

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ  
ELEKTRONIKY**

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Vliv Halbachova pole na magnetické pole FSPM strojů**

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Martin HULEC**  
Osobní číslo: **E13B0030P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**  
Název tématu: **Vliv Halbachova pole na magnetické pole FSPM strojů**  
Zadávací 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 detailně Halbachovo pole a možnosti jeho využití.
2. Popište princip a konstrukci FSPM (flux-switching permanent magnet) strojů.
3. Vytvořte model FSPM stroje s Halbachovým polem a pro různé geometrie zkoumejte magnetické pole.
4. Diskutujte výsledky.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:


**Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.**

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Pavel Světlík**

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2015**

Termín odevzdání bakalářské práce: **2. června 2016**

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



  
Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

## **Abstrakt**

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na stroje se spínaným tokem a permanentními magnety (FSPM) a možnosti ovlivnění magnetické indukce ve vzduchové mezeře těchto strojů pomocí Halbachovy soustavy magnetů. Vysvětluje principy Halbachova pole a FSPM strojů, uvádí jejich aplikace a možný vývoj. Dále je zaměřena na vytvoření modelu FSPM stroje s konfigurací Halbachovo soustavy permanentních magnetů, aby bylo ověřeno, zda se zvýší či sníží magnetická indukce ve vzduchové mezeře FSPM stroje.

## **Klíčová slova**

Halbachovo pole, FSPM stroj, stroj se spínaným tokem a permanentními magnety, FEMM, magnetické pole

**Abstract**

The bachelor theses aims at the FSPM machines and the change of magnetic induction in the air gap of the FSPM machines using the Halbach array. It explains principles of FSPM machine and Halbach array, their applications and possible development. The theses is also focused on creating of a model of FSPM machine with configuration of permanent magnets in Halbach array, to increase, or decrease, the magnetic induction in the air gap of the FSPM.

**Key words**

Halbach array, FSPM machine, flux-switching permanent magnet machine, FEMM, magnetic field

## **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 31.5.2016

Martin Hulec

## **Poděkování**

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

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>10</b>
<b>1 HALBACHOVO POLE</b> .....	<b>11</b>
1.1 KONFIGURACE HALBACHOVY SOUSTAVY .....	12
1.1.1 Klasická konfigurace .....	12
1.1.2 Lineární konfigurace .....	13
1.1.3 Válcová konfigurace (cylindrická).....	14
1.1.4 Sférická konfigurace .....	15
1.2 APLIKACE HALBACHOVA POLE .....	15
1.2.1 Urychlovače částic .....	15
1.2.2 Inductrack Maglev.....	16
1.2.3 Motory .....	17
<b>2 STROJE SE SPÍNANÝM TOKEM A PERMANENTNÍMI MAGNETY</b> .....	<b>21</b>
2.1 KONSTRUKCE FSPM .....	22
2.1.1 Multi-tooth konstrukce.....	24
2.1.2 Fault-tolerant konstrukce .....	24
2.1.3 Konstrukce s pomocným stejnosměrným vinutím .....	25
2.1.4 Konstrukce s dvojitým rotorem.....	26
2.1.5 Konstrukce s vnějším rotorem .....	27
2.1.6 Lineární konstrukce FSPM.....	27
2.2 VYUŽITÍ FSPM STROJŮ .....	28
2.2.1 Trakce .....	28
2.2.2 Elektromobily .....	30
2.2.3 Vysokootáčkové stroje .....	30
2.2.4 Fault-tolerant stroje .....	30
2.3 VÝHODY A NEVÝHODY FSPM.....	31
<b>3 FSPM STROJ S PERMANENTNÍMI MAGNETY V HALBACHOVĚ SOUSTAVĚ</b> .....	<b>32</b>
3.1 ZÁVISLOST TLOUŠŤKY MAGNETU NA MAGNETICKÉ INDUKCI VE VZDUCHOVÉ MEZEŘE .....	34
3.2 ZÁVISLOST POČTU MAGNETŮ NA MAGNETICKÉ INDUKCI VE VZDUCHOVÉ MEZEŘE .....	38
3.3 VYHODNOCENÍ .....	40
<b>4 ZÁVĚR</b> .....	<b>41</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b> .....	<b>43</b>
<b>PŘÍLOHY</b> .....	<b>47</b>



## Úvod

Tato bakalářská práce je zaměřena na ovlivňování magnetického pole FSPM strojů pomocí Halbachova pole přidáním permanentních magnetů složených v Halbachově soustavě na stator těchto strojů. Text je rozdělen na dvě hlavní části, rešeršní a modelovací.

První část práce objasňuje, co je to Halbachovo pole, vysvětluje, jak se vytváří a udává jeho nejběžnější konfigurace. Následuje výpis možných aplikací v tomto stále novém oboru a nabízí několik možností, kam by mohl směřovat vývoj v této oblasti. V následující kapitole jsou popsány FSPM stroje, jejich konfigurace a nejpoužívanější konstrukce. Dále se práce zaměřuje na použití těchto strojů a jejich výhody a nevýhody.

V druhé části této bakalářské práce jsou vytvořeny modely FSPM stroje s různými konfiguracemi magnetů v Halbachově soustavě. Cílem je vytvořit takovou konfiguraci pomocí permanentních magnetů na vnější části statoru, aby byla hodnota normálové složky magnetické indukce ve vzduchové mezeře FSPM stroje vyšší, než tomu je u konstrukce bez PM uspořádaných v Halbachově soustavě. V závěru jsou porovnány všechny vymodelované konfigurace.

## Seznam symbolů a zkratk

2D .....	Dvourozměrný
3D .....	Trojrozměrný
$B$ .....	Magnetická indukce (T)
$B_r$ .....	Remanentní indukce (T)
$c$ .....	Rychlost světla (m/s)
CNC.....	Computer numeric control – číslicové řízení počítačem
DC.....	Stejnosměrný proud
FEL.....	Free electron lasers
FEMM .....	Program na práci s elektromagnetickým polem
FSPM.....	Stroj se spínaným tokem a permanentními magnety
KERS.....	Kinetic energy recuperation system – rekuperace kinetické energie
MATLAB .....	Matrix laboratory
NASA .....	Americký úřad pro letectví a kosmonautiku
NdFeB.....	Neodymový magnet s příměsí železa a bóru
PM .....	Permanentní magnet
S-FSPM .....	Sandwich-FSPM
SmCo .....	Samarium-kobaltový magnet
SolidWorks.....	Program na kreslení 2D a 3D modelů
SRM.....	Spínaný reluktanční motor
T.....	Jednotka magnetické indukce Tesla
W .....	Jednotka výkonu Watt

## 1 Halbachovo pole

S objevem kvalitnějších materiálů a díky postupu v technologickém zpracování bylo možné v druhé polovině 20. století začít více využívat permanentní magnety, jež byly do té doby zdrojem slabšího magnetického pole. Magnetika na bázi vzácných zemin, vyrobená spékáním jemných částic v magnetickém poli, měla kromě vyšších hodnot magnetické indukce i vysoce orientovanou strukturu domén [1]. Takto orientované magnety byly využity i při objevu Halbachova pole.

Halbachovo pole (anglicky Halbach array) je magnetické pole, které bylo poprvé vytvořeno v 70. letech Američanem John C. Mallinsonem [2]. Ten jej označil za pouhou kuriozitu, byť toto pole označil za možnost, jak zvýšit účinnost přenosu dat na magnetické pásky, dál jeho výzkum nepokračoval. Nezávisle na něm v roce 1980 Klaus Halbach, fyzik z Lawrence Berkeley National Laboratory v Kalifornii, vytvořil totéž pole při konstrukci urychlovače částic [3]. Následně se začala objevovat další odvětví, ve kterých mohla být tato soustava magnetů výhodná.

Soustava magnetů v Halbachově uspořádání ukazuje, že magnetická indukce  $B$  není závislá pouze na vlastnostech materiálu, ale že závisí i na geometrickém uzpůsobení jednotlivých permanentních magnetů. Jak se píše v práci profesora Mayera a docenta Ulrycha z FEL ZČU v Plzni [4], Halbachova soustava permanentních magnetů nemusí být jedinou možností, jak vytvořit silné magnetické pole pomocí orientace PM. V teorii elektromagnetického pole se díky tomuto objevu buduje nová oblast nazvaná *topologie magnetických obvodů s permanentními magnety*.

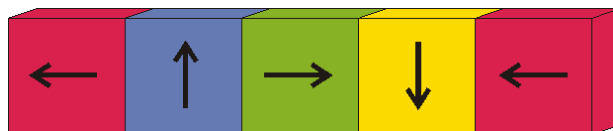
V dnešní době jsou na Halbachovu soustavu magnetů využívány dva druhy PM na bázi vzácných zemin – samarium-kobaltový (SmCo) a neodymový (NdFeB). Samarium-kobaltové magnety mohou pracovat ve vyšších teplotách (až 550 °C) a mají vyšší Curieovu teplotu (800 °C) [5], což je teplota, při které magnet ztrácí feromagnetické vlastnosti. Jsou také odolné vůči korozi. Nevýhodou je jejich křehkost, náchylnost ke štěpení a cena. Neodymové magnety mohou pracovat jen do 220 °C a mají Curieovu teplotu 350 °C. Vždy však záleží na typu magnetu, tedy jak byl vyroben a jaké má podíly ostatních prvků [6]. V současné době je to nejsilnější typ magnetu a je levnější než SmCo magnety. Velmi

snadno korodují a musí se chránit povrchovou úpravou – zinkováním, niklováním nebo pomocí pryskyřice [5].

## 1.1 Konfigurace Halbachovy soustavy

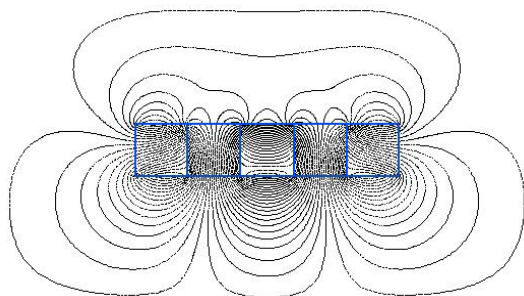
### 1.1.1 Klasická konfigurace

Základní konfigurace Halbachovy soustavy permanentních magnetů byla původně složena z pěti magnetů ve tvaru kvádrů [7]. PM s remanentní indukcí  $B_r \sim 1,2$  T byl vyroben ze vzácných zemin pomocí práškové metalurgie a následně byl každý kvádr orientován dle obrázku 1.

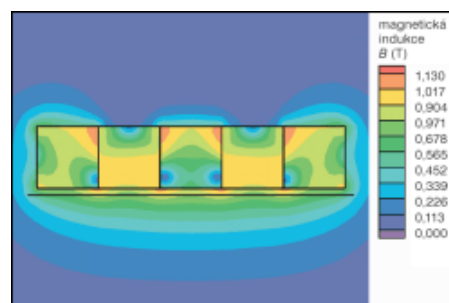


Obrázek 1: Základní konfigurace Halbachovy soustavy magnetů – převzato [4]

Magnetická pole těchto PM se skládají a výsledné magnetické pole má zvláštní vlastnosti. Nad touto soustavou je pole velmi slabé a naopak, pod ní, ve spodní části, je magnetické pole silné [7]. Je však nutno podotknout, že výsledné pole není homogenní, naopak je rozloženo silně nerovnoměrně, viz Obrázek 2.



Obrázek 2: Siločáry v Halbachově soustavě převzato [4]

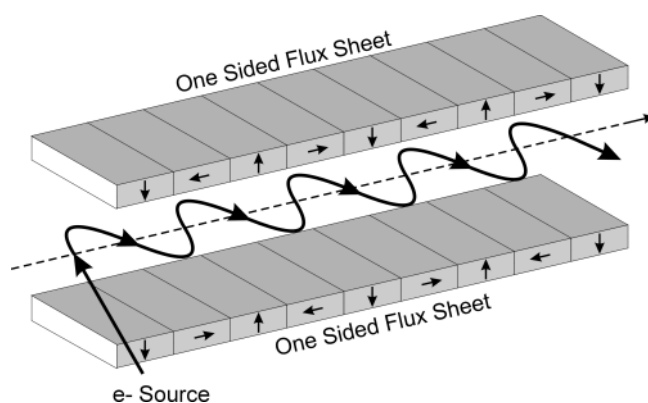


Obrázek 3: Magnetická indukce v Halbachově soustavě – převzato [8]

Skládáním dalších shodných pětic takto orientovaných magnetů dosáhneme pouze rozšíření daného pole, další změny již nenastanou.

### 1.1.2 Lineární konfigurace

Lineární konfigurace vychází z klasické. Nejčastěji se využívá dvou řad PM. Podle jejich orientace je vzniklé pole vhodné pro urychlování částic [7] či pro magnetickou levitaci [9].



Obrázek 4: Urychlení částic v laseru FEL pomocí Halbachova pole – převzato [10]

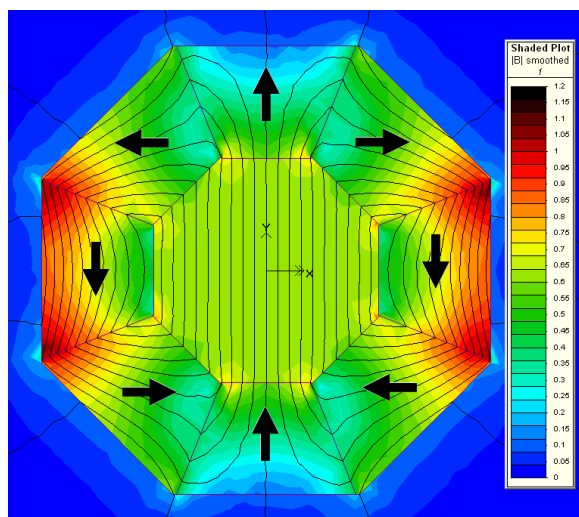
Další možností v lineární konfiguraci jsou orientované tyče, jež by se mohly pomocí ozubených spojení vzájemně pohybovat a tím upravovat výsledné magnetické pole [11]. Podle autorů této modifikace by se také daly použít jako urychlovače či jako magnetické spoje.



Obrázek 5: Jeden z návrhů řešení na tyče tvořící Halbachovo pole – převzato [11]

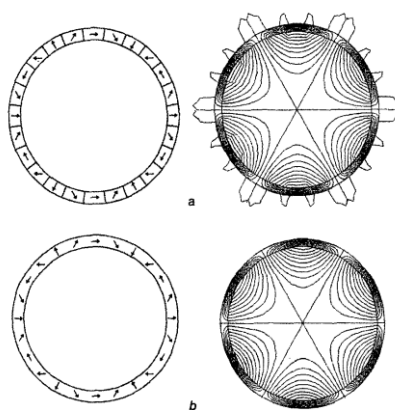
### 1.1.3 Válcová konfigurace (cylindrická)

Tato konfigurace je typická pro točivé stroje. Velkou výhodou je potlačení magnetického pole vně stroje (v ideálním případě až na nulu) a možnost vytvořit uvnitř stroje takřka homogenní pole (u dvupólového stroje), viz Obrázek 6. Popřípadě je možné vytvořit i takové uspořádání, aby Halbachovo pole vyzařovalo ven. [12]



Obrázek 6: Magnetická indukce ve válcové konfiguraci Halbachovy soustavy – převzato [10]

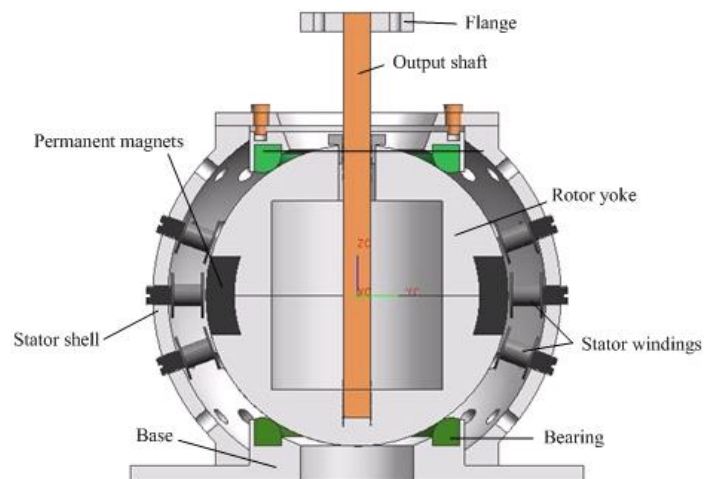
Potlačení magnetického pole vně stroje závisí na technologii, kterou byly magnety vyrobeny. Pokud jsou vyrobeny každý zvlášť a následně spojeny do tvaru válce či prstence, tak je vnější parazitní pole silnější, než pokud je využita druhá metoda, ve které se celý prsteneček magneticky orientuje za pomoci silného magnetického pole [13]. Tato možnost je dražší, ale efektivnější a více připomíná ideální Halbachovu soustavu. Viz Obrázek 7.



Obrázek 7: Rozložení magnetického pole u šestipólového stroje  
a) reálný segmentovaný stroj b) ideální stroj – převzato [13]

### 1.1.4 Sférická konfigurace

Sférická konfigurace Halbachovy soustavy permanentních magnetů se využívá u sférických motorů v robotice [14]. Nejčastěji má rotor z PM složených do Halbachovy soustavy a na statoru je několik vinutí. Takový motor se dokáže pohybovat až ve třech osách volnosti.



Obrázek 8: Sférický motor – převzato [14]

## 1.2 Aplikace Halbachova pole

Existuje spousta zařízení a přístrojů, které potřebují silné magnetické pole k tomu, aby fungovaly. Za poměrně krátkou dobu od jejího objevení se Halbachova soustava permanentních magnetů rozšířila na velké množství aplikací. Některé jsou energeticky výhodnější, jiné zase šetří náklady při výrobě. Oblast Halbachova pole nebyla ještě zcela probádána a je tedy velice pravděpodobné, že zkoumání dalších aplikací bude pokračovat i v budoucnu.

### 1.2.1 Urychlovače částic

Klaus Halbach využil pole po něm nazvané, když hledal možnosti, jak urychlit částice [7]. Princip je jednoduchý. Svazek elektronů je rozkmitán na něj kolmým magnetickým polem (Obrázek 4). Při těchto kmitech elektrony vyzařují energii a interagují se světlem, čímž dojde k emisi fotonů, které se pohybují ve směru posunu elektronů. Díky

tomuto jevu bylo možné vytvořit monochromatické koherentní záření velmi podobné klasickému laseru (takzvané free electron lasers).

Elektrony se tímto způsobem dají zrychlit téměř až na rychlost světla ( $0.9999998 \cdot c$ ) a kromě běžných fyzikálních jevů zde probíhají i jevy fyziky kvantové. Je to způsob vytvoření laserového záření, který nevyžaduje použití zrcadel [15].

Kromě výzkumných účelů se urychlovače částic s Halbachovou soustavou permanentních magnetů využívají v lékařství na odstranění nádorů či tuku [16], v genetickém inženýrství (záření je dostatečně rychlé a přesné a dokáže oddělovat jednotlivé proteiny v molekulách) [17] a samozřejmě ve vojenství, kde se snaží vynalézt zbraň na ochranu vzdušného prostoru [18].

### 1.2.2 Inductrack Maglev

Halbachovo pole dokázalo pomoci také v oblasti magnetické levitace. V 90. letech minulého století se fyzici z Lawrence Livermore National Laboratory in California vedeni Richardem F. Postem pokusili najít levnější a kvalitnější řešení v dopravě, v magnetické levitaci rychlovlaků [19].

Vše funguje na principu elektromagnetické indukce. Na spodní straně vlaku jsou permanentní magnety v Halbachově soustavě a když vlak jede, tak se indukuje napětí v kolejišti, ve kterém je vodič, nejčastěji měděný. Trať tak vytváří vlastní magnetické pole, které působí proti změně, která jej vyvolala. Snaží se tedy vlak odpuzovat a tím jej udržuje v levitaci.

Absence dotyku s povrchem dráhy znamená, že jediné ztráty má vlak v odporu vzduchu. Díky tomu nejsou téměř opotřebovány ložiska, kola a další pohyblivé části a je zde velký příslib do budoucna, co se týká spolehlivosti a životnosti.

Problém nastává při malých rychlostech, kdy síla magnetů není dostatečná. Pro nízké rychlosti (do 35 km/h) se proto využívají klasická kola. Při brzdění či při poruše vlak postupně zpomaluje, dokud neusedne na svá kola.



Další možností je využití ještě jedné řady Halbachovy soustavy magnetů, jež by byla pod kolejištěm [20]. Takto vybavené vlaky, se dvěma soustavami magnetů, by mohly fungovat i v menších rychlostech a pro větší hmotnostní zatížení. Zde je ale negativem zvýšená cena.



Obrázek 9: Testovací vozidlo systému Inductrack – převzato [21]

Tento systém by také ráda využila NASA (Americký úřad pro letectví a kosmonautiku) [21]. Jejich cílem je vytvořit dráhu, ze které by mohly startovat raketoplány do vesmíru. Mohly by tak levněji získat část potřebné energie k opuštění naší atmosféry.

### 1.2.3 Motory

Dalším rozsáhlým odvětvím, kde se dají využít permanentní magnety, jsou motory. Existuje široké spektrum aplikací, ve kterých se dá dosáhnout atraktivních výsledků při použití Halbachovy soustavy PM, ať se jedná o lineární motory, rotory stejnosměrných či střídavých strojů, ale také vysokootáčkové setrvačníky či o sférické motory a magnetická ložiska.

Tyto stroje se také mohou lišit v jejich provedení, mohou být kartáčové nebo bezkartáčové, s drážkami nebo bez drážek, s radiálním nebo axiálním polem, s magneticky měkkým železem či bez něj a tak dále.

### 1.2.3.1 Servomotory

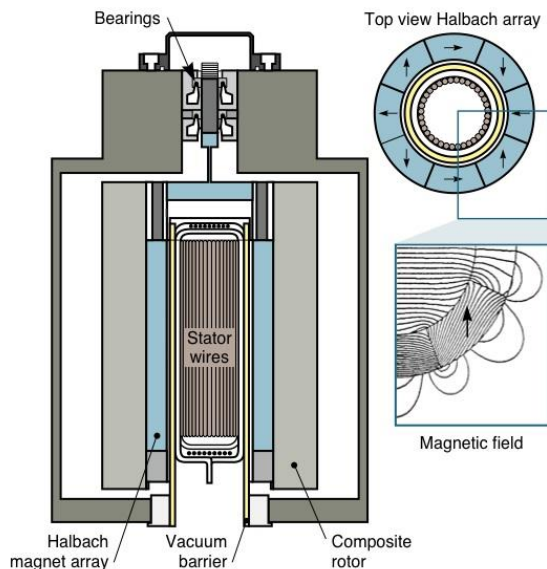
U servomotorů je vyžadována velká přesnost pohonu, která je velmi ovlivněna setrvačností a průběhem momentu, především pulzačního momentu od PM (angl. Cogging torque). Naštěstí právě Halbachova soustava magnetů má tu vlastnost, že má velmi nízký pulzační moment a díky tomu se hodí právě do servomotorů [13].

Mezi nejčastější aplikace servomotorů s Halbachovým polem patří počítačové harddisky, posilovače řízení nebo CNC stroje s rychlou akcelerací (až o 2000 otáček za 100 milisekund) [22]. Největšími výhodami oproti klasickým servomotorům jsou nižší zkreslení elektromagnetického pole, lepší průběh momentu a jednodušší výroba statorových vinutí, u kterých se nemusí zohledňovat pulzační rázy.

### 1.2.3.2 Vysokootáčkové motory a generátory

Díky menšímu objemu železa se Halbachova soustava permanentních magnetů hodí i motorům pracujícím ve vyšších otáčkách. Klasickým představitelem této kategorie je setrvačnick, jenž má lepší vlastnosti oproti klasickému uspořádání magnetů [13]. Mezi hlavní výhody patří minimum přídavného železa, tudíž se i při vysokých otáčkách stroj příliš nezahřívá, nevznikají vířivé proudy a motor/generátor je lehčí (a tedy i levnější). Navíc na konstrukci nepůsobí příliš velké síly, které by ve velmi vysokých otáčkách mohly vést až k destrukci stroje.

Speciálním typem takového setrvačnicku je takzvaná elektromechanická baterie, jež slouží, jak již název napovídá, k uchovávání a následnému pozdějšímu využití elektrické energie [12]. V podstatě vypadá stejně jako stejnosměrný motor, stator je tvořen permanentními magnety a rotor je pohyblivá kotva. Energie se přenáší přes magnetické ložisko a mezi ním a rotorovým vinutím musí být vakuum, které nám zajistí jednodušší konstrukci magnetického uchycení rotoru. Jako baterie se logicky nejčastěji využívá stejnosměrně, ale existují i možnosti, jak vytvořit i střídavé napětí (pomocí cyklokonvertorů nebo složitých měničů).

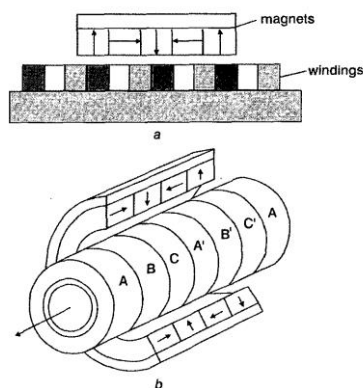


Obrázek 10: Elektromechanická baterie – převzato [21]

Teoreticky se dají využít podobné motory i v elektromobilech, jako záložní zdroje, popřípadě k zefektivnění a ke zvýšení výkonu. Toho by se dalo dosáhnout setrvačником, který by ukládal energii při brzdění či při jízdě „na volnoběh“ [23]. Na podobném principu funguje i systém KERS (systém rekuperace kinetické energie) u závodních formulí. Zde však není využito Halbachovy soustavy magnetů.

### 1.2.3.3 Lineární motory

Lineární motory jsou využity hlavně v pohybu při přenosu materiálu nebo při výrobě desek plošných spojů. Halbachovo pole zde zajišťuje rychlou akceleraci a malou setrvačnost při brzdění. V lineárních motorech se ale výhody vyplývající z Halbachovy soustavy příliš neuplatní a tedy nejsou častěji používány.



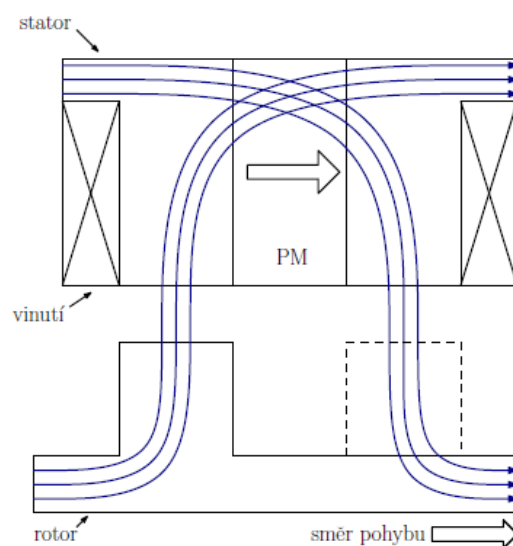
Obrázek 11: a) Lineární motor planární b) Lineární motor tubulární – převzato [13]

Mezi další aplikace, jak již bylo uvedeno výše, patří sférické motory, které se podobně jako lineární motory využívají hlavně kvůli přesnosti a malé setrvačnosti. Dále se dá Halbachova soustava magnetů využít v magnetických spojkách a ložiskách, kde nedochází ke tření [13]. Toho se využívá u vysokootáčkových motorů.

## 2 Stroje se spínaným tokem a permanentními magnety

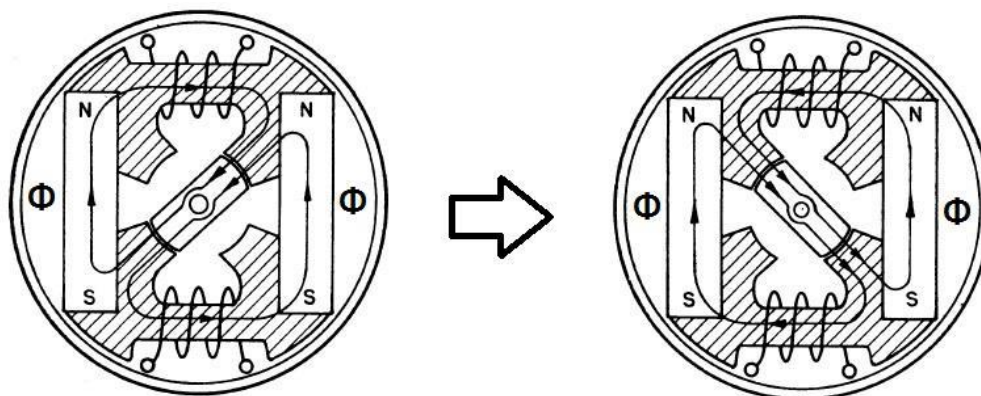
FSPM (flux-switching permanent magnet, česky stroj se spínaným tokem a permanentními magnety) stroje jsou svojí konstrukcí nejvíce podobné spínaným reluktančním strojům (SRM) [24]. Rotor mají úplně stejný, jsou to pouze od sebe izolované plechy z feromagnetika, které mají vyniklé póly. Díky tomu je rotor velmi robustní a odolný. Stator má taktéž vyniklé póly a od SRM se odlišuje tím, že na něm jsou přidány ještě permanentní magnety. Kromě PM jsou na pólech statoru ještě cívky, jež „objímají“ dva statorové zuby a magnet mezi ně vložený, tedy celý pól. Podle směru proudu cívkou je magnetické pole permanentního magnetu na jedné straně zesilováno a na druhé zeslabováno.

Magnetický tok vytvořený pomocí permanentních magnetů a vinutí na pólech se přes vzduchovou mezeru uzavírá a vytváří točivý moment na rotoru, viz Obrázek 12. Pomocí magnetů se snažíme tento tok vytvořit co největší. Snahou je co nejvíce zvýšit sílu, která působí na rotorové póly.



Obrázek 12: Princip FSPM stroje – upraveno [25]

Existuje několik variant, jak lze uložit permanentní magnety na statoru. Jednou z možností, již výše popsanou, je umístění mezi zuby statoru uvnitř pólu. Dále je lze uložit například přímo na vrchol pólu, či jen do jiné určité části [26]. Důležitá je jejich orientace tak, aby sousední PM magnetickým polem působily vždy proti sobě. Díky uložení na statoru lze permanentní magnety lépe chladit, díky čemuž pak můžeme vytvářet stroje na vyšší výkony.

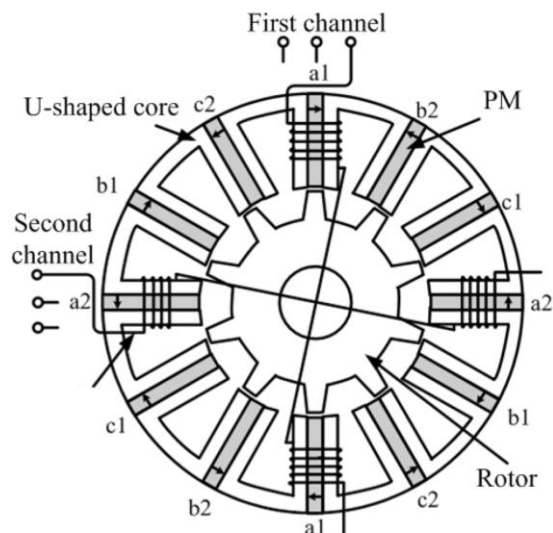


Obrázek 13: Zjednodušený FSPM stroj ukazující jeho princip – převzato [24]

První FSPM stroj byl vyroben již v roce 1955 americkými vědci k vojenským účelům [24]. Potřebovali malý stroj, který by bez chlazení byl schopen vytvořit krátkodobý špičkový výkon okolo 10 kW. Nakonec by tento stroj využit u pomocných napájecích zdrojů k navádění raket. Další jeho výhodou byla možnost dlouhodobého skladování bez ztráty funkčnosti, což byla oproti elektrochemickým bateriím jedna z největších výhod.

## 2.1 Konstrukce FSPM

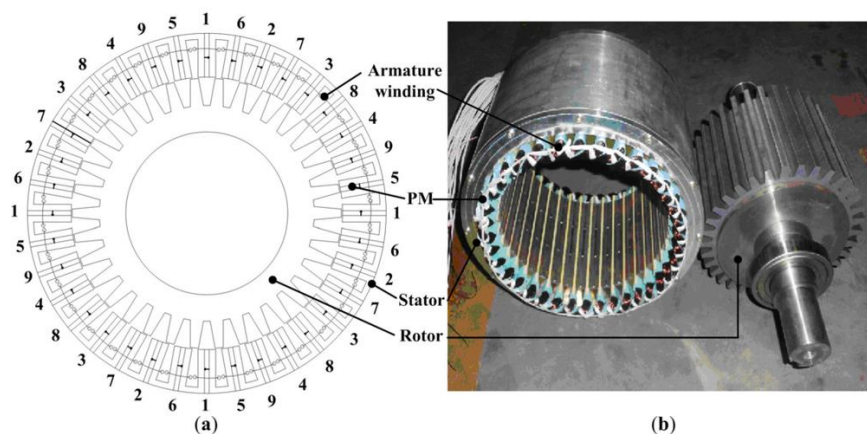
Jedna z nejzákladnějších konstrukcí strojů se spínaným tokem je třífázový FSPM 12/10, který má dvanáct statorových pólů a deset rotorových. Jak lze vidět na Obrázku 14, tak vinutí jednotlivých fází se klasicky střídá, sousední permanentní magnety jsou orientovány vždy proti sobě a jsou v celé délce statorového pólu a rotor nemá žádné vinutí, jsou to pouze od sebe izolované plechy.



Obrázek 14: Základní konfigurace FSPM 12/10 – převzato [27]

Základní možností, jak ovlivnit vlastnosti FSPM stroje, je změna počtu pólů na statoru a rotoru. Tato změna ovlivňuje polohu d-osy a q-osy, stejně tak ale ovlivňuje i frekvenci stroje, velikost indukovaného napětí a momentu, ale také třeba indukčnosti [28]. Vždy záleží na tom, na jakou aplikaci je daný stroj potřeba, nedá se říci, že by jedna z možností byla tou nejvýhodnější.

Změna vlastností je možná také změnou rozměrů PM či statorových zubů [29]. Pokud je šířka statorového zubu shodná s šířkou PM, pak se dá dosáhnout nejlepšího točivého momentu. Jak se dále může vyčíst z [29], většího momentu se u některých konfigurací dá také dosáhnout, když jho ztenčíme na 70% šířky zubu statoru. Díky tomu mohou být zmenšeny rozměry stroje. Dalšími úpravami rotorových pólů se může snížit pulzační moment.

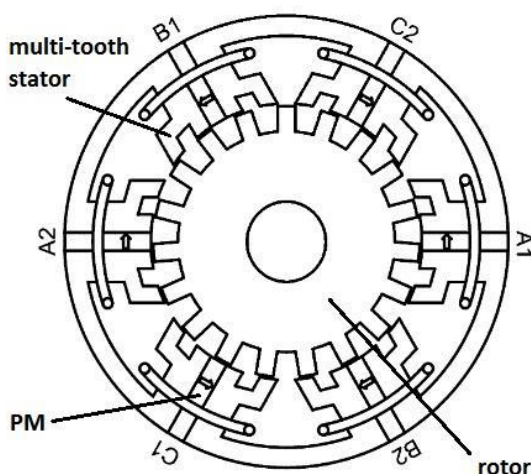


Obrázek 15: Devítifázový FSPM stroj – převzato [27]



### 2.1.1 Multi-tooth konstrukce

Multi-tooth (česky vícezubá) konstrukce se, jak již název napovídá, zaměřuje na zvýšení počtu zubů na jednom pólu [30]. Na každém pólu statoru je několik zubů, díky kterým se zlepší průběh momentu, především kvůli snížení pulzačního momentu od permanentních magnetů. Navíc se správnou konfigurací podaří zajistit i zvýšení magnetického toku, což znamená, že není potřeba tolik magnetického materiálu a celý stroj je levnější. Rotor zůstává stejný, na něm se nic nemění.

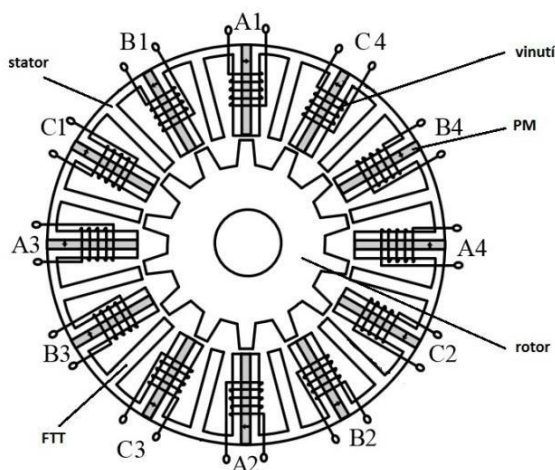


Obrázek 16: FSPM s multi-tooth konstrukcí – převzato [30]

### 2.1.2 Fault-tolerant konstrukce

Motory FSPM je někdy potřeba také využít v aplikacích, kdy není žádoucí, aby měl jakýkoliv výpadek. V určitých případech dokonce nesmí dojít k výpadku ani při poruše stroje a FSPM musí být schopno stále alespoň částečně pracovat. Je tedy potřeba nějak od sebe oddělit jednotlivé fáze vinutí, a to jak galvanicky tak i magneticky. Toho se dá dosáhnout pomocí statorových plechů do tvaru E, které jsou od sebe vzájemně izolované. Na jednom zubu vždy není vinutí a právě přes něj se uzavírá magnetický tok [31]. Anglicky se tento zub nazývá Fault-tolerant tooth (FTT), což doslova znamená chybu tolerující (snášlivý) zub. Fáze v sousedních pozicích se následně nemohou ovlivnit a stroj stále pracuje. Samozřejmě má ale v takovém případě nižší výkon [32].



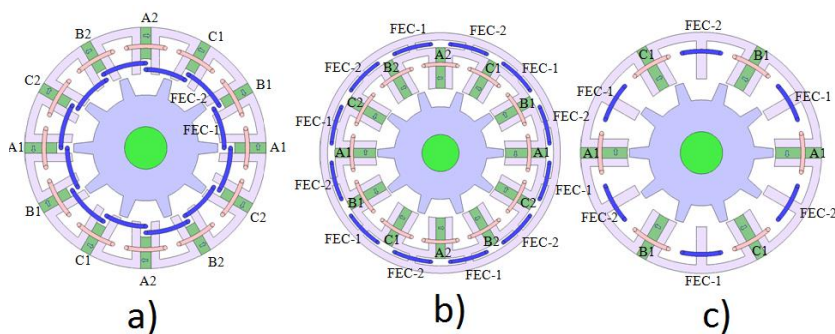


Obrázek 17: Fault-tolerant FSPM stroj – převzato [31]

Dle experimentů z univerzity v Sheffieldu [32] i u tohoto typu FSPM strojů závisí některé důležité vlastnosti na počtu zubů a počtu PM na nich. Z hlediska výkonu je výhodnější umístit permanentní magnety i na zubech, které působí jako galvanické oddělení. Dále se ukázalo, že výhodnější z hlediska průměrného momentu je varianta s pouze jedním oddělovacím zubem. Pokud jich je na statoru více, mnohonásobně se zvýší ztráty způsobené zvlněním momentu.

### 2.1.3 Konstrukce s pomocným stejnosměrným vinutím

V posledních letech se vyvíjí další možnosti, jak vytvářet lépe regulovatelné FSPM stroje. Jednou z variant je takzvaný hybridní FSPM, kde je magnetický tok vytvářen nejen permanentními magnety, ale také pomocným stejnosměrným vinutím na části statorového pólu.



Obrázek 18: Různé konstrukce pro hybridní FSPM  
 a) DC vinutí na vnitřní části pólů b) DC vinutí na vnější části statoru c) DC vinutí na pólech bez PM  
 převzato [33]

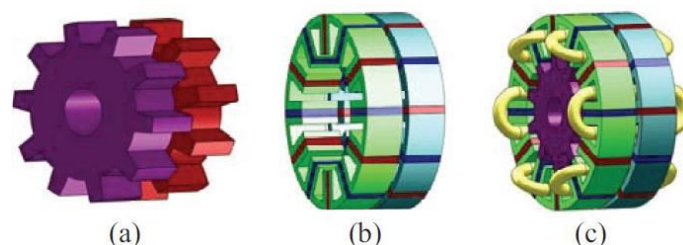
Jak je patrné z Obrázku 18, existuje několik variant, jak připojit stejnosměrné vinutí na statorové póly. Pro konstrukce a) a b) je typické, že PM již nezabírají celou délku pólu, jako tomu je u základního FSPM stroje. Pomocné vinutí totiž dokáže posílit tok vytvořený permanentním magnetem a není tedy potřeba mít tolik magnetů. Tím se dá snížit cena celého stroje [33]. Popřípadě je možné toto vinutí dát i na pól bez PM a tok tam bude také zesílen.

Hlavní nevýhodou této konstrukce je potřeba střídavého i stejnosměrného napětí, tedy nutnost elektroniky na střídání nebo naopak usměrňování napětí. Díky této elektronice je zde ale také možnost lépe regulovat takové motory a možnost vytváření lepšího průběhu momentu.

#### 2.1.4 Konstrukce s dvojitým rotorem

U FSPM strojů je obecně velká nevýhoda především ve zvlnění momentu, hlavně kvůli pulzačnímu momentu od permanentních magnetů. Jednou z možností, jak tento jev potlačit, je konstruovat rotor ze dvou částí, z nichž jedna je pootočená o jeden zub vůči té druhé (anglicky Twisted-rotor) [34]. Následně jsou uloženy za sebe. I stator musí být vytvořen ze dvou částí, které sdílejí vinutí, ale každá část má opačné polarity permanentních magnetů.

Taková konstrukce nemá vliv na výkon stroje, ale zlepšuje průběh momentu. Dále se také došlo k závěru, že lze využít pro všechny typy FSPM strojů [34].

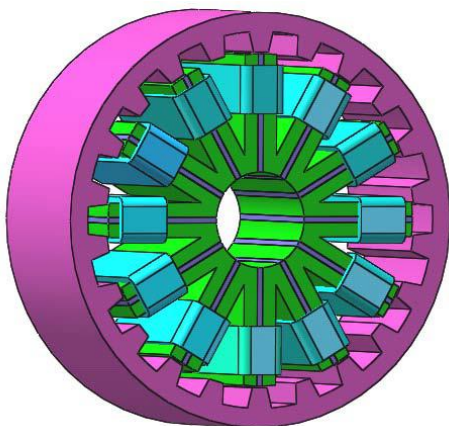


Obrázek 19: Konstruktivní uspořádání s dvojitým rotorem – převzato [34]

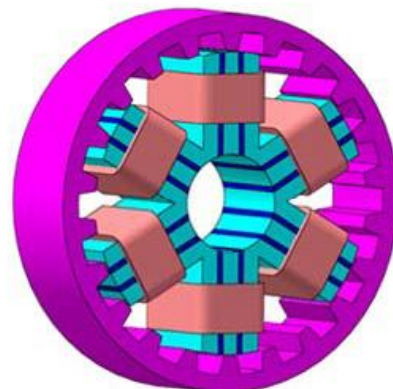
### 2.1.5 Konstrukce s vnějším rotorem

Mezi další možnosti, jak upravit FSPM stroj tak, aby byl účinnější a měl snížený pulzační moment, je konstrukce s vnějším rotorem [35]. Stator je stále stejný, má tedy póly s vinutím a permanentními magnety, tentokrát ale zaujímá místo uvnitř stroje, a rotor s póly je na obvodu, viz Obrázek 20. Nevýhodou tohoto uspořádání je složitější chlazení statoru, protože je uvnitř stroje a je tedy hůře přístupný.

V této konstrukci také došlo k vytvoření velmi efektivní konfigurace, kde se ve statoru vedle sebe vloží místo jednoho dva permanentní magnety na pól [36]. Tato konfigurace, takzvaná sandwich FSPM (S-FSPM) vykazuje vyšší moment a nižší ztráty a díky upravené konstrukci je tento stroj i lehčí.



Obrázek 20: Konstrukce FSPM s vnějším rotorem – převzato [36]



Obrázek 21: Konstrukce S-FSPM s vnějším rotorem – převzato [36]

### 2.1.6 Lineární konstrukce FSPM

Vytvoření lineárního FSPM stroje lze uskutečnit jednoduchým rozložením klasického FSPM [37]. U této konstrukce jsou patrné velké nedostatky, například nevyvážený magnetický obvod, vyšší pulzační moment či nežádoucí tažné síly. Vhodně upravenou konstrukcí se dají tyto nedostatky zmenšit, nikoliv však plně odstranit. Největší výhodou je zcela jistě zvýšení účinnosti a velká spolehlivost z důvodu odstranění mechanických

převodů. Lineární FSPM totiž nemusí převádět moment z otáčivého pohybu na tlačnou či tažnou sílu, pracuje tak přímo. Využití tedy lze především v dopravě [38].

## 2.2 Využití FSPM strojů

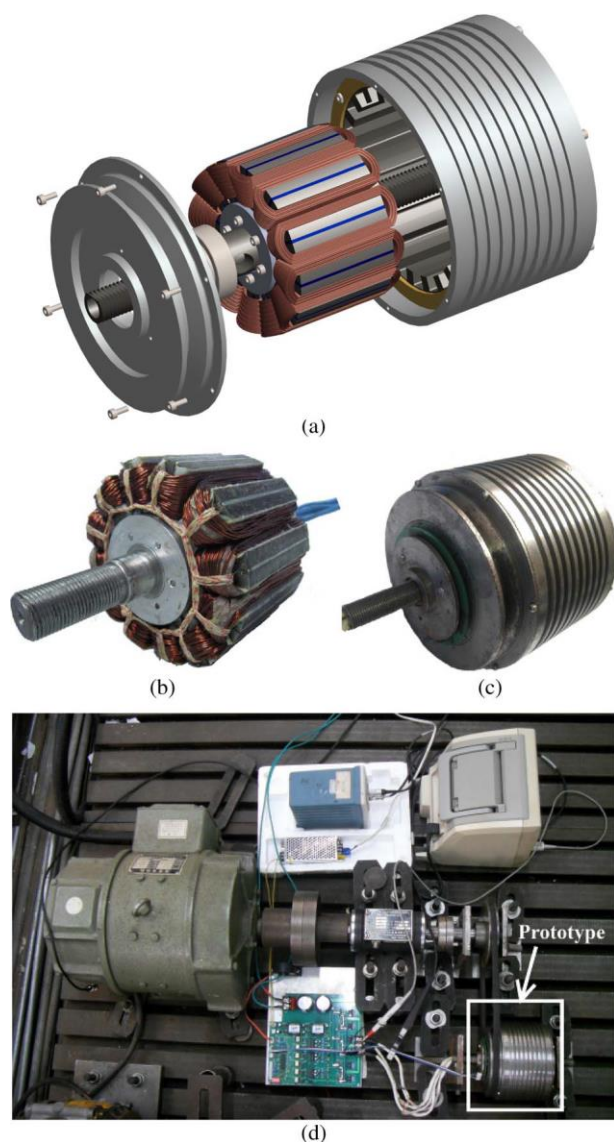
Jak již bylo řečeno výše, první aplikace FSPM stroje byla využita již v padesátých letech minulého století. V té době však permanentní magnety nedosahovaly dnešních kvalit a ani jejich cena nenahrávala k rozšíření aplikací s PM. Teprve až s příchodem kvalitnějších a technologicky lépe zpracovaných PM se mohlo naplno rozvinout využívání FSPM strojů.

Přesto, že výzkumy a vylepšení těchto strojů probíhají již několik desetiletí, stále není FSPM stroj příliš rozšířeným. Často je v tomto ohledu problémem dražší pořizovací cena kvůli permanentním magnetům.

### 2.2.1 Trakce

V elektrických vozidlech se nyní začíná rozšiřovat pohon přímo uvnitř kol, k čemuž se velmi dobře hodí FSPM stroj s vnějším rotorem [39]. Teoreticky dokáže tento stroj pracovat jako generátor i jako motor, tudíž je možné, aby se otáčelo rotorem a přes stator a magnetickou spojku by se do baterie ukládala energie, nebo naopak, magnetický tok vybuzený ze statoru může otáčet kolem. Častěji se využívá motorický stav.

Největší výhodou je velikost FSPM motoru. Jeho malé rozměry umožňují více prostoru pro pasažéry nebo pro náklad. Tento typ motoru má velkou účinnost a je schopen vytvořit velký moment [35]. Bohužel se dá zatím využít jen na lehčí náklady a pro nižší rychlosti [39].



Obrázek 22: a) Model motoru b) Stator c) Hotový FSPM motor  
d) Ukázka připojení prvního prototypu na zkušební dráze – převzato [39]

Další možností, jak využít FSPM stroje v trakci, a to převážně v kolejové dopravě, je lineární FSPM. Mezi jeho největší výhody patří rychlejší dynamika, nižší náklady než klasický FSPM, menší hluk a nižší spotřeba energie [40].

### 2.2.2 Elektromobily

Pro motory v elektromobilech je potřeba několik základních věcí. Musí být co nejmenší a nejlehčí, měly by mít velký moment a průběh momentu by měl být co nejlepší. Díky jednoduchému rotoru, permanentním magnetům na statoru a poměrně dobrým možnostem řízení se k těmto účelům začíná využívat hybridní FSPM [41], jenž byl uveden v kapitole 2.1.3. Využití FSPM motorů do elektromobilů je však zatím jen na začátku a zatím se nedá s jistotou říci, jestli bude daná konstrukce vhodná pro častější použití.

V článku z čínské univerzity z Nanjingu z roku 2015 [42] se autoři zabývali možností využít šestifázový hybridní FSPM motor a již také pracují na prvním prototypu stroje. První výsledky ukazují, že tento stroj může pracovat i při poruše, tedy jako Fault-tolerant (viz kapitola 2.1.2), a je tedy zaručena nutná bezpečnost pro využití v elektromobilech. Dále byl tento stroj porovnáván s klasickým FSPM a dle autorů práce je tento hybridní stroj efektivnější, ale za cenu toho, že je objemově větší.

### 2.2.3 Vysokootáčkové stroje

Díky tomu, že všechny části náchylné na vysoké otáčky jsou na nepohyblivém statoru a rotor je v podstatě pouze jen plech, tak se FSPM stroje hodí i na vysokorychlostní aplikace. Studie z Francie z Université Paris Sud, Cachan z roku 2014 [43] se jako jedna z prvních zabývá stejnosměrným alternátorem pracujícím až ve 12 000 ot./min. a výzkum v této oblasti zdaleka nekončí, neboť již první prototypy ukazují, že FSPM alternátor má velmi dobré vlastnosti i při těchto otáčkách. Teplotní zkoušky splňují normy a účinnost se vyrovná běžným vysokootáčkovým strojům.

### 2.2.4 Fault-tolerant stroje

Fault-tolerant FSPM stroje, jak bylo již zmíněno v kapitole 2.1.2., mají být schopné funkce i při částečném poškození či poruše. Spolu s malými rozměry a nízkou hmotností jsou tedy hlavním důvodem, proč se používají v letadlech [44]. Vzhledem k ještě většímu zvýšení bezpečnosti se vyrábějí první prototypy s větším počtem fází, než jen tři (nejčastěji pěti či šesti fázové) [45].

## 2.3 Výhody a nevýhody FSPM

Velkou výhodou je samotná konstrukce FSPM. Jednoduchý rotor umožňuje aplikace ve vysokootáčkových systémech, protože není potřeba řešit odstředivou sílu jako u jiných druhů motorů, kde se na rotoru nachází i vinutí. Odpadá tím také řešení chlazení rotoru. Další konstrukční výhodou je permanentní magnet na statoru. PM totiž se zvyšující se teplotou mohou ztratit své feromagnetické vlastnosti a je třeba je chladit. Díky jejich dostupnosti na statoru je i tento problém lehce vyřešen. Mezi další výhody patří také velký točivý moment a účinnost FSPM [46].

Bohužel i tento typ stroje má své nevýhody. Mezi největší z nich patří vyšší cena kvůli kvalitním permanentním magnetům ze vzácných zemin. Jednodušší konstrukce sice snižuje celkové náklady, ale přesto je FSPM jedním z těch dražších strojů. Další nevýhodou je patrné zvlnění momentu od permanentních magnetů. Naštěstí existují konfigurace, které dokážou tento pro stroj nepříjemný pulzační moment snížit a částečně eliminovat. Kromě toho může být průběh momentu upraven také vhodným řízením [47].

### 3 FSPM stroj s permanentními magnety v Halbachově soustavě

Tato část práce je zaměřena na spojení FSPM stroje a magnetů v konfiguraci Halbachovy soustavy s využitím programů na tvorbu modelů elektromagnetických polí. Pomocí programu FEMM budou na následujících stránkách porovnány různé konfigurace magnetů pro jednu konstrukci FSPM stroje o rozměrech viz Tabulka 1.

Tabulka 1: Rozměry modelovaného FSPM stroje

<i>počet fází</i>	3
<i>počet pólů statoru <math>P_S</math></i>	12
<i>počet pólů rotoru <math>P_R</math></i>	10
<i>vnější průměr statoru</i>	110 mm
<i>vnitřní průměr statoru</i>	70 mm
<i>vnější průměr rotoru</i>	68 mm
<i>vzduchová mezera</i>	1 mm
<i>výška statorového zubu</i>	15 mm
<i>šířka statorového zubu</i>	11 mm
<i>výška rotorového zubu</i>	9 mm
<i>šířka rotorového zubu</i>	4,5/7 mm
<i>šířka permanentního magnetu</i>	3 mm
<i>výška permanentního magnetu</i>	20 mm
<i>aktivní délka stroje</i>	42 mm

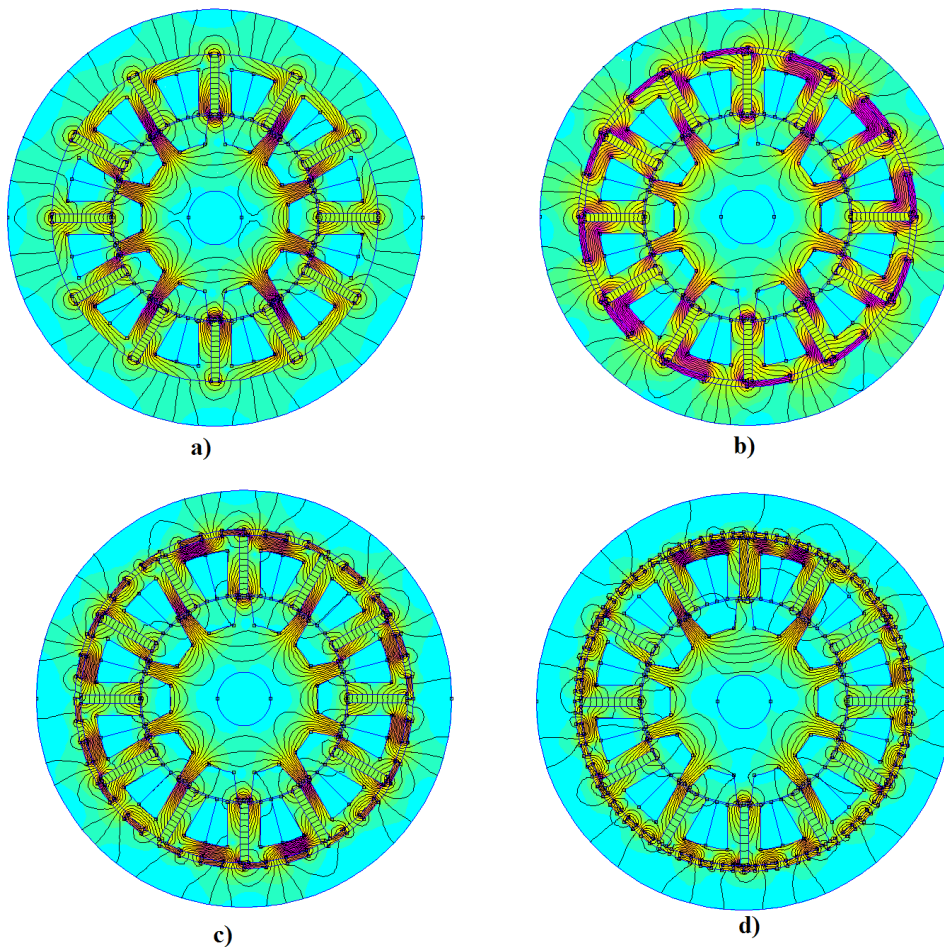
Nejdříve byl vytvořen 2D model typického zástupce FSPM stroje pomocí programu SolidWorks. Tedy stroj 12/10 (12 statorových pólů a 10 rotorových), třífázový, s permanentním magnetem na každém statorovém pólu. Pomocí programu FEMM byla po vložení materiálových, okrajových a dalších podmínek vypočítána normálová složka magnetické indukce, vytvořen obrázek rozložení magnetické indukce ve stroji a také vytvořen graf velikosti magnetické indukce ve vzduchové mezeře.

Pro každou konfiguraci PM se následně postupovalo velice podobně. Do 2D modelu FSPM stroje se na vnější část statoru přidal pás magnetů v Halbachově soustavě a následně



byly znovu po zadání podmínek vytvořeny obrázky a grafy. Právě tato část by měla ukázat, jak moc se liší jednotlivé konfigurace a zda-li má cenu vytvářet právě taková uspořádání, či jiná.

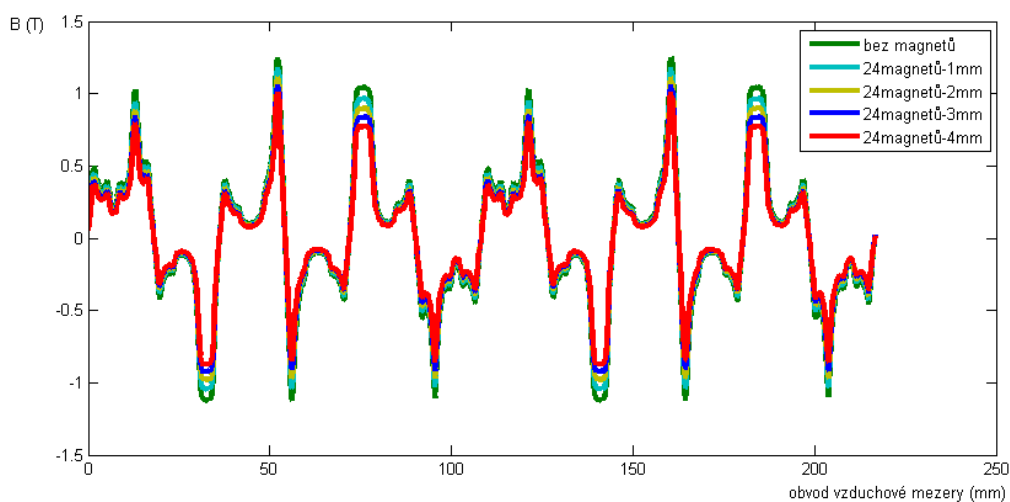
Grafy byly vytvořeny pomocí programu FEMM, kdy program vykreslil průběh magnetické indukce. K tomu bylo potřeba zvolit kružnici se středem v ose stroje a s průměrem 69 milimetrů, neboli je to kružnice přímo ve vzduchové mezeře.



Obrázek 23: Modely FSPM strojů zpracované v programu FEMM  
a) model bez magnetů s Halbachovým polem b) model s 24 magnety a tloušťkou 2mm  
c) model s 48 magnety a tloušťkou 2mm d) model s 96 magnety a tloušťkou 2mm

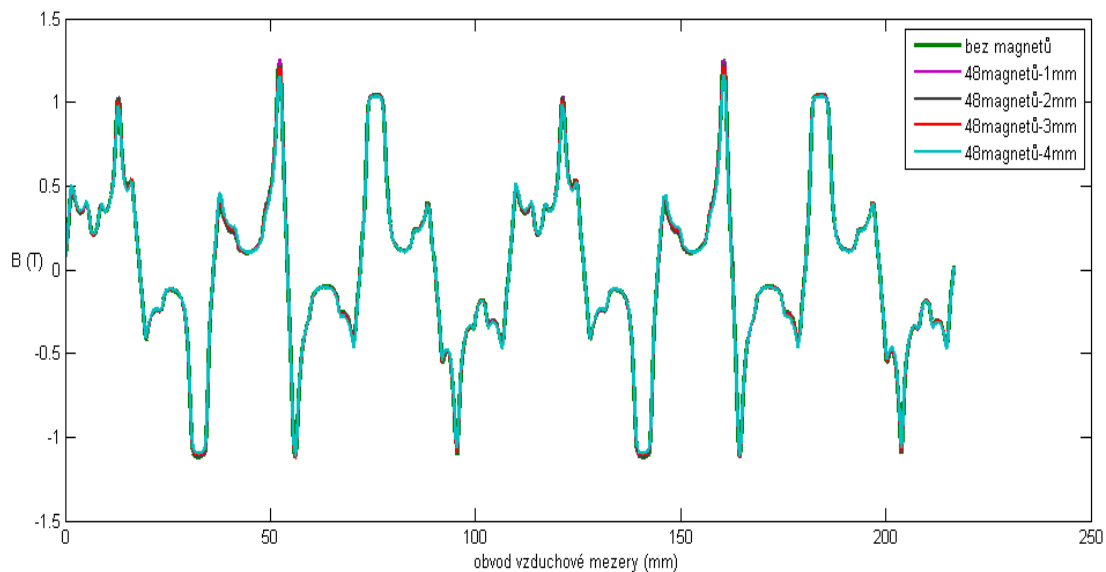
### 3.1 Závislost tloušťky magnetu na magnetické indukci ve vzduchové mezeře

Jednou z možností, jak by se měla dát ovlivnit magnetická indukce  $B$  je velikostí magnetů uspořádaných v Halbachově soustavě. Pro následující modely se vždy uvažovaly magnety o tloušťce od jednoho milimetru až do čtyř milimetrů. Tyto velikosti se porovnávaly jednotlivě u 24, 48 a 96 magnetů. Abychom mohli určit, jestli se vůbec vyplatí využít Halbachovu soustavu magnetů, porovnááme s těmito konfiguracemi i model bez PM v Halbachově soustavě na obvodu statoru.



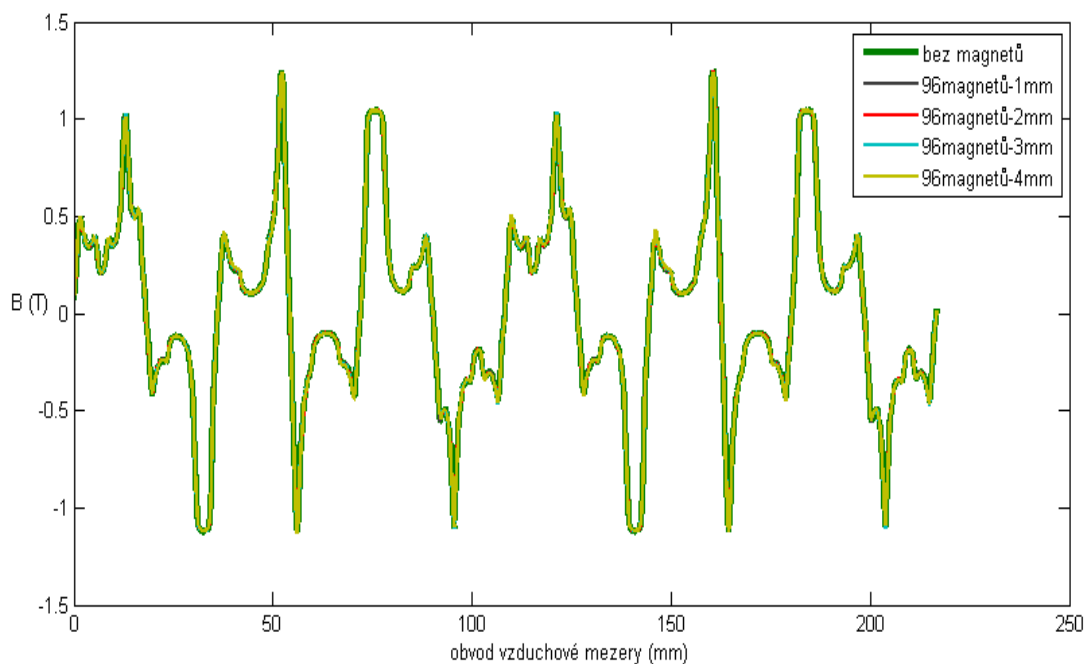
Obrázek 24: Graf průběhu magnetické indukce ve vzduchové mezeře pro 24 magnetů v Halbachově soustavě pro různé tloušťky PM

Z grafu jasně vyplývá, že 24 magnetů uložených na statoru zhoršuje výslednou magnetickou indukci a že se zvětšující se tloušťkou magnetů se tato hodnota ještě snižuje. Jako nejpravděpodobnější důvod tohoto problému se jeví příliš nízký počet permanentních magnetů, které díky tomu výsledné pole zhoršují, než aby jej zesilovaly. Kvůli jejich délce totiž v části magnetického obvodu působí proti magnetickému toku a s vyšší tloušťkou PM se tento jev ještě více zesiluje. V takovém případě je lepší raději nevyužívat PM vůbec.



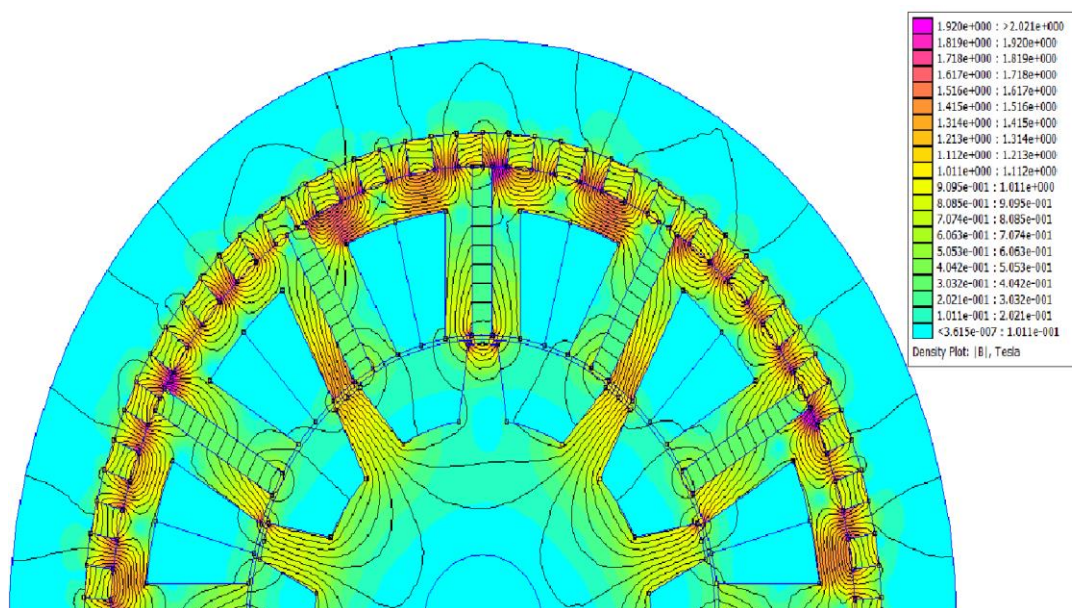
Obrázek 25: Graf průběhu magnetické indukce ve vzduchové mezeře pro 48 magnetů v Halbachově soustavě pro různé tloušťky PM

Z dalšího grafu (Obrázek 25), tentokrát pro 48 magnetů na obvodu statoru, je patrné, že magnetická indukce je ve vzduchové mezeře prakticky stejná až na místa, kde jsou nejvyšší špičky. Ve špičkách je viditelně nejsilnější pole pro jednomilimetrový PM. Znovu ale platí, podobně jako u předchozího případu, že pro čtyři milimetry je pole o něco slabší než u konstrukce bez magnetů. Vypadá to, že i pro tuto konstrukci ale není vhodné využívat permanentní magnety na vnějším obvodu statoru. Až na určité špičkové body jsou hodnoty magnetické indukce totiž vesměs stejné.

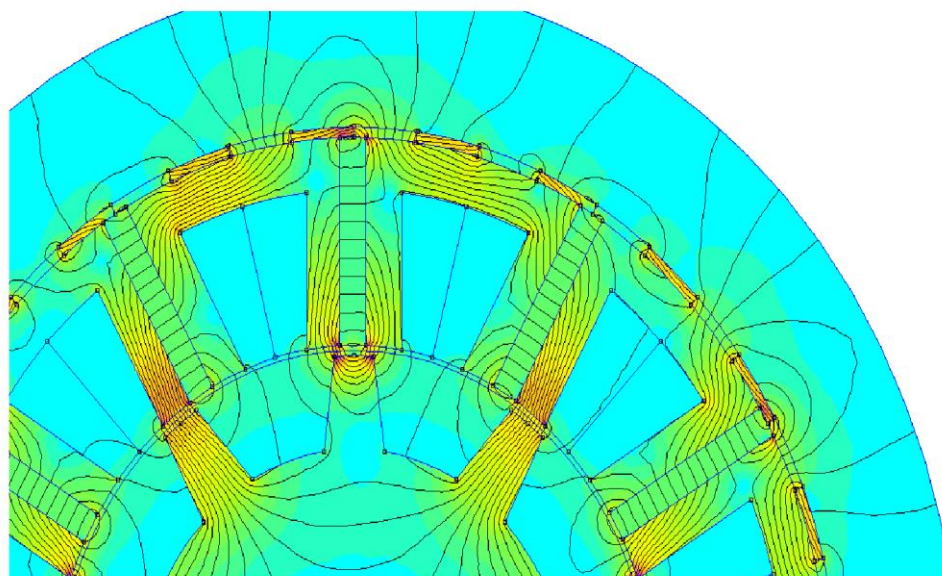


Obrázek 26: Graf průběhu magnetické indukce ve vzduchové mezeře pro 96 magnetů v Halbachově soustavě pro různé tloušťky PM

Poměrně překvapivě dopadl průběh magnetické indukce ve vzduchové mezeře FSPM stroje u konfigurace s 96 permanentními magnety. Hodnoty všech modelů s PM i hodnoty modelu bez PM se totiž liší jen nepatrně a z grafu to jasně nelze vyčíst. Z programového zápisu je možno zjistit, že odchylky jsou nejvýše v několika setinách Tesla. Proč tomu tak je by mohl objasnit následující obrázek.



a)



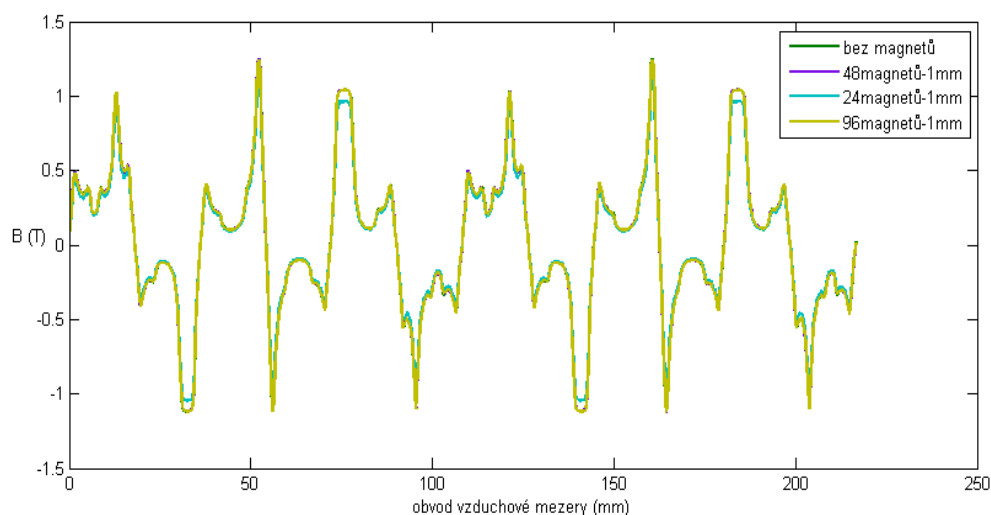
b)

Obrázek 27: Porovnání magnetických toků a) 96 a b) 48 magnetového stroje FSPM

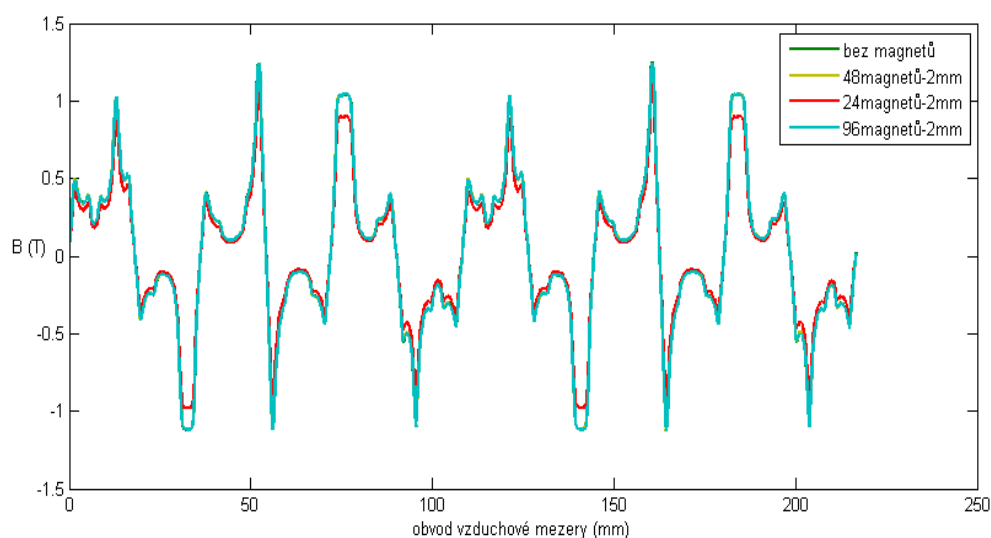
Jak je patrné z Obrázku 27, u 96 magnetového FSPM stroje je statorová část poblíž PM velmi nasycena a indukční čáry se raději uzavírají do PM, než aby pokračovaly dál přes pól do vzduchové mezery. Permanentní magnety tedy ovlivní tok a nedovolí mu, aby k rotoru pouštěl více toku, a tedy aby ve vzduchové mezeře mohla být větší normálová složka magnetické indukce. U 48 magnetů uspořádaných do Halbachovy soustavy se tento problém také objevuje, ale ne v takové míře a více indukčních čar se snaží procházet skrz statorový pól do vzduchové mezery a následně do rotoru.

### 3.2 Závislost počtu magnetů na magnetické indukci ve vzduchové mezeře

V této části budou také zobrazeny grafy průběhů magnetické indukce ve vzduchové mezeře, ale tentokrát budou porovnávány pro jednu tloušťku magnetů různé počty PM v Halbachově soustavě na vnějšku statoru. Znovu bude s nimi porovnávána i konfigurace bez magnetů.

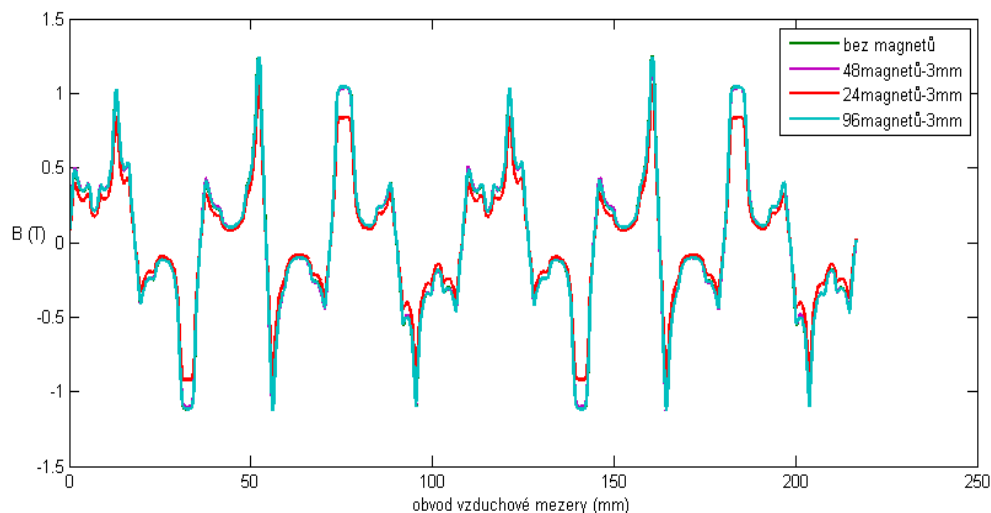


Obrázek 28: Graf průběhu magnetické indukce ve vzduchové mezeře pro různý počet PM v Halbachově uspořádání a pro jejich tloušťku 1 mm

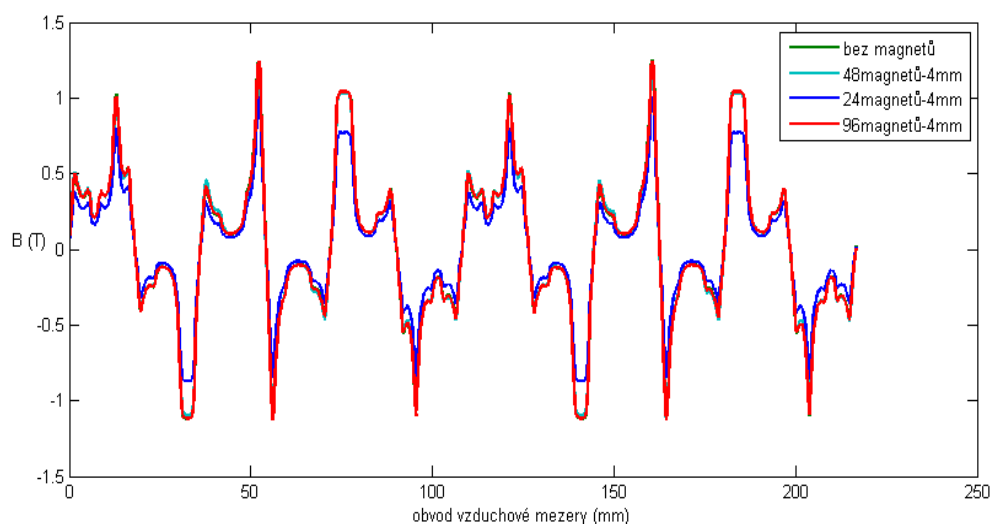


Obrázek 29: Graf průběhu magnetické indukce ve vzduchové mezeře pro různý počet PM v Halbachově uspořádání a pro jejich tloušťku 2 mm





Obrázek 30: Graf průběhu magnetické indukce ve vzduchové mezeře pro různý počet PM v Halbachově uspořádání a pro jejich tloušťku 3 mm



Obrázek 31: Graf průběhu magnetické indukce ve vzduchové mezeře pro různý počet PM v Halbachově uspořádání a pro jejich tloušťku 4 mm

Při porovnávání těchto průběhů platí vždy stejná věc. Uspořádání se 24 magnety má nejmenší velikost magnetické indukce a ostatní průběhy jsou téměř shodné. Z toho lze vyvodit, že dané konfigurace bohužel nesplňují požadavky, které by byly potřeba splnit, aby mohla některá z těchto konfigurací být využita při navrhování FSPM strojů.

### 3.3 Vyhodnocení

Namodelované výsledky ukazují, že ani jedna ze zvolených konfigurací se nehodí k stavbě FSPM strojů s Halbachovou soustavou magnetů na vnější části statoru. Zcela jasně lze vyloučit soustava s 24 permanentními magnety, kde ani pro jednu tloušťku magnetů nedosahuje velikost magnetické indukce velikosti magnetické indukce stroje bez magnetů v Halbachově soustavě. V tomto případě se dá říci, že počet PM je příliš malý a permanentní magnety musí zaujímat vždy velkou část obvodu statoru, kterou se následně uzavírá magnetický tok místo toho, aby procházel přes statorové póly do vzduchové mezery a do rotorových pólů.

U 48 magnetů na vnějším statorovém obvodu lze mluvit o kladném výsledku, neboť při této konfiguraci dochází ve špičkách magnetické indukce k vyšším hodnotám, než tomu je u konstrukce bez magnetů. Tyto rozdíly ale nejsou natolik velké (nejvýše jen několik setin T), aby se dalo hovořit o jasné výhodě a o tom, že by se tato konfigurace vyplatila. Pouze u čtyřmilimetrové konfigurace je hodnota nepatrně nižší, než u konstrukce bez magnetů.

Pro konfiguraci s 96 magnety jsou hodnoty magnetické indukce velmi podobné, dokonce tak, že to ani z grafu nelze vyčíst. Podobné jsou však nejen mezi sebou, ale také s konstrukcí bez magnetů. Pokud bychom však dostatečně přiblížili vrcholy grafu, bylo by vidět, že vyšší hodnoty mají vždy konfigurace s magnety, ale vždy jen o několik setin Tesla. Často se ale liší pořadí, pro kolik milimetrů je hodnota nejvyšší.

Konfigurace zvolené pro tuto bakalářskou práci tedy z větší části nevyhovují podmínkám, aby byla magnetická indukce vyšší pro konfigurace s PM, než bez nich.



## 4 Závěr

Tato bakalářská práce se zabývala stroji se spínaným tokem a permanentními magnety (FSPM) a možnostmi jejich úprav pomocí permanentních magnetů složených do Halbachovy soustavy. Uvedená práce měla dvě hlavní části, rešerše a vytvoření modelů.

V první, rešeršní části, bylo popsáno Halbachovo pole. Po krátkém nástinu historie vzniku tohoto magnetického pole byly vysvětleny nejběžnější geometrické konfigurace Halbachovy soustavy permanentních magnetů. Následoval přehled aplikací a výčet možností, kde by se mohlo Halbachovo pole uplatnit v budoucnosti. V tomto přehledu mimo jiné figuroval urychlovač částic, elektromechanická baterie či systém Inductrack, což je nový systém pohonu rychlovlaků.

Další kapitola se zabývala FSPM stroji, jejich vznikem, konstrukcí a využitím. Byl zde popsán princip, jakým tento stroj vlastně funguje. Protože i tento stroj, podobně jako Halbachovo pole, je poměrně novým objevem, stále se rozšiřuje oblast použití těchto strojů a přibývají nové studie. Na konci kapitoly o FSPM strojích jsou pak uvedeny výhody a nevýhody těchto strojů. Mezi největší výhody patří zcela jistě velká účinnost, zatímco mezi největší nevýhody se dá zařadit vyšší cena.

Druhá část práce byla zaměřena na modelování FSPM stroje s různými konfiguracemi magnetů uložených na vnější části statoru. Bylo vymodelováno celkově třináct modelů. Jako první byl vytvořen podle daných rozměrů 2D model FSPM stroje klasicky bez permanentních magnetů na vnějším obvodu statoru. Následovaly modely s určitým počtem PM a jejich danou tloušťkou, tedy 24 magnetů, respektive 48 a 96, a s tloušťkami jeden, dva, tři a čtyři milimetry. Pomocí programů FEMM a MATLAB byly vytvořeny grafy znázorňující velikost normálové složky magnetické indukce  $B$  vzduchovou mezerou. Následně byly porovnány výsledky.

Všechny konfigurace se 24 permanentními magnety v Halbachově soustavě se jevily jako nevhodné, jelikož každý z vytvořených modelů svými hodnotami nepřekonal hodnoty magnetické indukce stroje bez PM na vnějším obvodu statoru. U 48 PM lze výsledek považovat za částečně kladný. Pouze pro čtyřmilimetrovou konfiguraci je hodnota

magnetické indukce nepatrně nižší, než u konstrukce bez magnetů. U ostatních konfigurací jsou hlavně ve špičkách hodnoty vyšší, než pro konstrukci bez PM. Rozdíly těchto hodnot ale nejsou vyšší než pár setin Tesla, což je zanedbatelné vzhledem k vyšší ceně, kterou mají PM. Ani u 96 PM není situace lepší. Pro všechny konfigurace je magnetická indukce srovnatelná s 48 magnety na vnějším obvodu statoru. Ve špičkách jsou sice hodnoty magnetické indukce vyšší pro konfigurace s PM, ale maximálně o několik setin T.

V této bakalářské práci nebyla nalezena konfigurace, která by výrazně zvýšila magnetickou indukci ve vzduchové mezeře FSPM stroje. Většina z nabízených konfigurací naopak indukci snižovala, nebo jen nepatrně zvedla. To však neznamená, že neexistuje varianta, která by mohla magnetickou indukci výrazně pozitivně ovlivnit.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] KUČEROVÁ, Eva. *Elektrotechnické materiály*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2002. ISBN 80-7082-940-0.
- [2] MALLINSON, J. C. *One-sided fluxes – A magnetic curiosity?* [online] IEEE Transactions on Magnetics Volume 9, Issue 4, 1973 [cit. 24.4.2016] ISSN: 0018-9464 DOI:10.1109/TMAG.1973.1067714  
Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=1067714>
- [3] HALBACH, Klaus. Design of permanent multipole magnets with oriented rare earth cobalt material. *Nuclear instruments and methods*, 1980, 169.1: 1-10.
- [4] MAYER, D.; ULRYCH, B. Halbachova soustava magnetů a její modifikace. *Diagnostika '07, Pilsen: University of West Bohemia*, 2007.
- [5] DAS, Dilip K., et al. *Manufacturing Methods for Samarium Cobalt Magnets*. RAYTHEON CO WALTHAM MASS MICROWAVE AND POWER TUBE DIV, 1971.
- [6] *K&J Magnetics*. [online] Seznam magnetických materiálů [cit. 24.4.2016]  
Dostupné z: <https://www.kjmagnetics.com/specs.asp>
- [7] HALBACH, Klaus. Application of permanent magnets in accelerators and electron storage rings. *Journal of Applied Physics*, 1985, 57.8: 3605-3608.
- [8] MAYER, D. Nové možnosti magnetické levitace v dopravě. *Odborné časopisy* [online] Elektro. 12/2003 [cit. 24.4.2016] Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopca/tema/nove-moznosti-magneticke-levitace-v-doprave--14291>
- [9] POST, Richard F. *Magnetic levitation system for moving objects*. U.S. Patent No 5,722,326, 1998.
- [10] Halbach array: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- 2016 [cit. 26.4.2016]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Halbach\\_array](https://en.wikipedia.org/wiki/Halbach_array)
- [11] HILTON, J. E.; MCMURRY, S. M. An adjustable linear Halbach array. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2012, 324.13: 2051-2056.
- [12] MERRITT, Bernard T., et al. Halbach array motor/generators-A novel generalized electric machine. In: *Halbach Festschrift Symposium*. 1995.
- [13] ZHU, Z. Q.; HOWE, D. Halbach permanent magnet machines and applications: a review. In: *Electric Power Applications, IEE Proceedings-*. [online] IET, 2001. p. 299-308. [cit. 26.4.2016] ISSN: 1350-2352 DOI: 10.1049/ip-epa:20010479  
Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=939612>
- [14] LI, Hongfeng; XIA, Changliang. Halbach array magnet and its application to pm spherical motor. In: *Electrical Machines and Systems, 2008. ICEMS 2008. International Conference on*. [online] IEEE, 2008. p. 3064-3069. [cit. 26.4.2016] E-ISBN: 978-7-5062-9221-4 Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=4771280>
- [15] FELDHAUS, Josef; ARTHUR, John; HASTINGS, J. B. X-ray free-electron lasers. *Journal of Physics B: Atomic, molecular and optical physics*, [online] 2005, 38.9: S799. [cit. 27.4.2016] Dostupné z: <http://www.spire.siac.stanford.edu/pubs/siacpubs/12250/siac-pub-12342.pdf>
- [16] SALISBURY, David F. Laser light from Free-Electron Laser used for first time in human Sumery In: *Vanderbilt.edu* [online] [cit. 27.4.2016] Dostupné z:

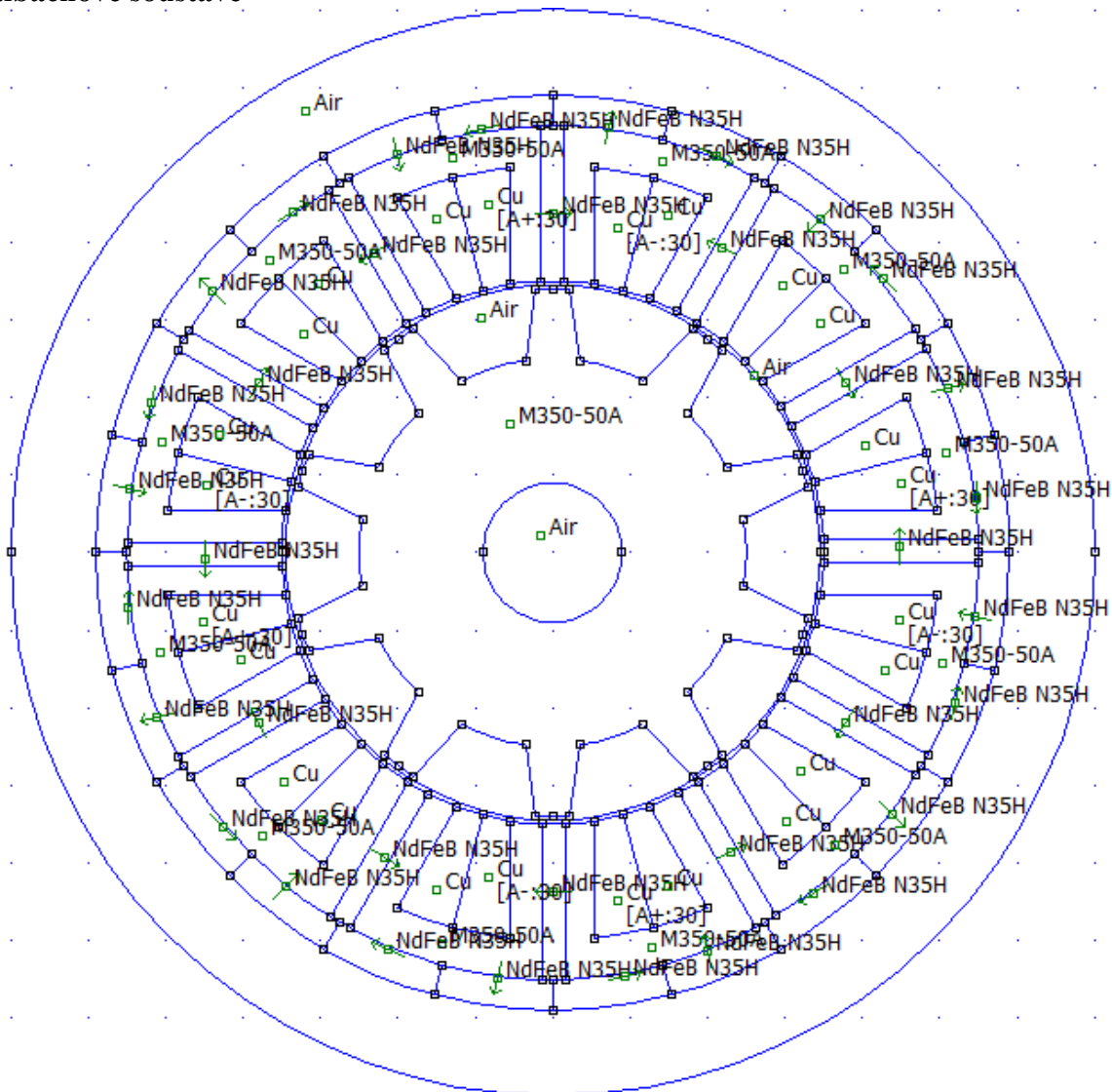
- [http://www.vanderbilt.edu/News/register/Jan10\\_00/story5.html](http://www.vanderbilt.edu/News/register/Jan10_00/story5.html)
- [17] FRANK, M. Femtosecond X-ray diffraction from two-dimensional protein crystals In: *IUCrJ* Vol. 1 Part 2 3/2014 95-100 [online] [cit. 27.4.2016] ISSN: 2052-2525 Dostupné z: <http://journals.iucr.org/m/issues/2014/02/00/cw5002/index.html#oidb>
- [18] Boeing.com: *Boeing Completes Preliminary Design of Free Electron Laser Weapon System* [online] [cit. 27.4.2016] Dostupné z: <http://boeing.mediaroom.com/2010-03-18-Boeing-Completes-Preliminary-Design-of-Free-Electron-Laser-Weapon-System>
- [19] POST, Richard F.; RYUTOV, Dmitri D. The Inductrack: a simpler approach to magnetic levitation. *Applied Superconductivity, IEEE Transactions on*, [online] 2000, 10.1: 901-904. [cit. 30.4.2016] ISSN: 1051-8223 DOI: 10.1109/77.828377 Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=828377>
- [20] KRATZ, Robert; POST, Richard F. A-current electro-dynamic levitation system. *Applied Superconductivity, IEEE Transactions on*, [online] 2002, 12.1: 930-932. [cit. 30.4.2016] ISSN: 1051-8223 DOI: 10.1109/TASC.2002.1018551 Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=1018551>
- [21] *Science and technology review of Lawrence Livermore National Laboratory* [online] [cit. 30.4.2016] Dostupné z: <https://str.llnl.gov>
- [22] ATALLAH, K.; HOWE, David. The application of Halbach cylinders to brushless AC servo motors. *Magnetics, IEEE Transactions on*, [online] 1998, 34.4: 2060-2062. [cit. 30.4.2016] ISSN: 0018-9464 DOI: 10.1109/20.706795 Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=706795>
- [23] HOWE, D., et al. Flywheel peak power buffer for electric/hybrid vehicles. In: *Electric Machines and Drives, 1999. International Conference IEMD'99*. [online] IEEE, 1999. p. 508-510. [cit. 30.4.2016] ISBN: 0-7803-5293-9 DOI: 10.1109/IEMDC.1999.769160 Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=769160>
- [24] RAUCH, S. E.; JOHNSON, L. J. Design principles of flux-switch alternators [includes discussion]. *Power apparatus and systems, part iii. transactions of the american institute of electrical engineers*, [online] 1955, 74.3. [cit. 30.4.2016] ISSN: 0097-2460 DOI: 10.1109/AIEEPAS.1955.4499226 Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=4499226>
- [25] ILHAN, E., et al. Analytical hybrid model for flux switching permanent magnet machines. *Magnetics, IEEE Transactions on*, [online] 2010, 46.6: 1762-1765. [cit. 30.4.2016] ISSN: 0018-9464 DOI: 10.1109/TMAG.2010.2042579 Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=5467404>
- [26] ZHU, Z. Q.; CHEN, J. T. Advanced flux-switching permanent magnet brushless machines. *IEEE Transactions on Magnetics*, [online] 2010, 46.6: 1447-1453. [cit. 30.4.2016] ISSN: 0018-9464 DOI: 10.1109/TMAG.2010.2044481
- [27] *MDPI* [online] [cit. 30.4.2016] Dostupné z: [mdpi.com](http://mdpi.com)
- [28] LIU, Hui, Yu WANG, Zhiquan DENG a Lucheng SONG. Comparison of FSPM topologies applied in open-winding wind power system. In: *2014 9th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications* [online]. IEEE, 2014, s. 1527-1532 [cit. 2.5.2016]. DOI: 10.1109/ICIEA.2014.6931411. ISBN 978-1-4799-4315-9. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6931411>
- [29] ZHU, Z.Q., Y. PANG, J. T. CHEN, Z.P. XIA a D. HOWE. Influence of design parameters on output torque of flux-switching permanent magnet machines. In: *2008 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference* [online]. IEEE, 2008, s. 1-6 [cit. 2.5.2016]. DOI: 10.1109/VPPC.2008.4677782. ISBN 978-1-4244-1848-0.

- Dostupné z:  
<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4677782>
- [30] CHEN, J.T., Z.Q. ZHU a D. HOWE. Stator and Rotor Pole Combinations for Multi-Tooth Flux-Switching Permanent-Magnet Brushless AC Machines. *IEEE Transactions on Magnetics* [online]. 2008, 44(12), 4659-4667 [cit. 2.5.2016]. DOI: 10.1109/TMAG.2008.2004264. ISSN 0018-9464. Dostupné z:  
<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4711310>
- [31] ZHAO, Wenxiang, et al. Electromagnetic analysis of a modular flux-switching permanent-magnet motor using finite-element method. *Progress In Electromagnetics Research B*, [online] 2012, 43: 239-253. [cit. 2.5.2016] Dostupné z: <http://www.jpier.org/PIERB/pierb43/13.12062908.pdf>
- [32] OWEN, R. L., Z. Q. ZHU, A. S. THOMAS, G. W. JEWELL a D. HOWE. Fault-Tolerant Flux-Switching Permanent Magnet Brushless AC Machines. In: *2008 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting* [online]. IEEE, 2008, s. 1-8 [cit. 3.5.2016]. DOI: 10.1109/08IAS.2008.56. ISBN 978-1-4244-2278-4. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4658844>
- [33] SULAIMAN, E., N. S. M. AMIN, Z. A. HUSIN, M. Z. AHMAD a T. KOSAKA. Design study and analysis of hybrid excitation flux switching motor with DC excitation in radial direction. In: *2013 IEEE 7th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO)* [online]. IEEE, 2013, s. 40-45 [cit. 3.5.2016]. DOI: 10.1109/PEOCO.2013.6564512. ISBN 978-1-4673-5074-7. Dostupné z:  
<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6564512>
- [34] XIE, De'e, Yu WANG a Zhiquan DENG. FSPM machines with twisted-rotor structure. In: *2014 9th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications* [online]. IEEE, 2014, s. 1533-1538 [cit. 2016-05-27]. DOI: 10.1109/ICIEA.2014.6931412. ISBN 978-1-4799-4315-9. Dostupné z:  
<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6931412>
- [35] WANG, Yu, Meng-Jia JIN, Jian-Xin SHEN, W. Z. FEI a P. C. K. LUK. An outer-rotor flux-switching permanent magnet machine for traction applications. In: *2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition* [online]. IEEE, 2010, s. 1723-1730 [cit. 3.5.2016]. DOI: 10.1109/ECCE.2010.5618120. ISBN 978-1-4244-5286-6. Dostupné z:  
<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5618120>
- [36] DAI, Mingyue, Li QUAN, Xiaoyong ZHU, Zixuan XIANG a Huawei ZHOU. Design of a sandwiched flux switching permanent magnet machine with outer-rotor configuration. In: *2014 IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)* [online]. IEEE, 2014, s. 1-5 [cit. 3.5.2016]. DOI: 10.1109/ITEC-AP.2014.6941226. ISBN 978-1-4799-4239-8. Dostupné z:  
<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6941226>
- [37] CAO, Ruiwu, Ming CHENG a Wei HUA. Investigation and General Design Principle of a New Series of Complementary and Modular Linear FSPM Motors. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* [online]. 2013, 60(12), 5436-5446 [cit. 3.5.2016]. DOI: 10.1109/TIE.2012.2230605. ISSN 0278-0046. Dostupné z:  
<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6365807>
- [38] ZHANG, Bangfu, Ming CHENG, Ruiwu CAO, Yi DU a Gan ZHANG. Analysis of Linear Flux-Switching Permanent Magnet Motor Using Response Surface Methodology. *IEEE Transactions on Magnetics* [online]. 2014, 50(11), 1-4 [cit. 4.5.2016]. DOI: 10.1109/TMAG.2014.2334060. ISSN 0018-9464. Dostupné z:  
<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6971304>

- [39] FEI, Weizhong, Patrick Chi Kwong LUK, Jian Xin SHEN, Yu WANG a Mengjia JIN. A Novel Permanent-Magnet Flux Switching Machine With an Outer-Rotor Configuration for In-Wheel Light Traction Applications. *IEEE Transactions on Industry Applications* [online]. 2012, 48(5), 1496-1506 [cit. 4.5.2016]. DOI: 10.1109/TIA.2012.2210009. ISSN 0093-9994. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6248208>
- [40] CAO, Ruiwu, Ming CHENG, Chris MI, Wei HUA, Xin WANG a Wenxiang ZHAO. Modeling of a Complementary and Modular Linear Flux-Switching Permanent Magnet Motor for Urban Rail Transit Applications. *IEEE Transactions on Energy Conversion* [online]. 2012, 27(2), 489-497 [cit. 4.5.2016]. DOI: 10.1109/TEC.2012.2190985. ISSN 0885-8969. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6187724>
- [41] WEI HUA, MING CHENG a GAN ZHANG. A Novel Hybrid Excitation Flux-Switching Motor for Hybrid Vehicles. *IEEE Transactions on Magnetics* [online]. 2009, 45(10), 4728-4731 [cit. 4.5.2016]. DOI: 10.1109/TMAG.2009.2022497. ISSN 0018-9464. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5257019>
- [42] ZHANG, Gan, Wei HUA, Peng SU, Jinguo LIAO a Ming CHENG. Design and analysis of two six-phase hybrid-excitation flux-switching machines for electric vehicles. In: *2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)* [online]. IEEE, 2015, s. 6918-6925 [cit. 4.5.2016]. DOI: 10.1109/ECCE.2015.7310629. ISBN 978-1-4673-7151-3. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=7310629>
- [43] GAUSSENS, Benjamin, Emmanuel HOANG, Michel LECRIVAIN, Philippe MANFE a Mohamed GABSI. A Hybrid-Excited Flux-Switching Machine for High-Speed DC-Alternator Applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* [online]. 2014, 61(6), 2976-2989 [cit. 4.5.2016]. DOI: 10.1109/TIE.2013.2281152. ISSN 0278-0046. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6594811>
- [44] RAMINOSOA, Tsarafidy, Chris GERADA a Michael GALEA. Design Considerations for a Fault-Tolerant Flux-Switching Permanent-Magnet Machine. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* [online]. 2011, 58(7), 2818-2825 [cit. 4.5.2016]. DOI: 10.1109/TIE.2010.2070782. ISSN 0278-0046. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5559433>
- [45] THOMAS, A.S., Z.Q. ZHU, R.L. OWEN, G.W. JEWELL a D. HOWE. Multiphase Flux-Switching Permanent-Magnet Brushless Machine for Aerospace Application. *IEEE Transactions on Industry Applications* [online]. 2009, 45(6), 1971-1981 [cit. 8.5.2016]. DOI: 10.1109/TIA.2009.2031901. ISSN 0093-9994. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5238623>
- [46] LI, Dawei, Ronghai QU, Jian LI, Wei XU a Leilei WU. Synthesis of Flux Switching Permanent Magnet Machines. *IEEE Transactions on Energy Conversion* [online]. 2016, 31(1), 106-117 [cit. 11.5.2016]. DOI: 10.1109/TEC.2015.2458312. ISSN 0885-8969. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=7202878>
- [47] HUA, Wei, Gan ZHANG a Ming CHENG. Flux-Regulation Theories and Principles of Hybrid-Excited Flux-Switching Machines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* [online]. 2015, 62(9), 5359-5369 [cit. 11.5.2016]. DOI: 10.1109/TIE.2015.2407863. ISSN 0278-0046. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=7051263>

## Přílohy

### Příloha A – Model v programu FEMM s podmínkami – 24 magnetů o tloušťce 4 mm v Halbachově soustavě



**Příloha B – Vykreslený průběh magnetické indukce na modelu 24 magnetů o tloušťce 4 mm v Halbachově soustavě**

