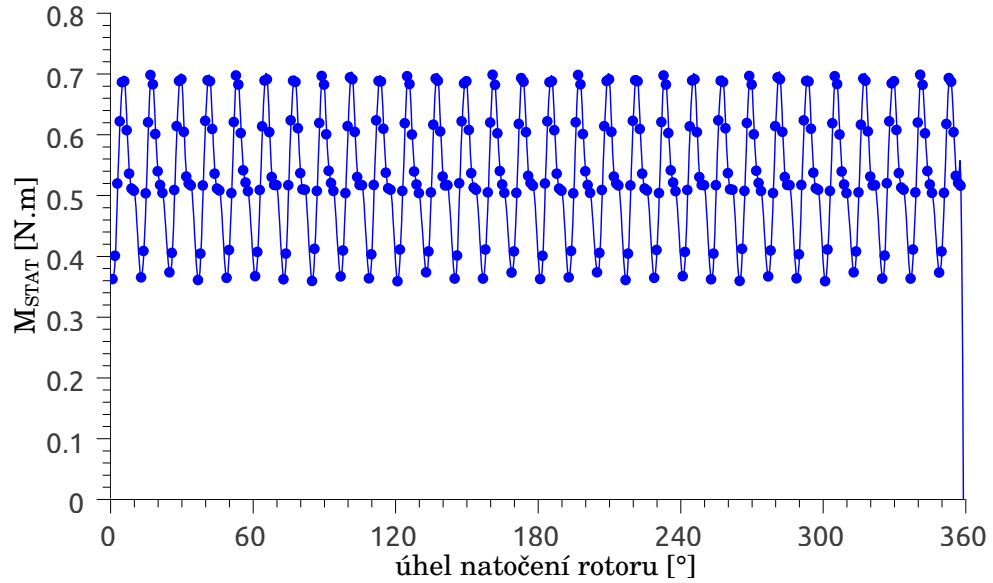


Obrázek 6.4: Průběh statického momentu jednotlivých fází

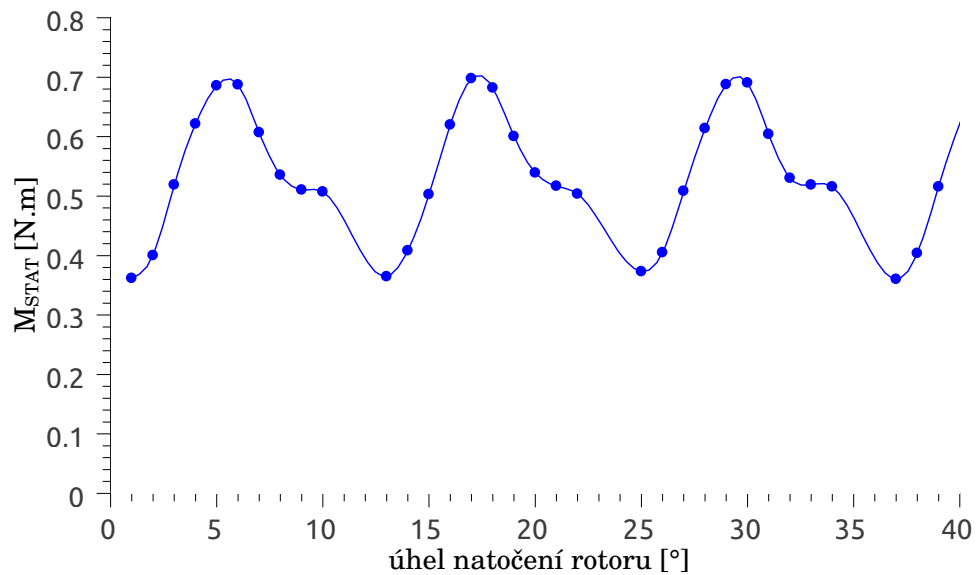


Obrázek 6.5: Průběh stat. momentu jednotlivých fází - detail k určení úhlu přepnutí fází

Z obrázku 6.5 lze odečíst úhel přepnutí z fáze B na fázi A ve 12° a z fáze A na fázi C ve 24° . Přepínání se musí opakovat po každých dvanácti stupních. Jak vypadá výsledná závislost statického momentu na natočení rotoru při přepínání fází, je vidět na obrázku 6.6 a 6.7.

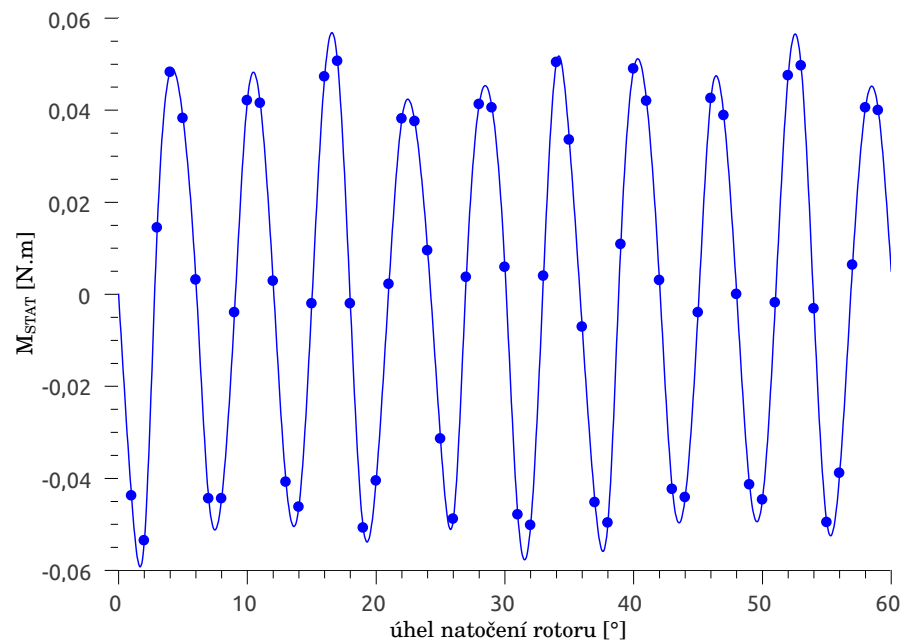


Obrázek 6.6: Výsledný průběh statického momentu s přepnutím fází



Obrázek 6.7: Detail výsledného průběhu statického momentu s přepnutím fází

Na výsledné zvlnění momentu má vliv složka momentu vyvolaná působením permanentních magnetů, která vzniká i bez nabuzených satorových cívek. Velikost a tvar momentu od permanentních magnetů je vidět na obrázku 6.8.



Obrázek 6.8: Průběh momentu od permanentních magnetů (cogging torque)

Z obrázku 6.8 je zřejmé, že moment vyvolaný permanentními magnety nestačí k trvalému otáčení motoru, protože má kladnou i zápornou hodnotu.

7 Závěr

Diplomová práce se zabývala možnostmi návrhu moderního druhu reluktančního stroje typu FSPM pomocí počítačového modelování metodou konečných prvků. Byla provedena simulace magnetického pole 12/10 Flux Switching Permanent Magnet motoru. Cílem práce bylo především ověřit princip jeho funkce a poskytnout úvod do dané problematiky. Práce může sloužit jako zdroj informací pro další zkoumání reluktančních motorů s permanentními magnety, protože v českém jazyce je na toto téma málo pramenů.

V průběhu zpracovávání diplomové práce se simulace a návrh prolínaly, protože pomocí simulací byl návrh ověřován a upravován. Výsledky konečných simulací ukazují, že točivý moment vzniká ve všech polohách rotoru, stroj se tedy rozběhne a s odpovídající řídicí elektronikou by se stroj měl plynule otáčet. Pro další práci by bylo ještě vhodné ověřit simulací vlastnosti FSPM motoru 12/14, případně vyzkoušet i další počty statorových a rotorových zubů.

Problematika navrženého FSPM motoru vyžaduje další zkoumání. Následným vhodným zkoumáním před vlastní realizací prototypu by bylo vytvoření dynamického modelu stroje a vymyšlení řídicích obvodů pro spínání statorových cívek pro požadovaný počet otáček. Pro praktickou realizaci prototypu FSPM motoru by byl dále nutný podrobný návrh stroje z mechanického hlediska, tzn. volba vhodných ložisek a způsob stažení statorových plechů. Z hlediska návrhu elektrických strojů by bylo také vhodné provést analýzu indukovaného napětí. Protože stroj pracuje v poměrně nasyceném stavu, bylo by vhodné zohlednit nelinearitu magnetického obvodu, což nebylo v současné verzi programu Agros2D možné.

Další práce by spočívala ve vylepšení současného motoru. Dalším počítačovým modelováním by chtělo vyzkoušet vliv dalších konstrukčních prvků na magnetické pole ve stroji. Zajímavě vypadají Multi-Tooth FSPM, kde jsou přítomny další pasivní statorové zuby, které nenesou vinutí ani PM, pouze se přes ně uzavírá magnetický tok. Pro snížení zvlnění momentu by bylo možné vyvrtat drážky do rotorových zubů. Tato opatření jsou rozepsána v kapitole 3.

Na závěr bych rád dodal, že reluktanční stroje, ať už s permanentními magnety, nebo bez, jsou zajímavým druhem elektrických strojů, které pro své výhodné vlastnosti nacházejí uplatnění v různých průmyslových odvětvích.

Seznam použité literatury

- [1] HRABOVCOVÁ, Valéria, Ladislav JANOUŠEK, Pavol RAFAJDUS a Miroslav LIČKO. *Moderné elektrické stroje*. Žilina: Žilinská univerzita, 2001. ISBN 80-7100-809-5.
- [2] FITZGERALD, A. E., Charles KINGSLEY a Stephen D UMANS. *Electric machinery*. 6th ed. Boston, Mass.: McGraw-Hill, 2003, xv, 688 p. ISBN 00-711-2193-5.
- [3] BARTOŠ, Václav, Josef ČERVENÝ, Josef HRUŠKA, Anna KOTLANOVÁ a Bohumil SKALA. *Elektrické stroje*. 1. vydání. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2006. ISBN 80-7043-444-9.
- [4] BARTOŠ, Václav. *Teorie elektrických strojů*. 1. vydání. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2009. ISBN 978-80-7043-509-0.
- [5] DIRENZO, Michael T. *Switched Reluctance Motor Control: Basic Operation and Example Using the TMS320F240*. In: [online]. 2000 [cit. 2012-08-26]. Dostupné z: www.ti.com/lit/an/spra420a/spra420a.pdf
- [6] *Přehledová studie reluktančních motorů*. Elektro: odborný časopis pro elektrotechniku. Praha: FCC PUBLIC s. r. o., 2006, č. 3, s. 4-9. ISSN 1210-0889. Dostupné z: www.odbornecasopisy.cz/download/el030604.pdf
- [7] BIANCHI, Nicola. *Electrical machine analysis using finite elements*. Boca Raton, FL: Talor, c2005, 275 p. ISBN 08-493-3399-7.
- [8] FLAJTINGR, Jiří a Lumír KULE. *Elektrické pohony se střídavými motory a polovodičovými měniči*. 2., upr. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2005, 142 s. ISBN 80-704-3354-X.
- [9] SKVARENINA, Timothy L. *The power electronics handbook*. Boca Raton, Fla.: CRC Press, c2002, 1 v. (various pagings). ISBN 08-493-7336-0.
- [10] ILHAN, E. *Hybrid Analytical Model for Flux Switching Permanent Magnet Machines*. Eindhoven, 2009. GRADUATION SYMPOSIUM. Eindhoven University of Technology.
- [11] ROTEVATN, Njål. *Design and testing of Flux Switched Permanent Magnet (FSPM) Machines*. Trondheim, 2009. Master of Science in Energy and Environment. Norwegian University of Science and Technology, Department of Electrical Power Engineering. Vedoucí práce Robert Nilssen

- [12] Anyuan Chen; Nilssen, R.; Nysveen, A.; , "Analytical design of a high-torque flux-switching permanent magnet machine by a simplified lumped parameter magnetic circuit model," *Electrical Machines (ICEM)*, 2010 XIX International Conference on, vol., no., pp.1-6, 6-8 Sept. 2010
doi: 10.1109/ICELMACH.2010.5607710
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5607710&isnumber=5607489>
- [13] Daohan Wang; Xiuhe Wang; Sang-Yong Jung; , "Reduction on Cogging Torque in Flux-Switching Permanent Magnet Machine by Teeth Notching Schemes," *Magnetics, IEEE Transactions on*, vol.48, no.11, pp.4228-4231, Nov. 2012
doi: 10.1109/TMAG.2012.2200237
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6332583&isnumber=6332554>
- [14] Thomas, A.S.; Zhu, Z.Q.; Wu, L.J.; , "Novel Modular-Rotor Switched-Flux Permanent Magnet Machines," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol.48, no.6, pp.2249-2258, Nov.-Dec. 2012
doi: 10.1109/TIA.2012.2226860
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6341829&isnumber=6399585>
- [15] W. Zhao, M. Cheng, J. Ji, and R. Cao, "Electromagnetic analysis of a modular flux-switching permanent-magnet motor using finite-element method," *Progress In Electromagnetics Research B*, Vol. 43, 239-253, 2012. doi:10.2528/PIERB12062908
<http://www.jpier.org/pierb/pier.php?paper=12062908>
- [16] Yu Wang; Zhiquan Deng; , "A Multi-Tooth Fault-Tolerant Flux-Switching Permanent-Magnet Machine With Twisted-Rotor," *Magnetics, IEEE Transactions on*, vol.48, no.10, pp.2674-2684, Oct. 2012
doi: 10.1109/TMAG.2012.2198921
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6198353&isnumber=6308754>
- [17] *Magnet, magnety neodymové, pásky, fólie, separátory - Neomag.cz - Neodymové magnety NdFeB* [online]. c2011 [cit. 2013-03-30]. Dostupné z: <http://www.neomag.cz>
- [18] *Agros2D / An application for solution of physical fields* [online]. c2013 [cit. 2013-03-31]. Dostupné z: <http://www.agros2d.org/>

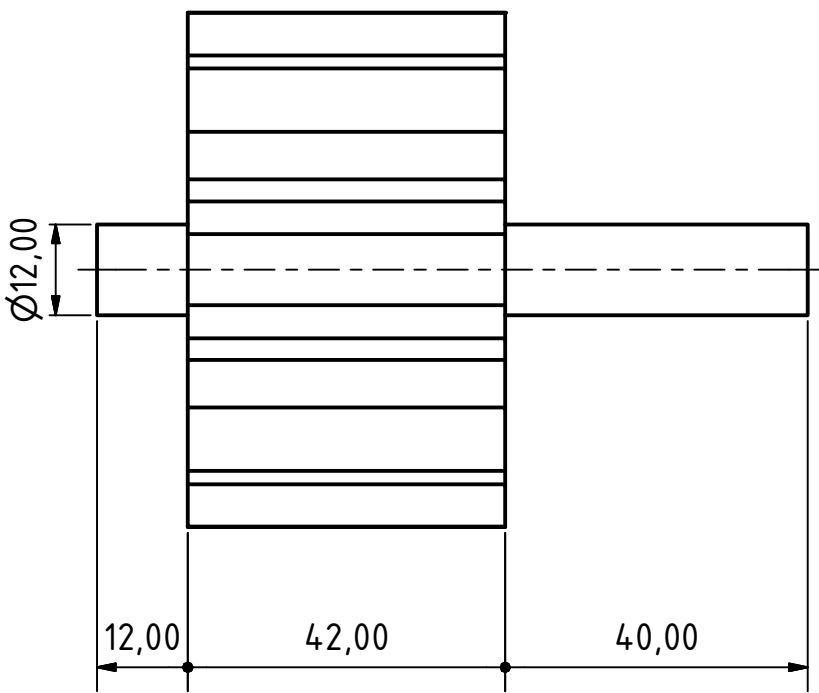
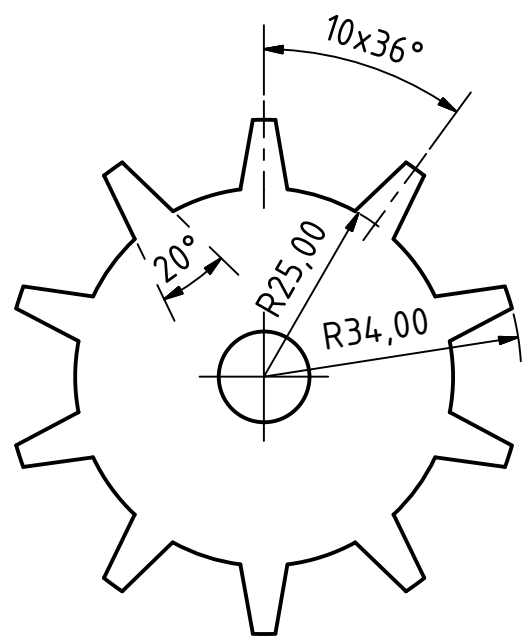
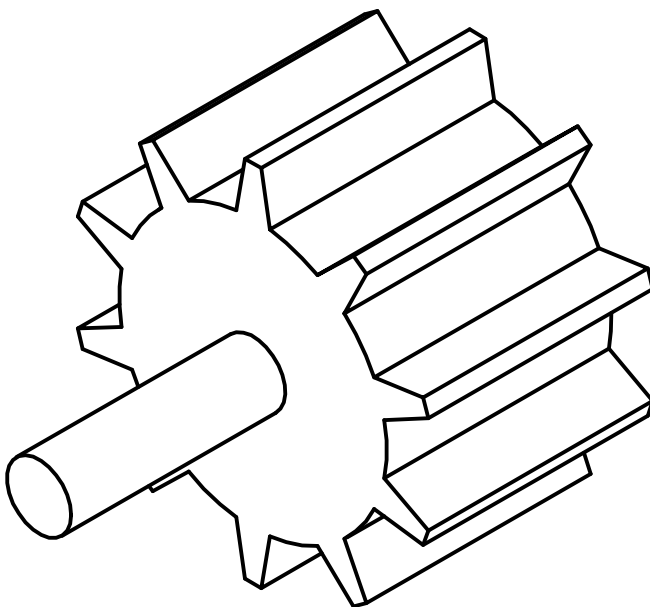
Přílohy

Seznam příloh

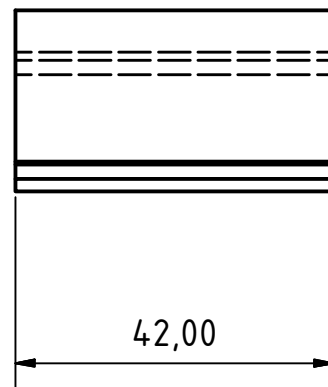
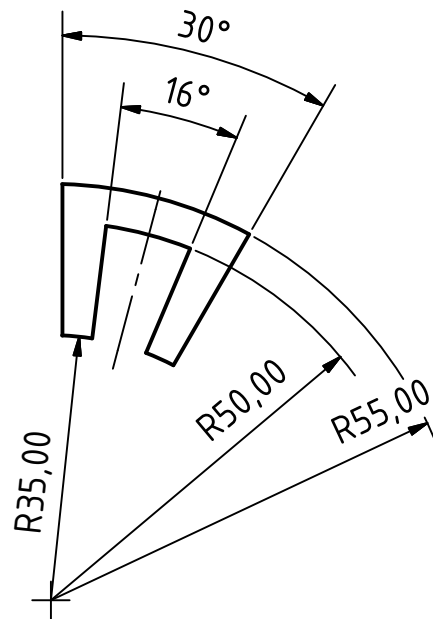
Výkres rotoru

Výkres statorového segmentu

Výkres celého stroje



				Datum	Jméno						
				Nakreslen	22.4.2013	Karel Pavlíček					
				Zkontrolován							
				Norma							
				rotor				1			
								A4			
Sřav	Změny	Datum	Jméno								



VYTVOŘENO VE VÝUKOVÉM PRODUKTU SPOLEČNOSTI AUTODESK

VYTVOŘENO VE VÝUKOVÉM PRODUKTU SPOLEČNOSTI AUTODESK

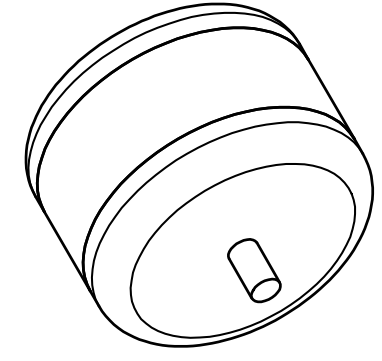
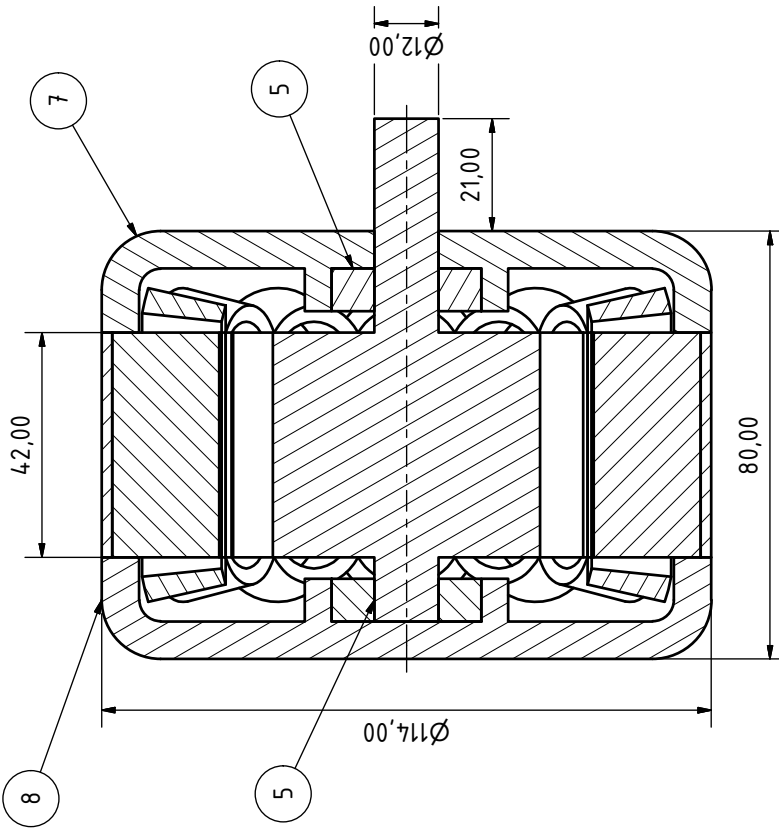
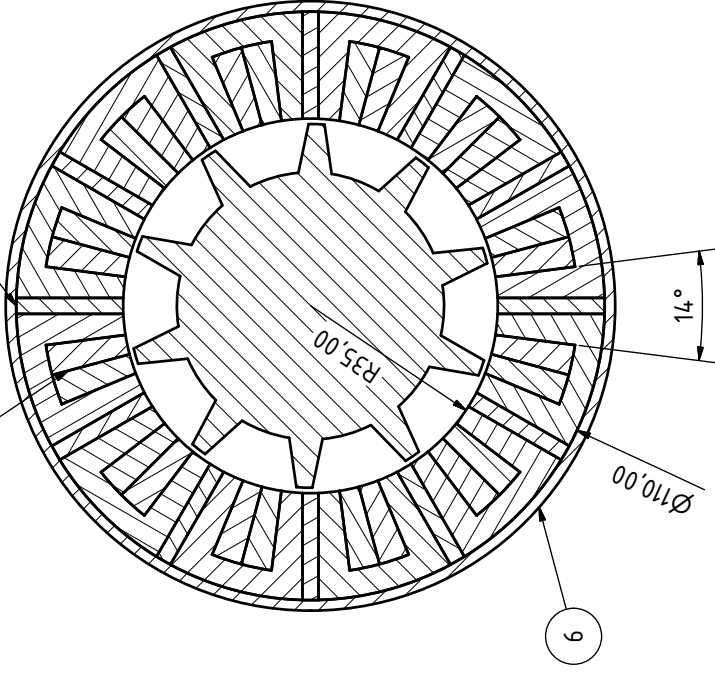
				Datum	Jméno		
				Nakreslen	20.4.2013	Karel Pavlíček	
				Zkontrolován			
				Norma			
						tvar_c	1
							A4
Stav	Změny	Datum	Jméno				

VYTVORENO VE VYUKOVEM PRODUKTU SPOLECNOSTI AUTODESK

VYTVORENO VE VYUKOVEM PRODUKTU SPOLECNOSTI AUTODESK

1 2 3 4 5 6

A B C D



KUSOVNIK		POZICE	KS	CÍSLO SOUČASTI	POPIS
		1	12	Permanenti magnet	
		2	12	Statorový segment	
		3	1	Rotor	
		4	12	Vinutí	
		5	2	Ložisko	
		6	1	Plášť statoru	
		7	1	Ložiskový štít	
		8	1	Ložiskový štít zadní	

Změny		Datum	Jméno
		22.4.2013	Karel

FSPM_12_10

2

A3

VYTVORENO VE VYUKOVEM PRODUKTU SPOLECNOSTI AUTODESK

1 2 3 4 5 6

A B C D