

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Využití speciálních druhů elektrických strojů

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **David POLÁČEK**
Osobní číslo: **E12B0045P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Název tématu: **Využití speciálních druhů elektrických strojů**
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Popište různé druhy speciálních typů elektrických strojů.
2. Uveďte jejich princip, výhody, nevýhody a možnosti využití.
3. Detailně popište princip a možnosti využití tokem přepínaného motoru s permanentními magnety (FSPM).
4. Vytvořte konečně-prvkový model a proveďte simulaci magnetického obvodu FSPM stroje.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

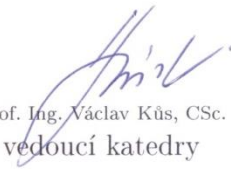
- 1. Bartoš, V.: Elektrické stroje, ZČU v Plzni, Plzeň 2004**
- 2. Internetové zdroje**

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Pavel Světlík**
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2014**
Termín odevzdání bakalářské práce: **8. června 2015**


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




Prof. Ing. Václav Kús, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce popisuje speciální druhy elektrických strojů. U každého stroje jsou stručně popsána konstrukční provedení, princip činnosti, výhody, nevýhody a praktické využití. Zvláštní pozornost je kladena na tokem přepínaný motor s permanentními magnety (FSPM). Tato část práce obsahuje simulaci magnetického obvodu FSPM stroje pomocí metody konečných prvků v programu Agros2D. V závěru práce jsou stroje vzájemně porovnány.

Klíčová slova

Stejnoseměrný bezkartáčový motor, synchronní motor, reluktanční motor, krokový motor, lineární motor, ultrazvukový motor, permanentní magnety, Flux Switching Permanent Magnet, FSPM

Abstract

The present thesis describes specific types of electric machines. For each machine are briefly described construction, principle of operation, advantages, disadvantages and practical use. Special attention is paid to the flow of switchable permanent magnet motor (FSPM). This part includes a simulation of the magnetic circuit FSPM machine using the finite element method in program Agros2D. In conclusion, the machines are compared with each other.

Key words

Brushless DC motor, synchronous motor, reluctance motor, stepper motor, linear motor, ultrasonic motor, permanent magnets, Flux Switching Permanent Magnet, FSPM

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a 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 6.6.2015

David Poláček

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Pavlu Světlíkovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	9
POUŽITÉ ZKRATKY	10
ÚVOD	11
1 STEJNOSMĚRNÉ STROJE S PM	12
1.1 Princip činnosti.....	12
1.2 Výhody a nevýhody	13
1.3 Využití.....	15
2 SYNCHRONNÍ STROJE S PM	15
2.1 Princip činnosti.....	16
2.2 Výhody a nevýhody	18
2.3 Využití.....	19
3 RELUKTANČNÍ SYNCHRONNÍ STROJE	20
3.1 Popis činnosti	20
3.2 Výhody a nevýhody	21
3.3 Využití.....	22
4 SPÍNANÉ RELUKTANČNÍ STROJE	23
4.1 Princip činnosti.....	24
4.2 Výhody a nevýhody	25
4.3 Využití.....	26
5 KROKOVÉ MOTORY	27
5.1 Princip činnosti.....	28
5.2 Výhody a nevýhody	31
5.3 Využití.....	32
6 LINEÁRNÍ MOTORY	33
6.1 Princip činnosti.....	34
6.2 Výhody a nevýhody	36
6.3 Využití.....	37
7 ULTRAZVUKOVÉ MOTORY	38
7.1 Princip činnosti.....	38
7.2 Výhody a nevýhody	39
7.3 Využití.....	40
8 ELEKTRICKÉ STROJE TYPU FLUX SWITCHING PERMANENT MAGNET	41
8.1 Princip činnosti.....	43
8.2 Výhody a nevýhody	45
8.3 Využití.....	46
8.4 Model FSPM stroje	46
9 ZÁVĚR	48
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	50
PŘÍLOHY	53

Použité zkratky

PM	Permanentní magnet
BLDC	Stejnoseměrný bezkartáčový stroj
PMSM.....	Synchronní motor s PM
RSM.....	Reluktanční synchronní stroj
ξ	Poměr synchronních reaktancí
X_d	Synchronní reaktance v ose d
X_q	Synchronní reaktance v ose q
SRM.....	Spínaný reluktanční motor
N_s	Počet zubů statoru
N_r	Počet zubů rotoru
m	Počet fází
DSPM	Doubly Salient PM Machines
FSPM	Flux Switching PM Machines
FRPM	Flux Reversal PM Machines
FCPM	Flux Controllable PM Machines
μ_r	Relativní permeabilita
J	Proudová hustota
B_r	Remanentní indukce

Úvod

Elektrické stroje se po celou dobu své historie neustále vyvíjejí. Snahou je vytvořit stroje, které by dosahovaly vyšší účinnosti, velkého momentu, vysokých otáček a dobrého řízení při malých rozměrech, nízké ceně a maximální spolehlivosti. Vzniklo tak několik druhů nových strojů. Velkou měrou k tomu přispěl vývoj výkonové elektroniky a značný rozvoj materiálů permanentních magnetů. Náhradou elektromagnetického buzení permanentními magnety a dalšími úpravami se z některých klasických pohonů vyvinuly jiné stroje. Jinde je využito reluktančního principu. Všechny stroje kombinují různé vlastnosti, což je předurčuje pro využití v rozdílných aplikacích.

Hlavním cílem této bakalářské práce je představit speciální druhy elektrických strojů. Konkrétně jejich základní provedení, princip, výhody, nevýhody a praktické využití. Větší pozornost je věnována tokem přepínanému stroji s permanentními magnety (FSPM), který je v současné době intenzivně vyvíjen. U tohoto stroje je provedena simulace magnetického obvodu v programu Agros2D.

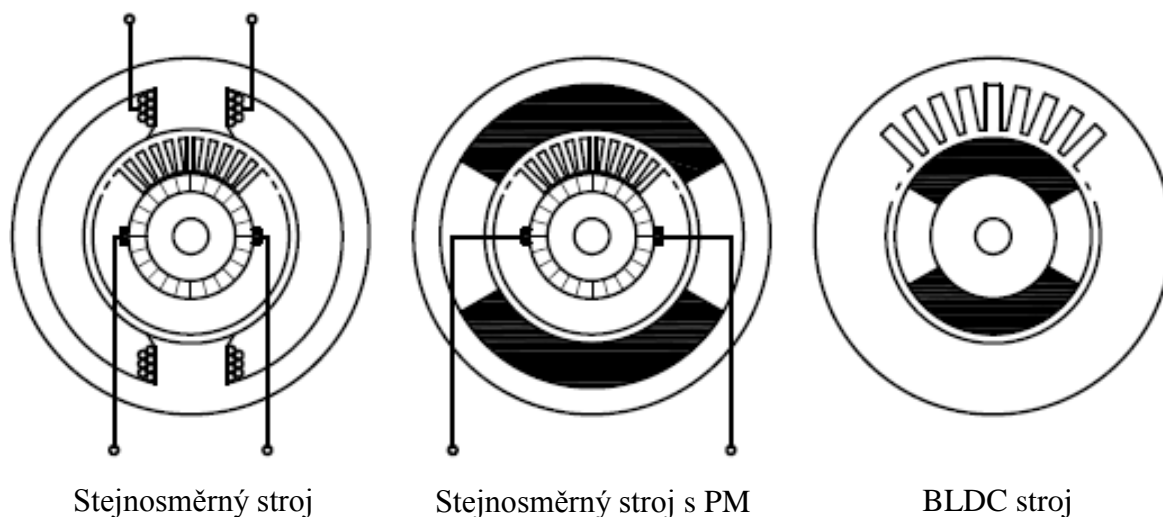
Je třeba podotknout, že práce obsahuje pouze základní druhy speciálních strojů. S ohledem na rozsah práce je jednotlivým strojům věnován jen malý prostor.

1 Stejnoseměrné stroje s PM

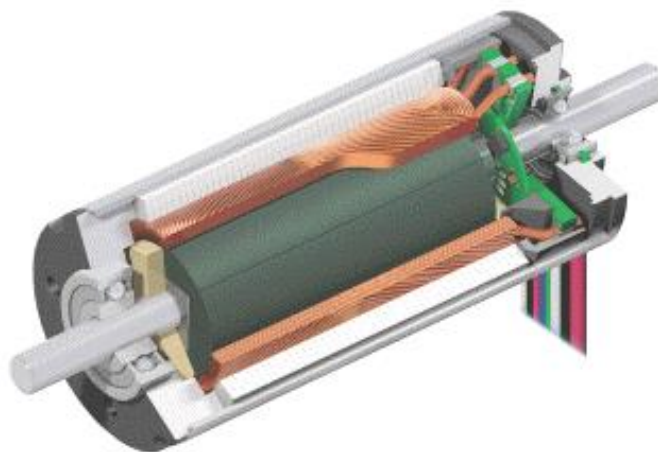
Stejnoseměrné stroje jsou historicky nejstaršími elektrickými stroji. První využití našly jako generátory pro výrobu stejnoseměrného proudu. Tyto stroje se dají všeobecně velice dobře regulovat a jejich regulační technika je snadno realizovatelná a cenově dostupná. Proto stejnoseměrné motory našly uplatnění především v elektrické trakci nebo v regulovatelných pohonech. Dynama jsou v dnešní době nahrazena polovodičovými usměrňovači a motory jsou v řadě aplikací nahrazovány jinými druhy motorů, zejména asynchronním strojem s frekvenčním měničem. V porovnání s asynchronními stroji jsou stejnoseměrné stroje konstrukčně složitější, výrobně a provozně nákladnější. Ovšem stále existují oblasti, v nichž se stejnoseměrné stroje používají pro své některé výhodné vlastnosti a charakteristiky. Konstrukční řešení s permanentními magnety (PM) zlepšuje určité parametry a odstraňuje některé nevýhody, ovšem přináší další technické nároky, ať už potřebu elektroniky, nebo nemožnost regulace buzením.

1.1 Princip činnosti

Stejnoseměrný stroj klasické konstrukce se skládá ze statoru, rotoru a komutátoru. Na statoru se nacházejí hlavní póly s pólovými nástavci, napájené stejnoseměrným budícím proudem. Ve statoru jsou také umístěny držáky kartáčů s kartáči, které dosedají na komutátor. Na rotoru je v drážkách po celém jeho obvodu umístěno stejnoseměrné vinutí. Části tohoto vinutí jsou vyvedeny na jednotlivé lamely komutátoru. Princip stejnoseměrného motoru je založen na silovém působení statického magnetického pole statoru na magnetické pole rotoru a na indukovaném napětí do pohybujících se vodičů. Komutátor zajišťuje vhodný úhel mezi magnetickým polem statoru a rotoru. Při otáčení rotoru dochází v magnetické neutrále k plynulému přepínání vodičů kartáči komutátoru. U stejnoseměrných strojů s PM je buzení nahrazeno magnetem. To umožňuje výhodné použití inverzní konstrukce, pak je rotorové vinutí umístěno na statoru a buzení je na rotoru. Mechanický komutátor tímto uspořádáním odpadá a ze stejnoseměrného stroje s PM vznikne stejnoseměrný bezkartáčový stroj (BLDC). [1]



Obrázek 1.1: Konstrukční provedení stejnosměrného stroje – podle [1]



Obrázek 1.2: 3D model BLDC stroje v řezu – převzato z [2]

1.2 Výhody a nevýhody

Obě varianty provedení mají při stejných geometrických rozměrech větší výkon a pracují s vyšší účinností. Mezi nevýhody obou strojů patří v případě použití PM ze vzácných zemin výrazně vyšší cena, nebezpečí odmagnetování PM vlivem zvýšené teploty nebo proudového rázu. Také není možno měnit buzení stroje, tím je omezena regulace rychlosti. Další nevýhodou je potřeba elektroniky, která zajišťuje elektronickou komutaci. Hlavní výhodou bezkartáčového stejnosměrného stroje je absence komutátoru. Díky tomu je spolehlivější a potřebuje menší údržbu. Použití PM umožnilo zmenšení rozměrů a zvýšení účinnosti stroje. V následujícím přehledu je stroj srovnáván s kartáčovým

stejnosemárným motorem, nicméně dobré vlastnosti si zachovává i v porovnání s indukčním motorem. Informace jsem čerpal především z těchto zdrojů [1,3].

Výhody:

- Je možno konstruovat menší a lehčí stroje
- Vyšší účinnost stroje
- Není potřeba stejnosměrný zdroj napájení pro budící vinutí
- Konstrukce bez mechanického komutátoru (BLDC)
- Větší spolehlivost (BLDC)
- Delší životnost (BLDC)
- Menší údržba (BLDC)
- Odpadá jiskření – rušení (BLDC)
- Má menší moment setrvačnosti (BLDC)
- Vyšší rozsah rychlostí (BLDC)
- Nízká úroveň hluku (BLDC)

Nevýhody:

- Vyšší pořizovací cena (závisí především na použitých PM)
- Odpadá možnost regulace buzením
- Nutnost použití řídicí elektroniky (BLDC)
- Nutnost snímání nebo určování polohy rotoru (BLDC)
- Technologicky náročnější návrh (BLDC)
- Technologicky náročnější výroba, obtížnější připevnění PM na rotor (BLDC)
- Stálá přítomnost magnetického pole v motoru, při pohybu rotoru se objevuje na svorkách napětí
- Riziko demagnetizace PM při silném proudovém nárazu
- Magnetické vlastnosti PM jsou závislé na teplotě, je tedy nutnost dobrého chlazení

1.3 Využití

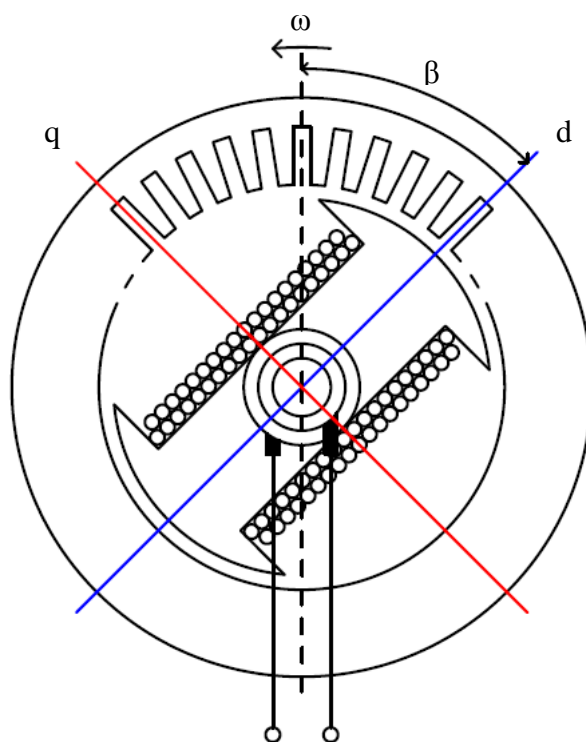
Obě provedení se vyrábí řádově od miliwattů do několika desítek až stovek kW, velikost je limitována především cenou PM. Stroje mají stejně dobré regulační vlastnosti jako klasický cize buzený stejnosměrný stroj. Jeho moment je tedy přímo úměrný napájecímu proudu. Tím, že jiskření je vyloučeno, mohou pracovat i v nebezpečných prostředích. Stejnosměrné stroje s PM na statoru slouží jako rychlostní nebo polohové servomotory. V prvním případě se jedná o přesnou regulaci rychlosti, v druhém o přesnou regulaci polohy. [4] Toho se využívá především v automatizaci. Stejnosměrné bezkartáčové motory jsou navrženy pro nízko výkonové aplikace. Nicméně složitost ovládání proměnné rychlosti chodu, vysoká cena elektronického komutátoru a PM udržuje obecně rozšířený kartáčový stejnosměrný motor. Hlavní využití BLDC motorů je v aplikacích s vysokými nároky na výkon, nízkou spotřebu energie a hlučnost. Jako například pokojové klimatizace, ledničky, vysavače, mrazničky, radiátorová čerpadla, elektrické nářadí, otvírání garážových vrat a jiné komerční aplikace. Velké rozšíření BLDC motorů najdeme také v automobilovém průmyslu.

2 Synchronní stroje s PM

Synchronní stroje jsou v dnešní době velmi využívané. Hlavní využití je v elektrárnách jako synchronní generátory, které tvoří hlavní součást napájení elektrizační soustavy. Tyto stroje jsou klasické generátory, jež mají buzení zajištěno stejnosměrným proudem. Dříve se tyto stroje nepoužívaly jako pohony z důvodu nedostatečného zajištění jejich řízení a problematickému rozběhu. V současnosti je tento problém překonán pomocí polovodičových měničů a řízení je velice efektivní. Právě to je důvod, že se synchronní stroje objevují v trakčních pohonech. Stejně tak jako u stejnosměrných strojů, tak i u synchronních strojů může být klasické buzení stejnosměrným proudem v budícím vinutí nahrazeno působením PM. Synchronní motor s PM (PMSM) je všeobecně označován jako ideální motor, protože má nejvyšší účinnost a nejmenší velikost ze všech střídavých motorů pro výkonový rozsah menší než několik kilowattů. [1, 5]

2.1 Princip činnosti

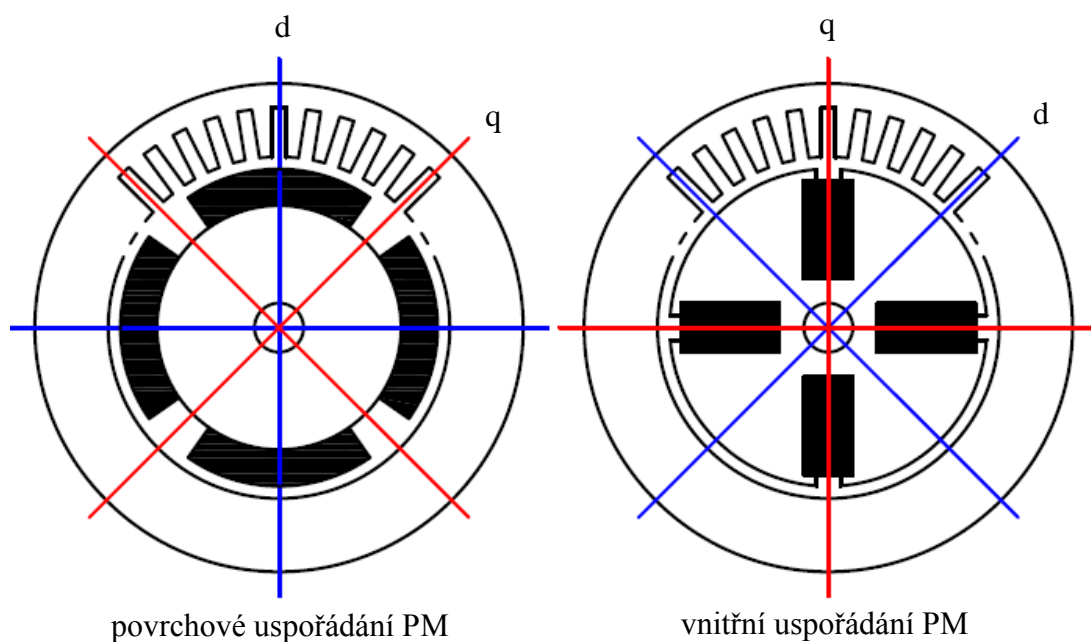
Synchronní stroj se skládá ze statoru, rotoru a kluzného kontaktu. Stator je tvořen statorovými plechy, ve kterých je uloženo nejčastěji třífázové vinutí prostorově pootočené o 120° napájené z třífázové střídavé sítě. Při průchodu elektrického proudu tímto vinutím se začne tvořit točivé magnetické pole. Rychlost otáčení tohoto pole je závislá na frekvenci a na počtu pólů stroje, označujeme ji jako synchronní rychlost. Rotor je u klasického synchronního stroje tvořen budícím vinutím napájeného stejnosměrným proudem, který je na rotor přiváděn pomocí kluzných kontaktů. [1, 6]



Obrázek 2.1: Konstrukční provedení synchronního stroje – podle [1]

U PMSM stroje je budící vinutí nahrazeno PM, tím odpadá potřeba kluzných kontaktů. Průchodem proudu budícím vinutím nebo působením PM se vytvoří na rotoru stacionární magnetické pole. Vzájemnou interakcí obou polí vznikne silové působení, tedy moment. Stroj může pracovat pouze v synchronních otáčkách. Rotor se snaží kopírovat otáčení magnetického pole statoru. V motorickém režimu zaostává magnetické pole rotoru za magnetickým polem statoru, úhel mezi těmito poli označujeme zátěžným úhlem β . Zatěžováním nebo odlehčováním motoru se nemění otáčky, mění se zátěžný úhel β . Překročením velikosti zátěžného úhlu β dojde ke změně otáček, k tzv. vypadnutí ze

synchronizmu. Rotor klasického synchronního stroje je hladký nebo s vyjádřenými póly, rotor PMSM stroje může mít více druhů provedení podle uložení PM. PM mohou být umístěny na povrchu nebo uvnitř rotoru nebo mohou být různě prostorově natočené (axiálně, radiálně, tangenciálně). Nutno dodat, že moment stroje se skládá z momentu vzájemného působení magnetických polí, ale také z momentu reluktančního, který je závislý především na způsobu provedení rotoru. U povrchového uspořádání PM bývá reluktanční moment malý, u vnitřního uspořádání větší. Čistě na reluktančním principu pracuje synchronní reluktanční stroj. O tomto stroji je pojednáváno v další části práce, kde je reluktanční moment vysvětlen. [1, 6]



Obrázek 2.2: Provedení rotorů PMSM – podle [1]

2.2 Výhody a nevýhody

Hlavní výhodou oproti klasickým synchronním strojům je absence budicího vinutí v rotoru stroje. Tím odpadá potřeba stejnosměrného zdroje pro napájení rotoru a také komplikace spojené s přívodem proudu na rotor. Dále odpadají ztráty v budicím vinutí, což pomáhá zlepšit celkovou účinnost stroje. PM také umožňují výrazné zmenšení a snížení váhy stroje. Mezi nevýhody patří vyšší cena kvůli použití PM ze vzácných zemin, problematické odbuzování a náročnější výroba. V následujícím přehledu je stroj srovnáván s klasickým synchronním strojem. Informace jsem čerpal především z těchto zdrojů [1, 7, 8].

Výhody:

- Rotor neobsahuje budicí vinutí
- Vyšší účinnost stroje
- Je možno konstruovat menší a lehčí stroje
- Má menší moment setrvačnosti
- Není třeba přivádět napájení na rotor
- Větší momentová přetížitelnost
- Není potřeba stejnosměrný zdroj napájení pro budicí vinutí

Nevýhody:

- Vyšší pořizovací cena
- Technologicky náročnější návrh
- Technologicky náročnější výroba, obtížnější připevnění PM na rotor
- Obtížné odbuzování a klesající účinnost při odbuzování
- Stálá přítomnost magnetického pole v motoru, při pohybu rotoru se objevuje na svorkách napětí
- Riziko demagnetizace PM při silném proudovém nárazu
- Magnetické vlastnosti PM jsou závislé na teplotě, je tedy nutnost dobrého chlazení

2.3 Využití

Oblast použití PMSM je v oblasti s nízkým až středním výkonovým rozsahem. Pro velké stroje rostou rozměry magnetů, a tím i cena stroje. [5] Nejlepší uplatnění tyto motory nacházejí v systémech, kde pracují dlouhodobě při konstantních otáčkách a se stejným konstantním momentem. Jako příklad lze uvést čerpadla, kompresory nebo pohony pro automatické pracovní stroje. Využívá se jich také jako náhrada klasických synchronních motorů, ať už z důvodů požadavků na úsporu prostoru, nebo kvůli rychlejší reakcím na řídicí impulzy. Můžeme je také najít jako generátory u větrných elektráren. Další významnou vlastností je jejich schopnost dávat vysoký zátěžný moment i při nízkých otáčkách stroje. [7] Toho se využívá v dopravní technice a to primárně ve třech oblastech. Jako náhrada klasických synchronních strojů v technice, kde se jako primární zdroj uplatňuje spalovací motor. Dále jako náhrada asynchronních a stejnosměrných motorů, trakčních motorů v kolejové i nekolejové technice. A nakonec jako náhrada stejnosměrných motorů s PM v pomocných pohonech zejména v automobilové technice. Konkrétněji jako automobilové a trakční alternátory v lokomotivách nebo silničních vozidlech. Alternátory v alternativních pohonech vozidel, např. duobusy (trolejbusy, které jsou doplněny o pohon spalovacím motorem). Alternátory v hybridních vozech, kde mohou nahrazovat funkci startéru. Pohonné jednotky s možností rekuperace v tramvajích, vlacích, trolejbusech nebo automobilech (např. Toyota Prius). Obrovskou výhodou je možnost konstrukce strojů malých rozměrů, což umožňuje i některá netradiční konstrukční řešení. Také se využívá obrácené konstrukce stroje v nábojích kol, kdy rotor je vnější částí motoru a otáčí se spolu s kolem. [8]

3 Reluktanční synchronní stroje

Reluktanční synchronní stroj (RSM) byl vynalezen již v roce 1923. Tento typ motoru nebyl však příliš používán. Po dlouhou dobu byl relativně ignorovaný. Jeho intenzivnější výzkum začal zhruba před 20 lety. Díky moderním konstrukcím rotoru a technickému zvládnutí vektorového řízení dosahuje velmi dobrých vlastností. V dnešní době se již úspěšně objevuje na trhu a nahrazuje starší typy strojů. Jedná se o synchronní stroj bez buzení a rotorem zkonstruovaným tak, aby maximálně využil reluktančního momentu. Využívá se tedy pouze reluktanční moment. Toto řešení výrazně zjednodušuje konstrukci a zvyšuje provozní odolnost stroje. [5, 9]

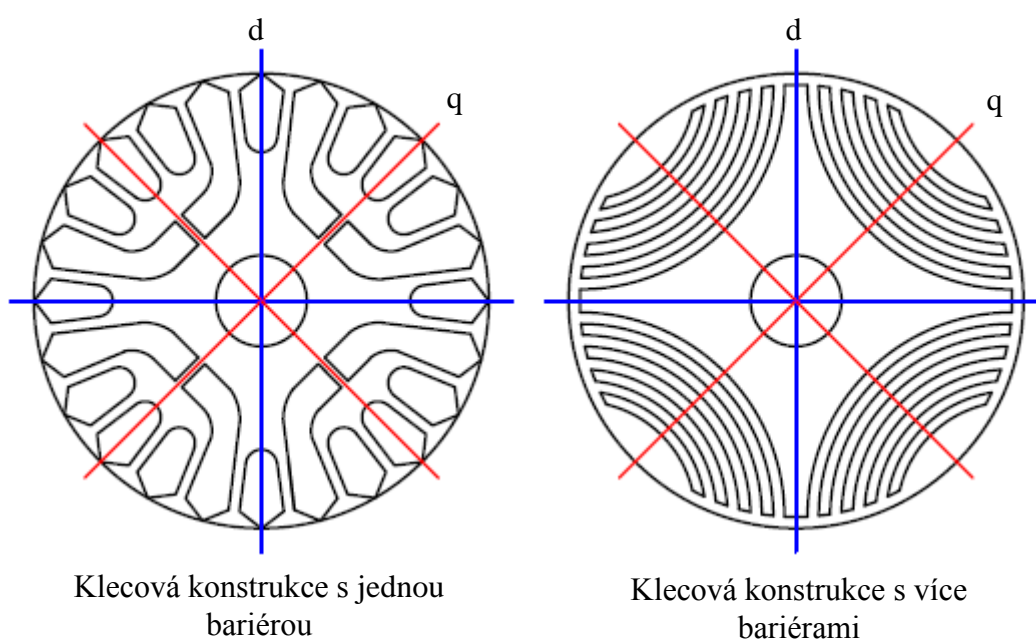


Obrázek 3.1: Reluktanční synchronní motor – převzato z [10]

3.1 Popis činnosti

Stroj se skládá ze statoru a rotoru. Stator je stejný jako u asynchronního nebo synchronního stroje. Tvoří se tedy na něm točivé magnetické pole. Rotor je zkonstruovaný s vyjádřenými póly tak, aby dosahoval co největší magnetické vodivosti v ose d a co nejnižší v ose q . Rotor na magnetické pole statoru bude reagovat tak, že se bude snažit natočit ve směru nejmenšího magnetického odporu. Bude se tedy natáčet tak, aby osa d byla ve směru pole statoru. Určujícím parametrem je poměr synchronních reaktancí $\xi = X_d/X_q$, čím je tento poměr větší, tím má stroj lepší parametry. Ve všech případech je cílem dosáhnout vysoké X_d tím, že se vytvoří dobré vodivé cesty pro magnetický tok v ose d a nízké X_q tím, že se vytvoří bariéry pro magnetický tok v ose q . Klíčovou roli má

konstrukce rotoru a za dobu vývoje stroje vzniklo velké množství variant. Jedná se o synchronní stroj, otáčí se tedy synchronní rychlostí a při připojení na síť se nedokáže sám rozběhnout. U klecových typů rotorů se využívá stejně jako u synchronního stroje asynchronní rozběh. Avšak tyto klece nedosahují takového poměru ξ a nejsou většinou konkurence-schopné. Bezklecové konstrukce rotorů jsou určeny pro vektorově řízené pohony. Tyto rotory se skládají z více magnetických bariér a jsou radiální nebo axiální konstrukce. Důležitou roli hraje také velikost vzduchové mezery. S větší vzduchovou mezerou je menší zvlnění momentu a akustický hluk, ale zároveň se sníží výkon a účinnost. [1, 5, 9, 10]



Obrázek 3.2: Konstrukční provedení rotorů – podle [1, 5]

3.2 Výhody a nevýhody

Na rozdíl od asynchronních motorů si zachovávají dobrou účinnost, i když nejsou provozovány při plném zatížení. Reluktanční synchronní motor s kvalitní konstrukcí rotoru a při synchronních otáčkách dosahuje vysoké spolehlivosti díky zanedbatelným ztrátám v rotoru, což prodlužuje život izolace motoru, ložisek a prodlužuje mazací intervaly. Lze zkonstruovat menší stroje než obdobně výkonné asynchronní motory. Nevýhodou je potřeba vektorového řízení pohonu. V následujícím přehledu je stroj srovnáván s asynchronním strojem z důvodu jejich podobnosti. Informace jsem čerpal především z těchto zdrojů [1, 5, 9].

Výhody:

- Vyšší účinnost stroje
- Je možno konstruovat menší stroje
- Jednoduchý rotor
 - Neobsahuje klec na krátko
 - Technologicky nenáročná výroba
 - Obvykle malý moment setrvačnosti
 - Umožňuje velmi vysoké otáčky
- Vysoká spolehlivost
- Dlouhá životnost

Nevýhody:

- Vyžaduje elektronické řízení
- Technologicky náročnější návrh
- Akustický hluk

3.3 Využití

Reluktanční synchronní motory se v současnosti nabízejí od stovek wattů do desítek kilowattů. Nabídka motorů, ale i potřebných frekvenčních měničů však neustále roste, stejně tak i jejich nasazení v terénu. Oblastí kde se RSM motory vyskytují, jsou čerpadla, ventilátory a kompresory, ale objevují se v aplikacích s konstantním momentem, kde nahrazují především asynchronní motory z důvodu vyšší účinnosti při stejné nebo lepší spolehlivosti. [9, 10]

4 Spínané reluktanční stroje

Princip spínaného reluktančního motoru (SRM) je známý od roku 1838, ale dlouhou dobu nemohl být prakticky realizovaný. Jeho vývoj nastal s rozvojem výkonové elektroniky, ta umožnila zlepšit jeho vlastnosti na úroveň, se kterou se mohl začít srovnávat s konvenčními stroji. Motor se začal objevovat v pohonech s proměnlivou rychlostí v průběhu 80. let. Často je konstruován pro vysoké rychlosti. Tento stroj, stejně jako reluktanční synchronní motor, pracuje na základě reluktančního momentu. Na rozdíl od RSM strojů má vyjádřené póly na rotoru i statoru. Stroj neobsahuje PM, může tedy pracovat při vyšších teplotách. Stroj vyžaduje ke svému provozu elektroniku určenou ke spínání cívek statoru a snímání polohy rotoru. SRM má velice variabilní konstrukci, stroje se mohou odlišovat počtem zubů statoru N_s , počtem zubů rotoru N_r a počtem statorových fází m . Nejčastěji se používají tří a více fázové stroje, u jedno nebo dvou fázových strojů dochází k problémům s rozběhem. Třífázové stroje se konstruují většinou typu 6/4, 6/8, 12/8, a čtyřfázové 8/6. První číslo udává počet pólů statoru a druhé počet pólů rotoru. [1, 5, 11]



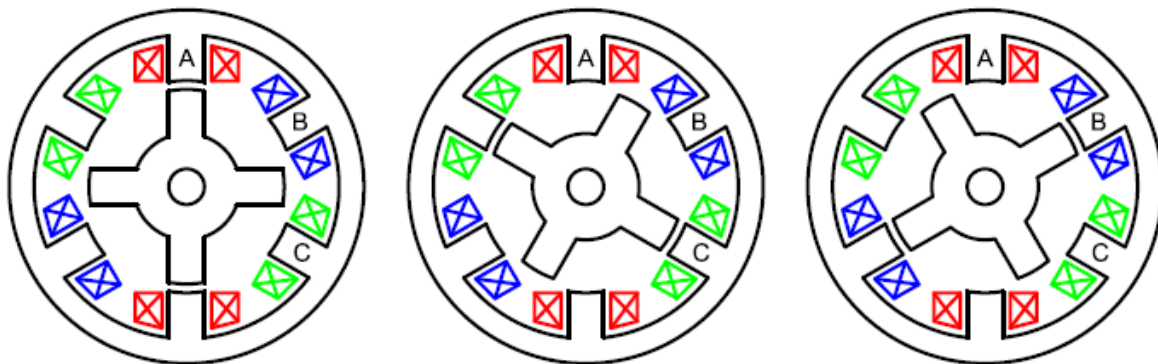
Obrázek 4.1: Spínaný reluktanční motor – převzato z [12]

4.1 Princip činnosti

Na satorových pólech je navinuto jednoduché vinutí. Protilehlá vinutí jsou spojena sériově nebo paralelně a vytvářejí S-J pólův pár, ten nazýváme fází. Přivedením proudu na jednu fázi vznikne magnetické pole. Rotor bude mít snahu nastavit se do polohy s nejmenší reluktancí, která se získá seřazením příslušných rotorových a satorových pólů, tím vzniká moment. Nepřetržitá rotace se získá postupným spínáním satorového proudu v příslušných fázích. Spínání fází zajišťuje elektronický komutátor, úhel vedení fázového proudu je řízený a synchronizovaný s polohou rotoru. Současně je sepnuta vždy jedna fáze. Směr otáčení závisí na sledu spínání rotorových fází. Moment závisí na kvadrátu velikosti napájecího proudu, nezávisí tedy na polaritě protékaného proudu. Podmínkou činnosti je rozdílný počet zubů na satoru a na rotoru. Zde platí vztah:

$$N_r = N_s \pm \frac{N_s}{m} \quad (1.1)$$

Na obrázku 4.2 je nakreslen SRM s pro různé sekvence buzení fází. Postupným spínáním v pořadí A, C, B dosáhneme směru otáčení ve smyslu hodinových ručiček. Spínáním v pořadí A, B, C dosáhneme opačného směru otáčení. [1 ,5, 13]



Obrázek 4.2: Otáčení rotoru SRM pro různé sekvence buzení fází – podle [1]

4.2 Výhody a nevýhody

Hlavní výhodou spínaného reluktančního motoru je jeho velmi jednoduchá konstrukce a možnost provozu při vysokých otáčkách. V porovnání s konvenčními řešeními pohonů s proměnlivou rychlostí přinášejí SRM vysokou účinnost v celém rozsahu rychlostí a také velký záběrný moment. Mezi největší nevýhody patří princip vzniku momentu, který je pulzační, to vede k zvlnění výsledného momentu, s tím souvisí i vysoká hlučnost stroje. V malém rozsahu rychlosti je možné snížit pulzaci momentu, ale prakticky ne v celém rozsahu rychlostí. Problém je možné minimalizovat zvětšením vzduchové mezery, ale s tím klesá účinnost stroje. Hlučnost roste s velikostí stroje, také závisí na tolerancích konstrukce a přesnosti spínání. Informace jsem čerpal především z těchto zdrojů [1, 8, 9].

Výhody:

- Nízká pořizovací cena
- Jednoduché vinutí statoru
- Jednoduchý rotor
 - Neobsahuje budicí vinutí - menší ztráty, odpadá problém s napájením
 - Neobsahuje PM – maximální teplota rotoru může být vyšší
 - Technologicky nenáročná výroba
 - Obvykle malý moment setrvačnosti
- Odolná a robustní konstrukce
- Umožňuje velmi vysoké otáčky
- Moment není závislý na polaritě proudu
- Velký záběrný moment
- Vyšší účinnost a větší moment než AM při všech rychlostech
- Menší rozměry při stejném výkonu než AM
- Ztráty převážně na statoru, který se poměrně dobře chladí

Nevýhody:

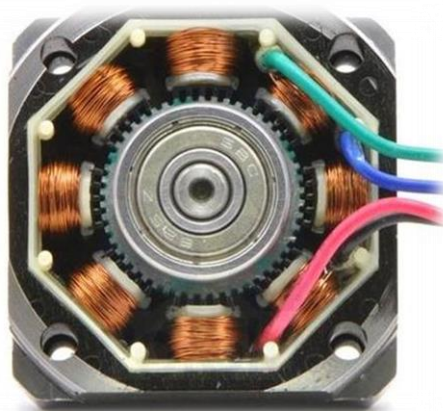
- Vysoká hladina hluku
- Zvýšená pulzace momentu při nízkých rychlostech
- Malé mechanické tolerance
- V případě nevhodného řízení produkuje elektromagnetické rušení
- Nutná informace o poloze rotoru

4.3 Využití

V současnosti je spínaný reluktanční motor schopný konkurovat svými vlastnostmi stejnosměrným i střídavým strojům, ale ve většině případů není ještě příliš rozšířený. Uplatnění nachází v aplikacích, kde je potřebné ve velkém rozsahu regulovat otáčky a moment. Asynchronnímu stroji může úspěšně konkurovat v malých velikostech pod několik kilowattů, kde zmenšující se magnetická indukčnost asynchronního motoru způsobuje zhoršení jeho vlastností. Běžně nabízené výkony se pohybují mezi 10 W při 10 000 ot/min až asi 0,5 MW při 50 ot/min. Využití můžeme rozdělit do dvou oblastí. První je oblast velmi vysokých otáček, tedy otáčky dalece přesahující 3000 ot/min. Čili aplikace jako šroubové kompresory, ventilátory, vysokorychlostní čerpadla, vířivky a odstředivky. Ve zdravotnictví se využívají v odstředivkách, které dosahují rychlostí až 100 000 ot/min. Používají se také k pohonu turbodmychadel v automobilech k odstranění tzv. turboefektu nebo ke startování tryskových motorů, kde potom pracují jako generátory. Druhou oblastí jsou nízkorychlostní aplikace, kde se využívá vysokého záběrného momentu. To jsou obecné průmyslové aplikace jako servopohony, aktuátory a trakce. Můžeme se s nimi setkat v pohonech speciálních elektromobilů, vozíků nebo obráběcích strojů, kde se využívá jejich výborného poměru točivého momentu k momentu setrvačnosti. Ve Velké Británii jezdí lokomotivy poháněné SRM. V aplikacích může být využito i zvlněného momentu SRM pro vibrační zařízení, například pohon vibračního mlýna na drcení kamene. [1, 4, 6, 14]

5 Krokové motory

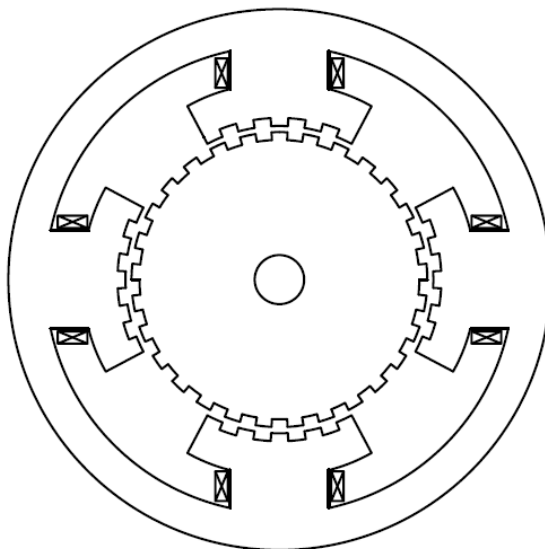
Krokový motor je poměrně dlouho známým elektrickým pohonem. První motor s malým úhlem kroku byl patentován již v roce 1919. Na začátku vývoje se používala mechanická komutační zařízení, která ovšem nebyla příliš spolehlivá. Pro rozvoj moderních pohonů s krokovými motory byl důležitý rozvoj polovodičové techniky, ta umožnila nové možnosti řízení, a tím i nové oblasti využití. Většinou jsou tyto stroje vyniklé jak na statoru, tak i na rotoru. Všechna vinutí jsou obvykle umístěna na statoru a motor nemá žádné kluzné kontakty. Za dobu jejich existence vzniklo velké množství konstrukčních provedení, hlavní kategorie jsou krokové motory s pasivním rotorem (využívají reluktančního momentu), aktivním rotorem (využívají působení PM) a hybridní motory. Konstrukční řešení závisí především na konkrétních požadavcích, obzvláště na velikosti kroku, ale také na momentu nebo na rychlosti reakcí. Základní vlastností krokového motoru je schopnost převést změnu buzení na přesně definovaný úhel natočení tzv. krok. Krok je mechanická odezva rotoru na jeden pulz napájecího obvodu. Krokový motor se pohybuje nespojitě po jednotlivých úsecích. Frekvence napájecích pulzů určuje rychlost otáčení motoru. Krokový motor má na rozdíl od SRM mnohem větší počet statorových i rotorových zubů, pod jedním pólem je jich několik. Proto na jednu celou otáčku připadá velké množství kroků, např. 50, 100 nebo 200 kroků. Z toho důvodu je rychlost stroje menší než u SRM. Od SRM se liší také tím, že nepotřebuje ke své funkci znát polohu rotoru. Krokové motory se používají tam, kde je potřeba nejen přesného řízení otáček, ale i polohy rotoru. Proto se nejvíce používají v polohovacích a regulačních systémech. [1, 6, 15]



Obrázek 5.1: Krokový motor – převzato z [16]

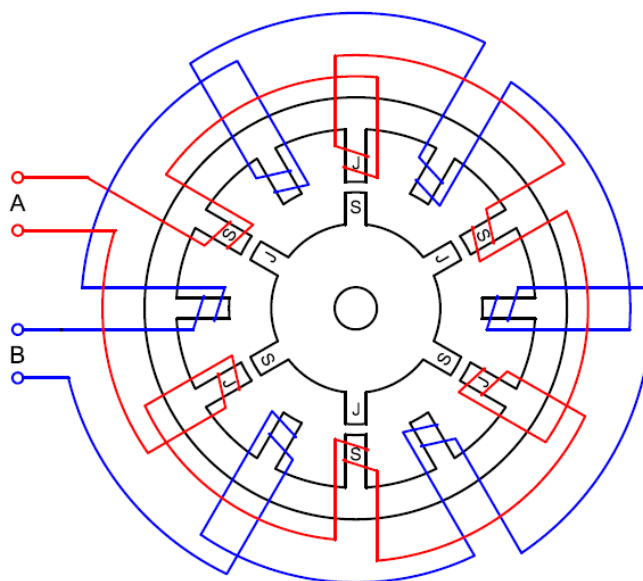
5.1 Princip činnosti

Princip vzniku momentu krokového motoru s pasivním rotorem je naprosto totožný se spínaným reluktančním motorem, který je popsán v kapitole 4.1, nehraje zde tedy roli polarita budicího proudu. [1]



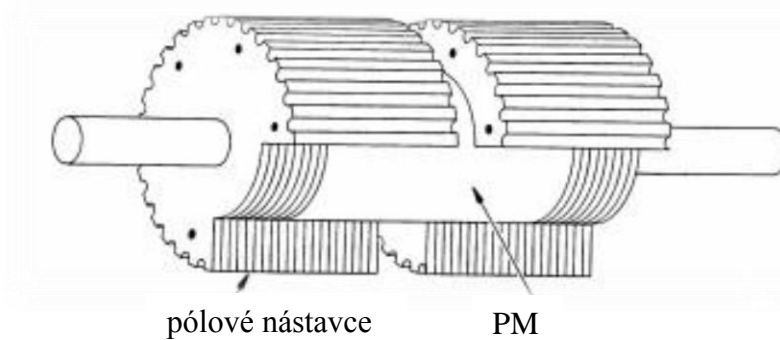
Obrázek 5.2: Krokový motor s pasivním rotorem – podle [1]

U strojů s aktivním rotorem je přesně definovaný počet i polarita jednotlivých pólů, na rotoru je polovina pólů oproti statoru. PM jsou orientovány radiálně a tvoří póly rotoru. Zde je třeba při spínání fáze měnit polaritu napětí. Průchodem kladného nebo záporného proudu fází měníme polaritu magnetického pole. Fáze statoru se střídají v buzení magnetického pole tak, aby docházelo k přitahování ve stejném směru, pólu s odpovídající polaritou. Princip činnosti je naznačen na obrázku 5.3. Spínací sekvence pro pohyb ve směru hodinových ručiček by vypadala následovně: A, B, -A, -B. [1, 15, 17, 18]

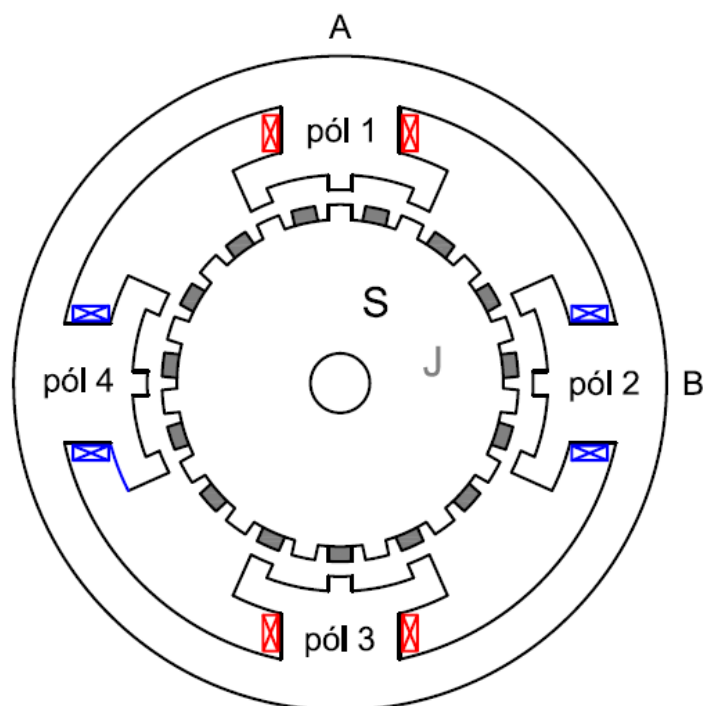


Obrázek 5.3: Krokový motor s aktivním rotorem – podle [18]

Hybridní provedení motoru slučuje principy obou předchozích typů. Zde je PM uložen ve směru osy a je orientován axiálně. Na obou koncích magnetu jsou rotorové pólové nástavce, které jsou vzájemně potočené o jednu polovinu zubového rozestupu rotoru. Pólové nástavce jsou vlivem PM magneticky orientované. Princip hybridního motoru je vysvětlován na obrázku 5.5. Ve stavu, kdy je buzená fáze A pól 1 přitáhne zuby severního pólu rotoru a pól 3 přitáhne zuby jižního pólu rotoru. Nabuzením fáze B se rotor pootočí o čtvrtinu zubového rozestupu, jeho jižní pól se seřadí se statorovým pólem 2 a severní pól se seřadí se statorovým pólem 4. V dalším kroku je opět napájena fáze A, ale opačnou polaritou proudu. Rotor se pootočí o další čtvrtinu zubového rozestupu a jeho jižní pól se seřadí se statorovým pólem 1. Když dále zapneme proud opačné polarity do fáze B, rotor se otočí o další čtvrtinu zubového rozestupu a dostaneme se do stejné výchozí situace.



Obrázek 5.4: Uspořádání rotoru hybridního krokového motoru – převzato z [1]



Obrázek 5.5: Krokový hybridní motor – podle [1]

5.2 Výhody a nevýhody

Nejdůležitější vlastností krokového motoru je jeho schopnost přesného nastavení polohy a otáček, a to bez zpětné vazby o poloze rotoru. Další výhodou je to, že chyba polohy není závislá na počtu kroků. Navíc je krokový motor jednoduše konstrukce a je spolehlivý. Hlavní nevýhodou je ztráta kroků, k čemuž dochází při překročení maximální rychlosti nebo při velké zátěži, to vede k tomu, že pak nelze přesně určit počet vykonaných kroků motoru. Informace jsem čerpal především z těchto zdrojů [1, 17].

Výhody:

- Snadné a přesné řízení otáček a polohy
- Neakumuluje se úhlová chyba
- Vhodné pro digitální řízení
- Jednoduché vinutí statoru
- Jednoduchá konstrukce
- Vysoká spolehlivost
- Nízká pořizovací cena (krokový motor s pasivním rotorem)
- Moment není závislý na polaritě proudu (krokový motor s pasivním rotorem)
- Pracuje bez zpětné vazby
- Velký točivý moment
- Moment i při nulových otáčkách
- Obvykle malý moment setrvačnosti

Nevýhody:

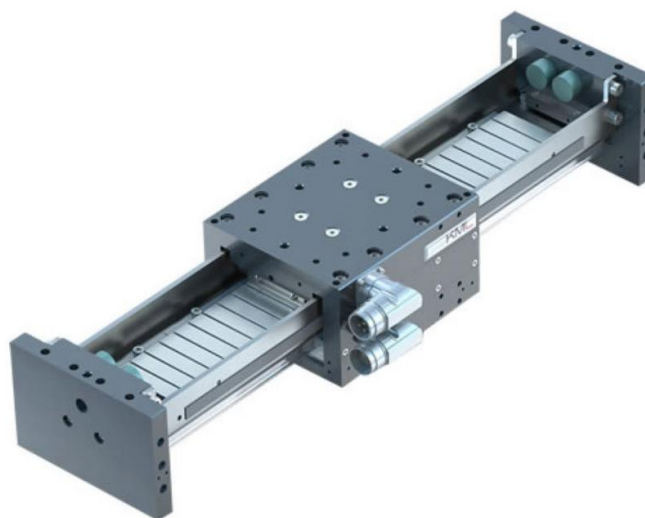
- Riziko ztráty kroku
- Při narůstajících otáčkách klesá moment
- Vysoká citlivost na přetížení
- Malá hodnota měrného výkonu
- Vyšší hlučnost

5.3 Využití

Krokové motory jsou všeobecně velice rozšířené. Větší část jich pracuje v oblasti malých výkonů do 50 W v malých elektronických zařízeních nebo spotřebičích. Vyšší výkony se využívají zejména v průmyslu, krokové polohovací systémy mohou mít výkon až 750 W. Nejpoužívanějším druhem krokových motorů v průmyslových aplikacích jsou hybridní motory, které pracují s nejvyššími výkony. Krokové motory se využívají zejména tam, kde potřebujeme přesné řízení polohy při nízkých a středních rychlostech. Řízení krokového motoru je prakticky digitální, proto jsou velice dobře kompatibilní s moderními systémy. Z toho důvodu si našly svoje použití ve výpočetní technice. V kancelářské technice je můžeme nalézt v tiskárnách, kde se používají pro pohon fotocitlivých válců, pro posun papíru a pro přemísťování náplně, v pevných discích, počítačových mechanikách a čtečkách. Jsou také ve skenerech nebo v kopírkách, kde slouží k posunu optických zařízení, nebo ve faxech, kde slouží k pohybu válce a pera. V průmyslu nacházejí uplatnění pro nastavování pracovních desek u obráběcích strojů, v pohonech průmyslových robotů nebo v regulaci různých zařízení. Krokové motory jsou také rozšířené v lékařských přístrojích, leteckém průmyslu a automobilovém průmyslu, zde se například využívají k nastavení sklonu světel. Dále je můžeme nalézt v anténních nastavovačích polohy, v hodinových strojcích, ve fotopřístrojích a kamerách, kde se využívají k pohonu automatického zaostřování. Byly zkonstruovány i speciální krokové motory například pro práci ve vakuu, při vysokých teplotách nebo při výrobě polovodičů. [1, 17, 19]

6 Lineární motory

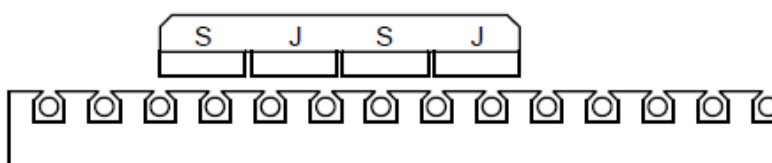
První zmínky o lineárních motorech se objevily už na konci 19. století. Dlouhou dobu zůstávalo jen u patentů, u výroby prototypů nebo technických specialit. K velkému rozvoji výroby a k praktickému uplatnění došlo až v posledních deseti letech, přestože principy jejich konstrukce jsou známy prakticky stejně dlouhou dobu jako u strojů rotačních. Přispěl k tomu hlavně rozvoj elektroniky, který umožnil kvalitní řízení rychlosti a polohování. V mnoha technických zařízeních je požadavek posuvného pohybu, a ten zajišťují lineární pohony. Základní dělení lineárních pohonů členíme na přímé a nepřímé. Nepřímé pohony jsou obvykle rotační stroje využívající mechanického převodu k dosažení posuvného pohybu. Přímé pohony zajišťují přímočarý pohyb bez převodu. Není zásadní problém převést otáčivý pohyb na lineární, ale někdy může být výhodnější jej získat přímo v pohonném zařízení, tedy v lineárním motoru. Lze si jej představit jako podélně rozříznutý a rozvinutý točivý stroj. Mohou to být v zásadě všechny známé typy rotačních strojů, vzniklo tedy velké množství konstrukčních provedení. Stator je zpravidla u lineárních motorů primární částí (jezdcem) stroje. Rotor je sekundární část stroje, ta určuje délku lineárního pohybu. Je snaha, aby sekundární část byla co nejjednodušší, neboť s rostoucí délkou pohybu by rychle rostla i cena motoru. V mnohých případech je ovšem stator a rotor v opačném uspořádání. O části, která se bude pohybovat, rozhoduje konstrukční uspořádání. V praxi se především používají motory synchronní, asynchronní, stejnosměrné a krokové. [6, 20, 21]



Obrázek 6.1: Lineární motor – převzato z [22]

6.1 Princip činnosti

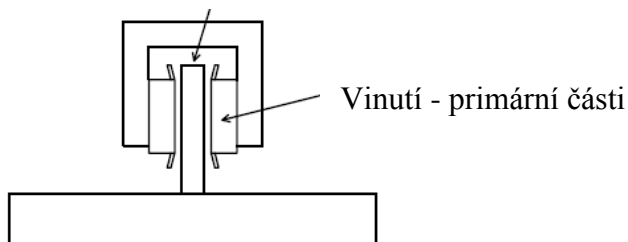
Jedna z možných konstrukcí synchronního lineárního motoru je naznačena na obrázku 6.2. Primární část je tvořena budícím vinutím nebo PM rotoru. Na sekundární části je vinutí statoru. Princip vzniku momentu je totožný se synchronním strojem, jen na sekundární části nevzniká točivé magnetické pole, ale postupné. Primární část je tedy tlačena tímto polem vpřed ve směru pohybu tohoto pole. Aby nedocházelo ke zbytečným ztrátám, je u delších drah napájena pouze část, kde se nalézá jezdec. Rychlost lze regulovat změnou frekvence napájení nebo pólovou roztečí na sekundární části. [20, 21]



Obrázek 6.2: Lineární synchronní motor s PM – podle [20]

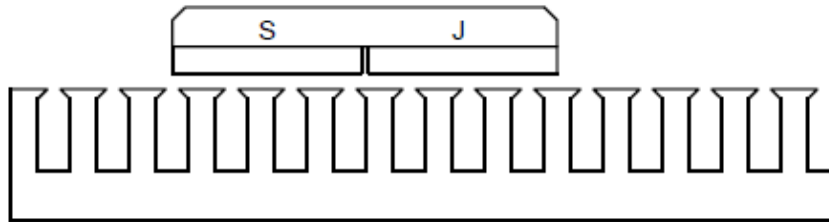
Asynchronní lineární motor se nazývá také lineární indukční motor. Nejčastější konstrukční řešení je uspořádání s krátkým státorem, viz obrázek 6.3. Primární částí zde tvoří statorové vinutí a sekundární část klec nakrátko, ta může být provedena vinutím uloženým do drážek nebo vodivým páskem nejčastěji z hliníku. Princip funkce je stejný jako u asynchronního motoru. Postupné pole primární části indukuje do sekundární části proudy, které vytvářejí magnetické pole interagující s polem statoru. Výsledkem této interakce je pohyb primární části ve směru opačném, než je jeho postupné magnetické pole. Rychlost lze regulovat změnou frekvence napájení nebo pólovou roztečí na sekundární části. [6, 20, 21]

Hliníková deska - sekundární část



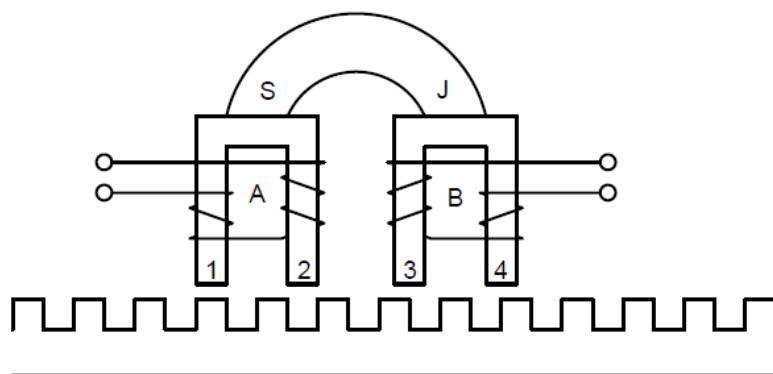
Obrázek 6.3: Lineární asynchronní motor s dvojitou primární částí – podle [6]

Stejnoseměrné lineární motory mají také více možných provedení. Konstrukce s pohyblivým magnetem je naznačena na obrázku 6.4. Sekundární část tvoří vinutí kotvy a primární část PM. Princip činnosti je totožný se stejnosměrným strojem s PM. Rychlost lze regulovat změnou napětí a elektronickou komutací. [20]



Obrázek 6.4: Lineární stejnosměrný motor s PM – podle [20]

Krokové lineární motory můžeme rozdělit stejně jako rotační krokové motory na stroje s pasivním rotorem, aktivním rotorem a hybridní. Princip Sawyerova lineárního krokového motoru je naznačen na obrázku 6.5. Primární část se skládá z PM a dvou elektromagnetů A a B. Sekundární část je dobře magneticky vodivá s vyniklými póly. Pokud není žádný elektromagnet buzený, magnetický tok protéká všemi zuby primární části. Pokud je elektromagnet buzený, tak celý tok permanentního magnetu a elektromagnetu protéká jedním zubem buzené části. Opačnou polaritou proudu dosáhneme průchodu toku druhým zubem buzené části. Vhodným spínáním dosáhneme pohybu požadovaným směrem. Spínací sekvence pro obrázek 6.5 pro pohyb doprava by byla: A, B, -A, -B. [1, 21]



Obrázek 6.5: Sawyerův lineární krokový motor – podle [1]

6.2 Výhody a nevýhody

Hlavní předností přímých lineárních motorů je konstrukce, v níž nejsou třeba přídavné převodové mechanismy převádějící rotační pohyb rotačního motoru na lineární, díky tomu se vyznačují mimořádně velkou přesností polohování, která je závislá pouze na přesnosti odměřovacího systému (u lineárního krokového motoru je přesnost dána tolerancemi a krokem). Maximální otáčky jsou u nepřímých lineárních pohonů také omezujícím faktorem, protože při jejich překročení dochází k rozkmitání kuličkového šroubu, tuto nevýhodu přímé lineární pohony nemají. Lineární pohony mají také dobré dynamické vlastnosti a menší počet komponentů podléhajících opotřebení. Velkou výhodou je možnost mít na jedné dráze více jezdců, které se pohybují nezávisle na sobě. Pohony s přímými lineárními motory jsou také kompaktnější, vyžadují tedy menší montážní prostor. Velmi zajímavou vlastností lineárních pohonů je možnost provedení se vznášivými účinky. Jezdec pak levituje nad sekundární částí a zároveň je poháněn. Nevýhodou u lineárních motorů, u kterých se využívá postupné magnetické vlny, je skutečnost, že vlna existuje jen v oblasti napájené části, vznikají tak okrajové efekty, které obecně zhoršují vlastnosti motorů. Nevýhodou může být skutečnost, že lineární motor si nemůže pomoci převodovým poměrem převodového mechanismu. Další nevýhodou mohou být vysoké náklady na pořízení podstatně odlišného pohonného systému stroje nebo v porovnání s typickým rotačním pohonem. Obecně lze říci, že lineární motory nedosahují svými vlastnostmi parametrům rotačních strojů, mají však v některých oblastech jisté výhody, které převažují nad nedostatky. V následujícím přehledu jsou lineární motory obecně srovnávány s rotačními stroji s převodovými mechanismy pro lineární pohyb. Informace jsem čerpal především z těchto zdrojů [6, 20, 23, 24].

Výhody:

- Vykonávají lineární pohyb, bez převodových mechanismů
- Na jedné dráze může být více jezdců
- Přesnější polohování
- Kompaktnější rozměry
- Vyšší rychlost
- Dobré dynamické vlastnosti
- Menší počet komponentů podléhajících opotřebení
- Levitační účinky

Nevýhody:

- Vyšší pořizovací cena
- Nižší účinnost
- Nižší moment
- Část motoru je vždy nevyužívaná

6.3 Využití

Lineární motor je nasazován v aplikacích, kde není potřeba velkého momentu, ale vysoké rychlosti, plynulosti, dynamiky a přesnosti polohování. Lineární motory se často používají ve špičkových pohonných systémech, kde cenově výhodnější soustavy nesplňují technické požadavky. Nejčastější využívání lineárních motorů je v obráběcích strojích (vysokorychlostní obrábění, laserové obrábění, svařování, přesné řezání). Používají se například také v manipulační technice, polygrafických strojích, v balicích a plnicích mechanismech potravinářského a farmaceutického průmyslu nebo ve výrobě polovodičů. Je s nimi dosahováno větší produktivity při zvyšujících se rychlostech. Předpokládá se, že s rozvojem nových technologických postupů budou v mnoha oblastech vytlačovat jiné druhy polohovacích pohonů. S největší uplatněním se počítá u synchronních strojů s PM v sekundární části. Další uplatnění lineárních motorů je v trakci, zde se využívá jejich levitačních účinků. V provozu jsou levitované kolejové soupravy typu Maglev nebo Transrapid. Maximální dosažená rychlost je 603 km/h, to z tohoto druhu dopravy dělá nejrychlejší, ale i nejdražší kolejovou dopravu. Speciální aplikací, kde se využívá princip lineárního motoru, může být například čerpání roztavených kovů. V tomto případě napájená část tvoří trubku s vinutím a sekundární část je přímo roztavený kov. Dalším zvláštní použitím tohoto principu jsou urychlovače například raket. [6, 20, 23, 24]

7 Ultrazvukové motory

Ultrazvukový motor patří mezi nekonvenční pohony. Nevyužívá elektromagnetického pole, ale piezoelektrický jev spolu s mechanickým třením. Takže dochází k přenosu síly mezi statorem a rotorem na zcela jiném principu než u strojů elektromagnetických. Motory mohou vytvářet jak rotační, tak i lineární pohyb. Existuje více typů ultrazvukových motorů lišících se v principu přenosu deformací piezoelektrického materiálu na pohyb, nejvyužívanější principy jsou stick-slip, push-pull a motor s postupnou vlnou. Vyznačují se především malým krokem a vysokou hustotou výkonu. Princip je vhodný pro motory malých výkonů. [6, 25, 26]



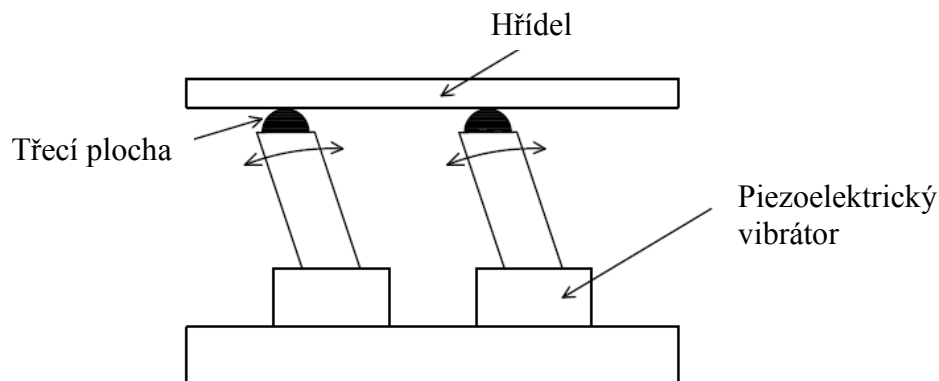
Obrázek 7.1: Ultrazvukový motor – převzato z [27]

7.1 Princip činnosti

Princip pohonu spočívá na základě piezoelektrického jevu, kdy některé nesymetrické krystaly vytvářejí elektrickou polarizaci v důsledku mechanických deformací. Tento fyzikální jev je vratný. Když přivedeme napětí na krystal, tak se důsledkem elektrického pole začne deformovat. Když se podaří pomocí regulace sladit vlastní kmity motoru s periodickým napětím, tak v tomto krystalu vzniknou stojaté kmity. Ty se pomocí různých systémů pomocí adheze přenáší na rotor. [6,25]

Stick-slip systém je vysvětlen na obrázku 7.2. Na piezoelektrický keramický materiál je přivedeno lineárně rostoucí napětí, materiál se začne deformovat a posouvá volně položený hřídel, který se vlivem tření pohybuje doprava. Následně napětí prudce klesne a krystal se vrátí do své původní polohy, hřídel vlivem setrvačnosti nezareaguje na zpětný

pohyb keramiky a zůstane ve své poloze. Tímto způsobem můžeme hřídel libovolně posouvat. Délka jednoho kroku se může pohybovat v závislosti na velikosti napětí od 10 do 100 nm. [6, 25]



Obrázek 7.2: Stick-slip systém ultrazvukového motoru – podle [25]

7.2 Výhody a nevýhody

Výhodnou vlastností ultrazvukových motorů je schopnost pracovat při velmi nízkých otáčivých rychlostech. Ačkoliv velikost kmitů jsou mikrometrové, je možné získat i vysoké otáčky díky vysokým kmitočetům. Kmitočet kmitání se pohybuje nad 20 kHz, jsou tedy neslyšitelné pro člověka. Také schopnost nastavení polohy vyniká svou přesností, nejlepší ultrazvukové motory umožňují krokovat v desítkách pikometrů. Ultrazvukové motory jsou také velmi málo ovlivňované cizími elektromagnetickými poli. Vysoká účinnost, okolo 60 %. To je více, než u podobného typu elektromagnetického stroje korespondujících rozměrů. Nevýhodou je potřeba zajišťování optimální pracovní frekvence a taktéž optimálního součinitele tření. Tyto parametry jsou citlivé na změnu teploty. Dalšími nevýhodami je nemožnost větších rozměrů a kratší životnost způsobená třením. V následujícím přehledu jsou ultrazvukové motory srovnávány se stroji podobných rozměrů. Informace jsem čerpal především z těchto zdrojů [6, 25, 26].

Výhody:

- Schopnost pracovat i při velmi nízkých rychlostech
- Velmi vysoká přesnost nastavení polohy
- Vysoká účinnost
- Vysoká hustota výkonu
- Vysoká reakční rychlost
- Dobré dynamické vlastnosti
- Vysoký točivý moment při nízkých rychlostech
- Velice málo ovlivňované elektromagnetickými poli
- Kompaktní provedení
- Velice tichý motor

Nevýhody:

- Vyšší pořizovací cena
- Pouze pro malé výkony
- Obtížnější řízení
- Krátká životnost
- Citlivost na změnu teploty

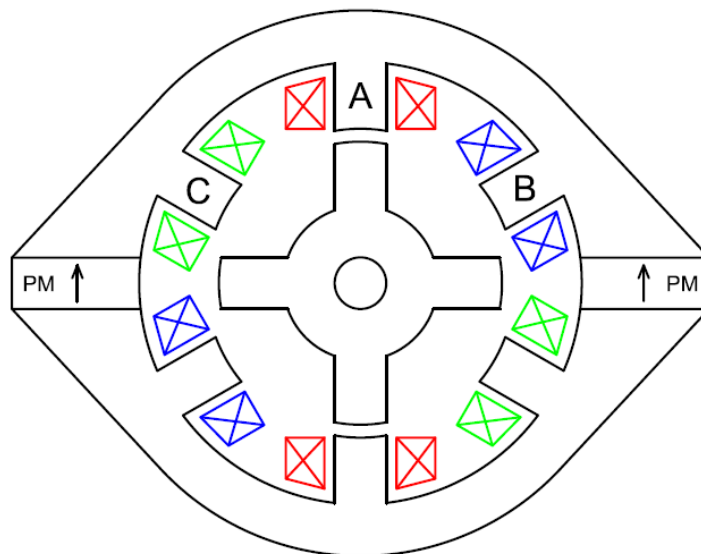
7.3 Využití

Ultrazvukové motory se využívají v aplikacích vyžadujících přesné krokování, přesný kontinuální běh nebo častý rozběh a zastavení. Svoje uplatnění nacházejí v pohonech malých robotů, kde je potřebná přesná regulace polohy nebo jako pohonné jednotky v pružně reagujících automatických nastavovačích poloh optických zařízení (automatické zaostřování). Jejich momentálně hlavní nasazení je v optické technice, tedy ve fotoaparátech nebo kamerách. Odolnost vůči cizímu magnetickému poli umožňuje použití například v tomografech a podobných zařízeních se silnými magnetickými poli. Vzhledem ke své krátké životnosti se hodí spíše pro krátkodobé a občasné použití. Ultrazvukové motory se neustále vyvíjejí, v budoucnu se dá očekávat jejich větší využití například v medicíně, robotice a v oblasti přesného polohování. [6, 25]

8 Elektrické stroje typu Flux Switching Permanent Magnet

V posledních letech se výzkum zaměřil na stroje s PM umístěnými ve statoru. Toto řešení přináší dvě hlavní výhody. Na teplo citlivé PM mohou být obvykle lépe chlazeny a nepůsobí na ně odstředivá síla. Podle polohy PM ve statoru stroje dělíme na DSPM (Doubly Salient PM Machines), FSPM (Flux Switching PM Machines), FRPM (Flux Reversal PM Machines) a FCPM (Flux Controllable PM Machines). Tyto stroje kombinují vlastnosti synchronních strojů s PM a spínaných reluktančních strojů, tedy vysokou hustotu výkonu a jednoduchou konstrukci. [13, 28, 29]

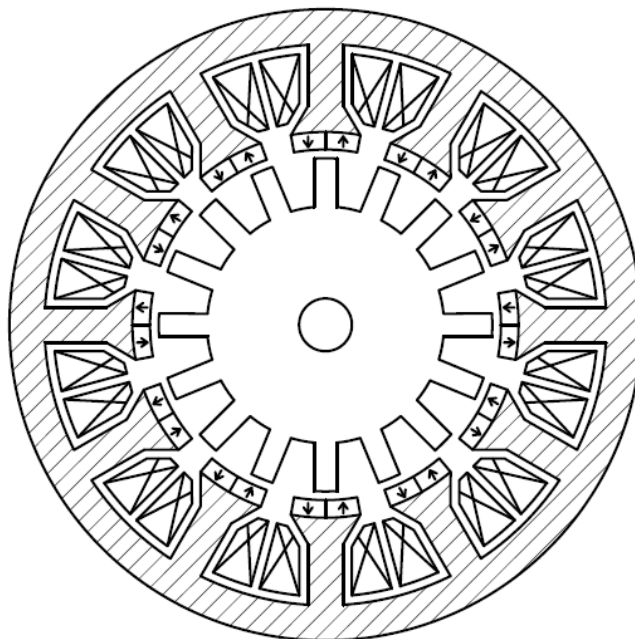
DSPM motory jsou konstrukčně spínané reluktanční motory s přidanými PM. Magnetický tok PM se slučuje s magnetickým tokem buzené fáze. Výsledkem je, že hustota momentu je vyšší než u synchronních strojů s PM. [29]



Obrázek 8.1: DSPM motor – podle [29]

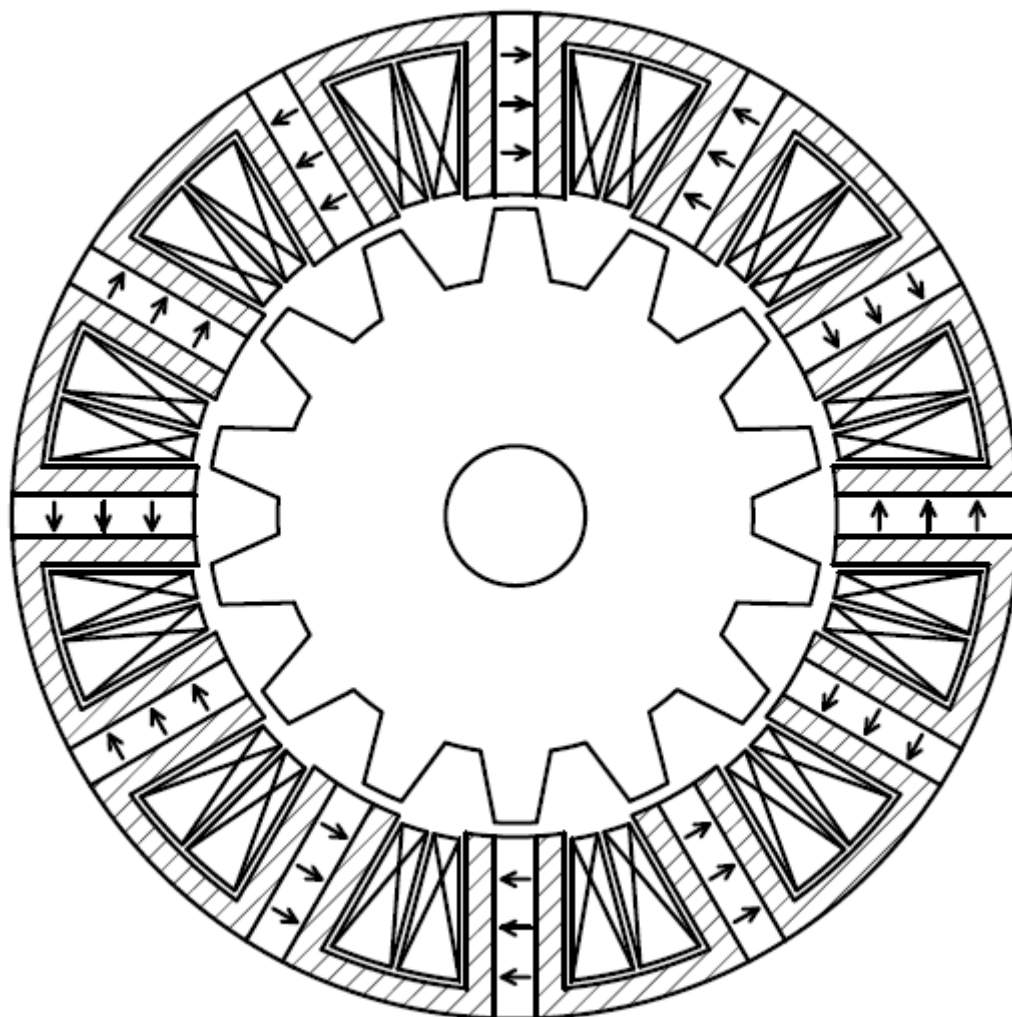
FCPM jsou motory s možností výrazně posílit nebo oslabit celkový magnetický tok statoru pomocí stejnosměrného vinutí umístěného u PM. To umožňuje výrazně například posílit kroučící moment nebo zvýšit rozsah otáček stroje za cenu nižší účinnosti. [29]

FRPM motory vykazují ještě větší hustotu momentu než DSPM, ovšem jejich umístění PM na povrchu statorových zubů přináší problematiku připevnění a riziko demagnetizace. [29]



Obrázek 8.2: FRPM motor – podle [29]

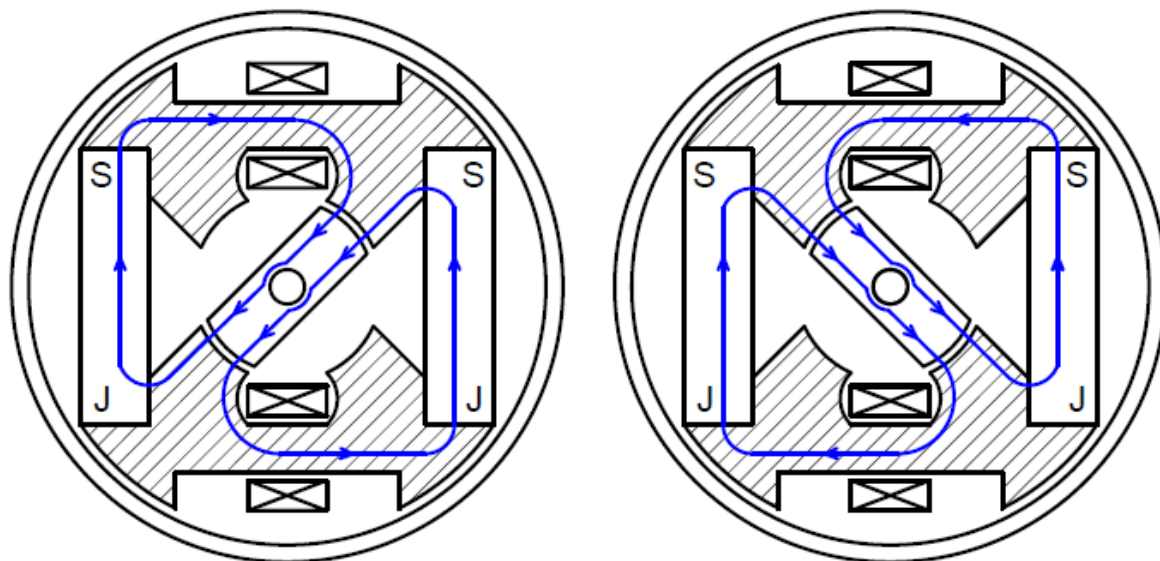
FSPM má vyniklé póly na statoru i na rotoru. Rotor je konstrukčně shodný se spínaným reluktančním motorem. Mezi zuby statoru jsou vloženy PM, které jsou orientovány tangenciálně a k sobě vzájemně otočené shodnými póly. Póly tvoří dva zuby a jeden PM a přes ně navinuté jednoduché vinutí. Důležitým parametrem je počet pólů statoru a rotoru, to ovlivňuje například spínací sekvence, zvlnění momentu, možné vibrace nebo provozní otáčky. Počet statorových zubů musí být sudé číslo, aby se u PM dodrželo vzájemné otočení. Počty zubů nejčastěji bývají 12/10, 12/14, ale vyskytují se i varianty s 12/11, 12/13, 6/5 a podobně. FSPM motor má i jiné novější konstrukční varianty jako například Multi Tooth FSMP, kde jsou ve statoru mezi buzenými póly umístěny pasivní zuby. Takto upravený motor může fungovat i s částečnou poruchou. [13, 28]



Obrázek 8.3: FSPM motor – podle [28]

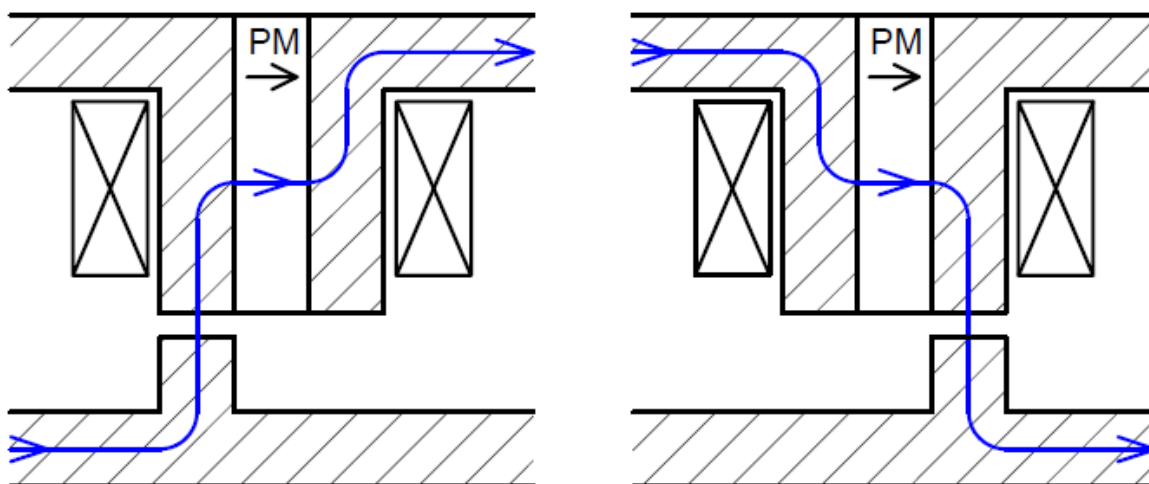
8.1 Princip činnosti

Nejjednodušším navrženým provedením je jednofázový FSPM stroj. Na obrázku 8.4 je naznačen princip činnosti. Vinutí statoru slouží k přepínání magnetického toku PM. Průchodem budicího proudu vinutím se vytvoří magnetické pole, které působí proti magnetickému poli jednoho PM a souhlasně s magnetickým polem druhého PM. To způsobí, že magnetický tok obou PM se sloučí a uzavře se přes vzduchovou mezeru, tím vytváří moment. Změnou polarity budicího proudu se celkový magnetický tok uzavře druhým pólovým zubem.



Obrázek 8.4: Jednofázový FSPM motor – podle [28]

Jednofázový FSPM motor má problematický rozběh a velké zvlnění momentu. Proto mnohem větší pozornost si získal vícefázový FSPM motor zobrazený na obrázku 8.3. Princip uzavírání magnetického toku tohoto stroje je obdobný jako u jednofázového provedení. Způsob uzavření toku je znázorněn na obrázku 8.5. Působením proudu procházejícího vinutím magnetický tok PM prochází levým nebo pravým zubem pólu v závislosti na jeho polaritě. Výsledný magnetický tok je dán superpozicí magnetického pole PM a magnetického pole vybuzeného cívkami vinutí. Směr magnetického toku v rotoru se během otáčení mění. [13, 28]



Obrázek 8.5: Princip FSPM stroje – podle [28]

8.2 Výhody a nevýhody

Hlavní předností FSPM strojů je vysoká hustota výkonu a velký záběrný moment. PM jsou umístěny na statoru, takže jejich chlazení je jednodušší. Rotor je velice jednoduchý stejně jako u SRM, dovoluje vysoké otáčky. FSPM motor se také vyznačuje vysokou účinností a mechanickou odolností. Hlavní nevýhodou je cena díky použití nákladných PM ze vzácných zemin. Nepříjemné je také zvlnění momentu. Informace jsem čerpal především z těchto zdrojů [13, 28, 30].

Výhody:

- Vysoká hustota výkonu
- Velký záběrný moment
- Vysoká účinnost
- Jednoduché vinutí statoru
- Jednoduchý rotor
 - Neobsahuje budicí vinutí - menší ztráty, odpadá problém s napájením
 - Neobsahuje PM - maximální teplota rotoru může být vyšší
 - Technologicky nenáročná výroba
 - Obvykle malý moment setrvačnosti
- Umožňuje vysoké otáčky
- Ztráty převážně na statoru, který se poměrně dobře chladí

Nevýhody:

- Vysoká pořizovací cena
- Zvlnění momentu
- Nízké využití magnetů
- Nutná informace o poloze rotoru

8.3 Využití

V současné době jsou FSPM stroje intenzivně zkoumány a vyvíjeny. Existuje sice určité množství postavených funkčních prototypů pro účely testování a malý počet strojů používaných ve velmi speciálních aplikacích, ale obecné rozšíření se teprve očekává. Podle dostupných informací je v současné době FSPM stroj používán v kosmických programech a v armádních zařízeních, kde slouží jako alternátor v řízených střelách. Hromadné výroby a reálného nasazení do praxe se můžeme dočkat až v následujících letech. Rozšíření se předpokládá v oblastech, kde jsou kladeny vysoké nároky na velikost, výkon, krouticí moment, spolehlivost nebo velmi vysoké otáčky. Proto se největší rozšíření předpokládá v trakci nebo v leteckém a automobilovém průmyslu. Pro použití v automobilech je vyvíjen startér-generátor, ten by měl sloužit jak pro startování vozidla, tak pro výrobu elektrické energie pro jeho provoz. V dnešní době několik automobilek pracuje na elektromobilech s motorem integrovaným v kole vozu, FSPM motor je jedním ze zkoumaných variant. Pro trakci jsou vyvíjeny stroje odvozené od FSPM za účelem nižších otáček a vyššího krouticího momentu. V zásadě mohou být FSPM motory nasazeny do mnohem většího množství aplikací místo SRM nebo jiných pohonů, brání jim v tom však vysoká cena. [28, 29, 30]

8.4 Model FSPM stroje

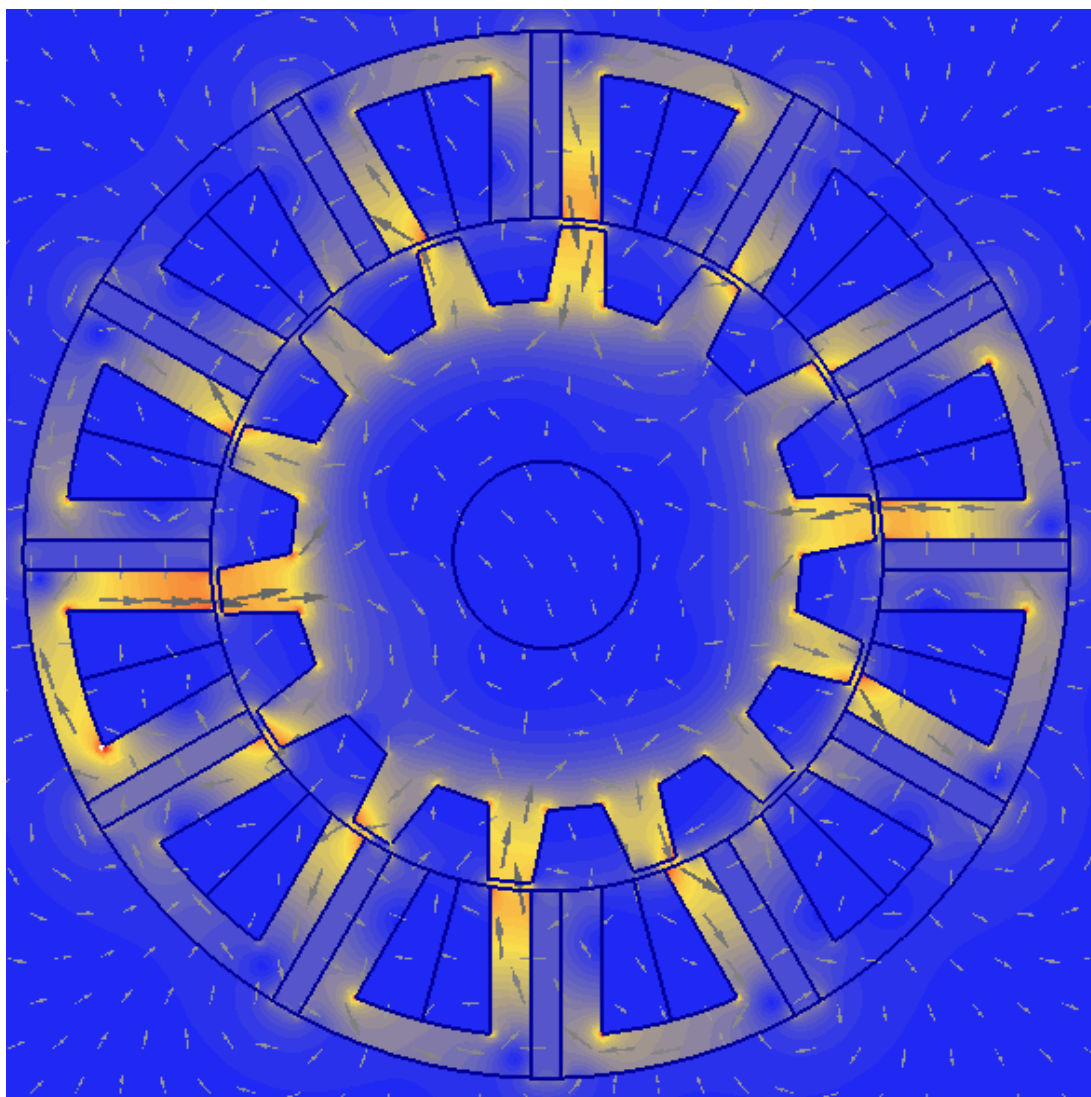
Pro model FSPM stroje byl zvolen třífázový motor s počtem pólů 12/14. PM byly zvoleny NdFeB s remanentní indukci 1,2 T. Model byl simulován v programu Agros2D, vyvíjeném Katedrou teoretické elektrotechniky na Západočeské univerzitě v Plzni. K řešení parciálních diferenciálních rovnic využívá metodu konečných prvků.

Řešená fyzikální úloha je simulace ustáleného magnetického pole uvnitř elektrického stroje. Simulace je zjednodušena na dvourozměrný model s lineárním magnetickým obvodem. Na kružnici omezující oblast stroje platí okrajový podmínka 1. Druhu pro magnetický potenciál $A_z = 0 \text{ Wb/m}$. Přiřazené materiálové vlastnosti jsou zobrazeny v tabulce 8.1. V příloze je obsaženy obrázky geometrie modelu, přiřazených materiálových vlastností a rozložení siločar modelu.

Tabulka 8.1: Materiálové vlastnosti

Vzduch	$\mu_r = 1$
Železo	$\mu_r = 1000$
Vinutí napájené +	$\mu_r = 1$ $J = 2,5 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$
Vinutí napájené -	$\mu_r = 1$ $J = -2,5 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$
Permanentní magnety	$\mu_r = 1,05$ $B_r = 1,2 \text{ T}$

Výsledek simulace magnetického obvodu FSPM motoru je na obrázku 8.6. Největší magnetické indukce byla v zubech statoru, kde dosahovala maximálních hodnot 1,8 T. To by znamenalo přesycování magnetického obvodu a nutnost úpravy konstrukce stroje.



Obrázek 8.6: Simulace magnetického obvodu FSPM motoru

9 Závěr

V práci bylo popsáno osm druhů speciálních motorů. U každého byl proveden základní popis, vysvětlen princip činnosti a shrnuty výhody a nevýhody. Dále bylo popsáno současné nebo budoucí využití daných strojů. U FSPM stroje byla provedena simulace magnetického obvodu.

Společnou vlastností speciálních druhů motorů je potřeba řídicí elektroniky a vyšší cena v případě použití PM. Frekvenční měniče s vektorovým řízením umožnily praktické nasazení synchronního stroje s PM, který dosahuje velice dobrých kvalitativních ukazatelů. Tento stroj je v současné době velice perspektivní, dosahuje velkých výkonů při malých rozměrech a dobré účinnosti. Využívá se v mnoha oblastech, například v průmyslových pohonech nebo v trakci. Porovnáním synchronního stroje s PM a bezkartáčového stejnosměrného stroje zjistíme, že jsou si velice podobné. Dokonce BLDC stroj se konstruuje se třemi fázemi na statoru, ačkoli ten vychází z rotoru klasického stejnosměrného stroje, kde počet lamel komutátoru je velmi vysoký. Liší se v tom, že BLDC stroj má obdélníkový tvar magnetické indukce ve vzduchové mezeře a synchronní stroj s PM má sinusový tvar indukce. BLDC pohony se využívají spíše v oblasti nižších výkonů, jako jsou domácí spotřebiče.

Stroje využívající čistě reluktančního momentu, jsou obvykle robustní konstrukce a mají velice jednoduchý rotor schopný dosahovat velmi vysokých otáček. Reluktanční synchronní motor se jeví jako kvalitní náhrada za asynchronní motor v aplikacích s proměnnou rychlostí. Využití spínaného reluktančního motoru je spíše v oblastech velmi vysokých otáček nebo v aplikacích s požadavkem na velký záběrný moment.

FSPM stroj využívá reluktančního momentu spolu s výhodami permanentních magnetů. FSPM motor by měl být schopný úspěšně konkurovat synchronnímu stroji s PM. Měl by dosahovat minimálně stejných kvalit, ovšem má odolnější konstrukci a dovoluje mnohem vyšší maximální otáčky. Tento stroj je v současnosti ve fázi vývoje, s postupným uváděním na trh se počítá v až následujících letech.

Mezi stroje se specifickým zaměřením patří krokové a lineární motory. Kombinují různé konstrukční principy ostatních strojů. V případě krokového motoru za účelem velmi přesného řízení polohy a rychlosti. U lineárního motoru s cílem posuvného pohybu nejčastěji pro polohovací zařízení. Velice speciálním strojem je ultrazvukový motor, využívající vibrací k pohybu. Uplatnění nachází v oblasti malých výkonů a rozměrů, kde dosahuje velice dobrých vlastností.

Seznam literatury a informačních zdrojů

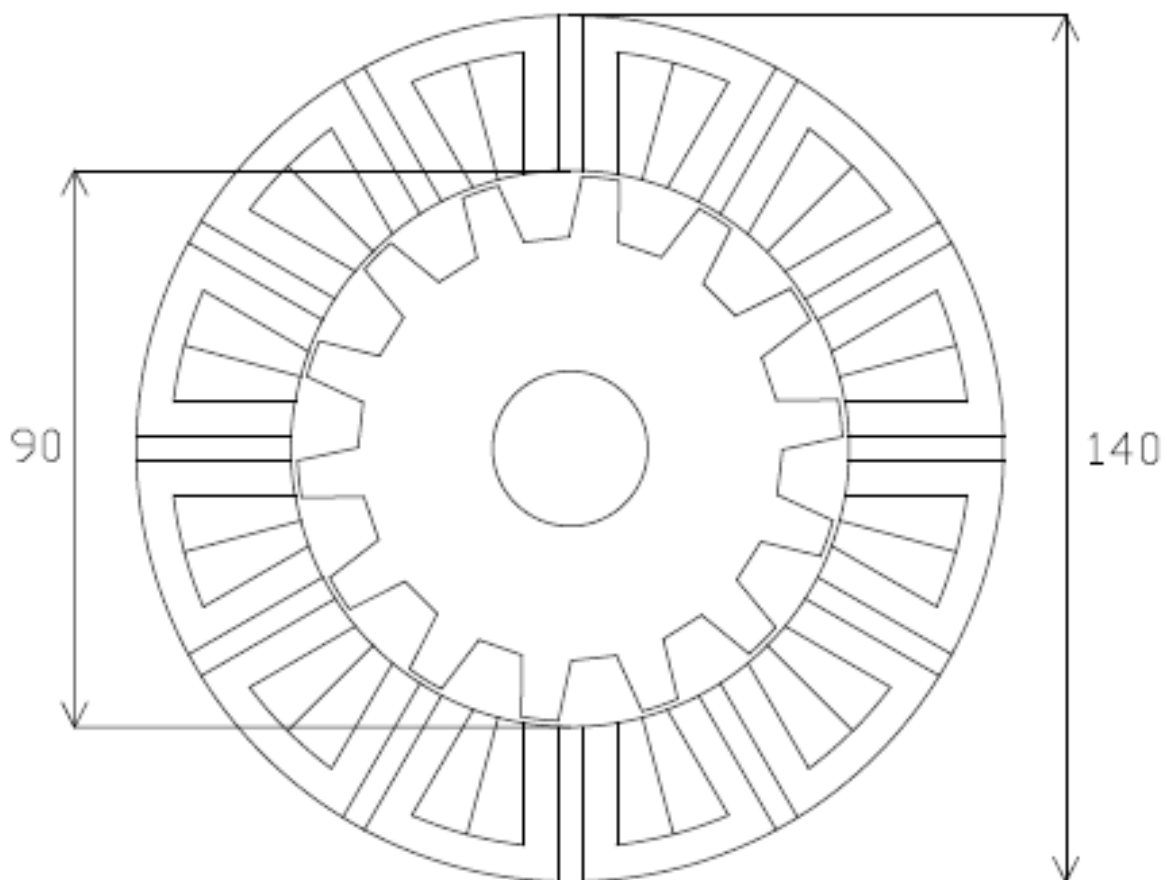
- [1] HRABOVCOVÁ, Valéria, JANOUŠEK, Ladislav, RAFAJDUS, Pavol a LIČKO, Miroslav. *Moderné elektrické stroje*. Žilina: Žilinská univerzita, 2001. ISBN 80-7100-809-5.
- [2] NXP. *Brushless DC motor control using the LPC2141* [online]. 2007 [cit. 2. 5. 2015]. Dostupné z: http://www.nxp.com/documents/application_note/AN10661.pdf
- [3] ZHAO Jian, YU a Yangwei. *Brushless DC Motor Fundamentals* [online]. 2011 [cit. 2. 5. 2015]. Dostupné z: <https://www.monolithicpower.com/Portals/0/Documents/Products/Documents/appnotes/Brushless%20DC%20Motor%20Fundamentals.pdf>
- [4] PISKAČ, Luděk. *Elektrické pohony: Principy a funkce*. 2. vydání. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2008. ISBN 978-80-7043-688-2.
- [5] HRABOVCOVÁ, Valéria a LIČKO, Miroslav. *Reluktančný synchronný motor*. Žilina: Žilinská univerzita, 2001. ISBN 80-7100-891-5.
- [6] BARTOŠ, Václav, ČERVENÝ, Josef, HRUŠKA, Josef, KOTLANOVÁ, Anna a SKALA, Bohumil. *Elektrické stroje*. 1. vydání. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2006. ISBN 80-7043-444-9.
- [7] SOKOL, Martin. *Návrh synchronního stroje s permanentními magnety*, Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni, 2012.
- [8] NOVÁK, Jaroslav. *Uplatnění synchronních strojů v dopravní technice* [online]. České vysoké učení technické v Praze, [cit. 4. 5. 2015]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/uplatneni-synchronnich-stroju-v-dopravni-technice-1-cast--13092>, <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/uplatneni-synchronnich-stroju-v-dopravni-technice-2-cast--12972>, <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/uplatneni-synchronnich-stroju-v-dopravni-technice-3-cast-dokonceni--12991>
- [9] BERNAT, František. *Motory, které vás posunou vpřed* [online]. 2012 [cit. 5. 5. 2015]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/flipviewer/Elektro/2012/02/Elektro_02_2012_output/web/Elektro_02_2012_opf_files/WebSearch/page0004.html
- [10] MATYSKA, Pavel. *Synchronní reluktanční pohony v regulovaných pohonech* [online]. 2013 [cit. 8. 5. 2015]. Dostupné z: <http://www.abb-conversations.com/cs/files/2013/06/Synchronn%C3%AD-reluktan%C4%8Dn%C3%AD-motory.pdf>

- [11] LEPKA, Jaroslav. *Moderní mikropočítače a jejich nasazení v aplikacích s elektrickými pohony a spínanými zdroji* [online]. Vysoké učení technické v Brně, 2011 [cit. 8. 5. 2015]. Dostupné z: http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura_10_1112.pdf
- [12] GOLDBERG, Lee. *EV Drive Electronics Evolve to Support Rare Earth-Free Motor Technologies* [online]. 2012 [cit. 20. 5. 2015]. Dostupné z: <http://www.digikey.com/en-US/articles/techzone/2012/sep/ev-drive-electronics-evolve-to-support-rare-earth-free-motor-technologies>
- [13] PAVLÍČEK, Karel. *Návrh a modelování reluktančního motoru s permanentními magnety*, Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni, 2013.
- [14] BARTOS, Frank. *Přichází obrození spínaných reluktančních motorů a pohonů?* [online]. 2013 [cit. 220. 5. 2015]. Dostupné z: <http://www.controlengcesko.com/hlavni-menu/artiky/artiky/artiky/article/prichazi-obrozeni-spinanych-reluktancnich-motoru-a-pohonu/>
- [15] *Pohony s krokovými motory* [online]. [cit. 26. 5. 2015]. Dostupné z: http://fei1.vsb.cz/kat410/studium/studijni_materialy/se/cast_C_el_pohony/se_eph_c1_krokac_02_teorie.pdf
- [16] *Speciální krokové motory na míru* [online]. Servo-drive, [cit. 26. 5. 2015]. Dostupné z: http://www.servo-drive.com/specialni_krokove_motory_krokove_motory_na_miru.php
- [17] NOVOTNÝ, Ondřej. *Krokové motory*, Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni, 2014.
- [18] UHLÍŘ, Ivan a kolektiv. *Elektrické stroje a pohony*. 2. vydání. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2007. ISBN 978-80-01-03730-0.
- [19] *Krokový motor* [online]. [cit. 26. 5. 2015]. Dostupné z: <http://www.pohonnatechnika.cz/skola/motory/krokovy-motor>
- [20] Svítek, Jiří. *Návrh lineárního indukčního stroje se vznášivým účinkem*, Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni, 2012.
- [21] *Lineární motory* [online]. [cit. 30. 5. 2015]. Dostupné z: http://www.vues.cz/file/424/CZ_LIN-OBECNE_020909.PDF
- [22] *Motorized linear unit*. [online]. [cit. 30. 5. 2015]. Dostupné z: <http://www.directindustry.com/prod/kml-linear-motion-technology-gmbh/motorized-linear-units-linear-motor-driven-63228-481658.html>
- [23] KAVÁN, Martin. *Lineární pohony na vzestupu* [online]. [cit. 30. 5. 2015]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/linearni-pohony-na-vzestupu.html>

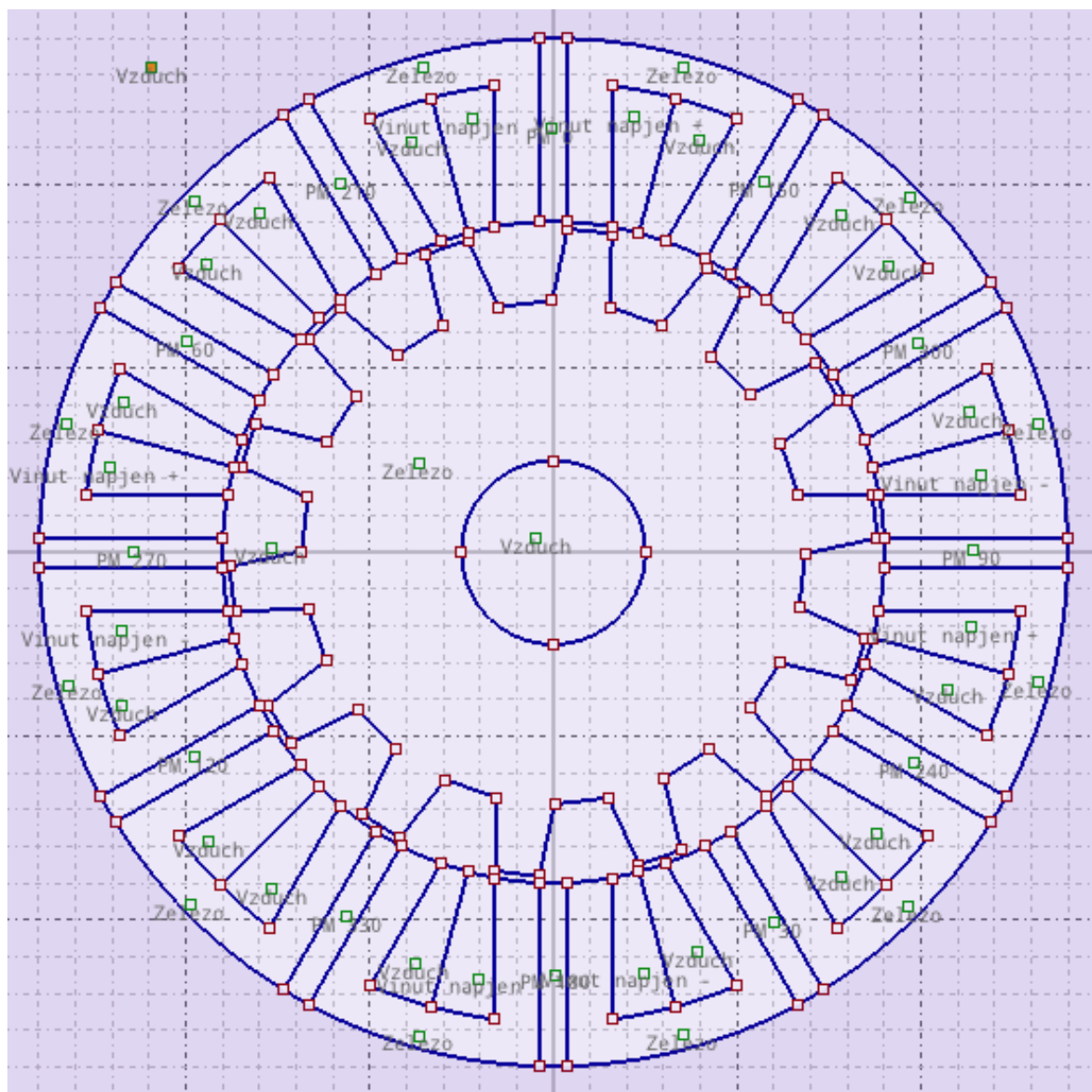
- [24] GUSTAV, Holub. *Lineární motory – ano, či ne?* [online]. 2009 [cit. 30. 5. 2015]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/prime-linearni-motory-ano-ci-ne--9986>
- [25] MUDRÁŠ, Maroš. *Piezoelektrické motory* [online]. 2010 [cit. 30. 5. 2015]. Dostupné z: <http://www.posterus.sk/?p=7993>
- [26] VOJÁČEK, Antonín. *Ultrazvukové motory* [online]. 2007 [cit. 30. 5. 2015]. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/clanek/2007022801>
- [27] *Piezo LEGS Linear twin* [online]. [cit. 30. 5. 2015]. Dostupné z: <http://www.piezomotor.com/products/linear/lt20/>
- [28] ROTEVANT, Njål. *Design and testing of Flux Switched Permanent Magnet (FSPM) Machines* [online]. Norwegian University of Science and Technology, 2009 [cit. 30. 5. 2015]. Dostupné z: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:347864/FULLTEXT01.pdf>
- [29] CHAU, K.T, LI, Wenlong. *Overview of electric machines for electric and hybrid vehicles* [online]. The University of Hong kong, 2014 [cit. 30. 5. 2015]. Dostupné z: <http://www.inderscienceonline.com/doi/pdf/10.1504/IJVD.2014.057775>
- [30] FANG, Z.X, WANG, Y, SHEN, J.X, HUANG, Z.W. *Design and Analysis of a Novel Flux-Switching Permanent Magnet Integrated-Starter-Generator* [online]. Zhejiang University, 2014 [cit. 30. 5. 2015]. Dostupné z: http://www.e-futures.group.shef.ac.uk/publications/pdf/56_full_paper_ISG.pdf

Přílohy

Příloha A – Geometrie modelu



Příloha B – Přiřazené materiály k modelu



Příloha C – Rozložení siločar modelu pro nabuzenou fázi A

