

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Návrh tokem přepínaného stroje s permanentními
magnety**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jiří NEPRAŠ**
Osobní číslo: **E13N0010K**
Studijní program: **N2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Návrh tokem přepínaného stroje s permanentními magnety**
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

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

1. Detailně popište tokem přepínaný motor s permanentními magnety (FSPM).
2. Popište různé druhy používaných permanentních magnetů.
3. Vytvořte návrh FSPM stroje.
4. Vytvořte konečně-prvkový model FSPM stroje a proveďte simulaci magnetického obvodu.
5. Proveďte výpočet momentu a indukovaného napětí ve stroji.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

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

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Pavel Světlík


Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání diplomové práce: 15. října 2015

Termín odevzdání diplomové práce: 16. května 2016


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




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

V Plzni dne 15. října 2015

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na tokem spínané stroje s permanentními magnety – FSPM. V úvodu práce jsou popisovány permanentní magnety, jejich fyzikální podstata, materiály používané pro výrobu permanentních magnetů a jejich charakteristické vlastnosti. V následující kapitole je popsáno zařazení FSPM strojů, jejich vznik a princip jejich činnosti. Dále je popisován základní postup návrhu FSPM stroje, nejdříve jako obecné stanovení postupu a základních rovnic, následně je popisován konkrétní návrh FSPM stroje s rozložením pólů 12/14. Pro navržený stroj je vytvořen 3D a 2D model, na základě 2D modelu je provedena simulace rozložení magnetické indukce v programu FEMM, a také simulace průběhu indukovaného napětí a momentu stroje. Hlavní simulované parametry jsou porovnány s parametry stroje se stejným statorem a desetipólovým rotorem.

Klíčová slova

Stroje s permanentními magnety, tokem spínané stroje s permanentními magnety, stroje s permanentními magnety ve statoru, permanentní magnety, FEMM, SolidWorks.

Abstract

Submitted master thesis is focused on flux-switching permanent magnet machine - FSPM. In the introduction of the thesis describes permanent magnets, the physical nature, materials used for the manufacture of permanent magnets and their characteristics. The next chapter there is the inclusion of FSPM machine, their origin and operation principle described. It is also described the basic design methodology of FSPM machine, first as a general determination of process and the basic equations, consequently concrete FSPM machine proposal with the pole layout 12/14. For the proposed machine 2D and 3D models are formed; simulation of magnetic induction distribution in FEMM, and simulation of the Induced-back electromotive force and torque of the machine is performed on the basis of the 2D model. Main simulated parameters are compared with parameters of the machine with the same stator and ten-pole rotor.

Key words

Machines with permanent magnets, flux switching machines with permanent magnet machines with permanent magnets in the stator, the permanent magnets , FEMM, SolidWorks.

Prohlášení

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

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

.....

Podpis

V Plzni dne 16.5.2016 Jiří Nepraš

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Pavlovi Světlíkovi. Za cenné profesionální rady, vstřícnost, trpělivost a ochotu při konzultacích, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH.....	1
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	4
ÚVOD	6
1 PERMANENTNÍ MAGNETY	7
1.1 MAGNETISMUS	7
1.2 ROZDĚLENÍ LÁTEK DLE POMĚRNÉ PERMEABILITY	8
1.2.1 Diamagnetické látky.....	9
1.2.2 Neutrální látky.....	9
1.2.3 Paramagnetické látky.....	10
1.2.4 Feromagnetické látky.....	10
1.3 MATERIÁLY PERMANENTNÍCH MAGNETŮ.....	12
1.3.1 Keramické permanentní magnety.....	12
1.3.2 Feritové magnety.....	12
1.3.3 AlNiCo.....	13
1.3.4 Samarium-kobaltové magnety.....	13
1.3.5 Neodymové magnety.....	14
1.4 CHARAKTERISTICKÉ VLASTNOSTI MAGNETICKÝCH MATERIÁLŮ	14
1.4.1 Hysterezní křivka.....	14
1.4.2 Remanence	15
1.4.3 Koercitivita.....	15
1.4.4 Maximální součin HB_{max}	16
1.4.5 Magnetická polarizace.....	16
1.4.6 Curieova teplota.....	16
1.4.7 Porovnání základních fyzikálních vlastností permanentních magnetů.....	16
2 TOKEM SPÍNANÝ STROJ S PERMANENTNÍMI MAGNETY (FSPM).....	18
2.1 RELUKTANČNÍ STROJE	18
2.1.1 Princip reluktančních strojů	18
2.1.2 Vznik točivého momentu.....	19
2.1.3 Synchronní reluktanční stroj.....	19

2.1.4	<i>Spínaný reluktanční stroj</i>	20
2.2	TOKEM SPÍNANÉ STROJE S PERMANENTNÍMI MAGNETY	21
2.2.1	<i>Princip činnosti FSPM stroje</i>	23
2.2.2	<i>Model magnetického toku pomocí soustředěných parametrů</i>	24
2.2.3	<i>Varianty FSPM stroje</i>	26
3	NÁVRH FSPM STROJE 12 / 14	29
3.1	OBEČNÝ POSTUP NÁVRHU FSPM STROJE.....	29
3.1.1	<i>Počet pólů</i>	29
3.1.2	<i>Hlavní rozměry stroje</i>	30
3.1.3	<i>Rozložení statoru</i>	32
3.1.4	<i>Rozložení rotoru</i>	34
3.1.5	<i>Výpočet vinutí statoru</i>	34
3.1.6	<i>Volba permanentního magnetu</i>	35
3.1.7	<i>Proud vinutím stroje</i>	35
3.1.8	<i>Příkon stroje</i>	36
3.1.9	<i>Rychlost stroje</i>	36
3.1.10	<i>Magnetická indukce ve vzduchové mezeře</i>	37
3.1.11	<i>Hmotnost stroje</i>	37
3.2	NÁVRH FSPM STROJE 12 / 14	40
3.2.1	<i>Rozložení statoru</i>	40
3.2.2	<i>Rozložení rotoru</i>	44
3.2.3	<i>Volba permanentního magnetu</i>	45
3.2.4	<i>Hmotnost stroje</i>	46
3.2.5	<i>Rychlost otáčení</i>	48
3.2.6	<i>Proud vinutím</i>	48
3.2.7	<i>Předpokládaný příkon stroje</i>	48
3.2.8	<i>Předpokládaný mechanický výkon</i>	48
3.2.9	<i>Rekapitulace zvolených a vypočítaných rozměrů</i>	50
3.2.10	<i>3D model</i>	51
4	KONEČNĚ PRVKOVÝ MODEL FSPM STROJE	52
5	INDUKOVANÉ NAPĚTÍ A MOMENT STROJE FSPM 12/14	54

5.1	INDUKOVANÉ NAPĚTÍ.....	54
5.1.1	<i>Porovnání indukovaného napětí FSPM stroje 12/14 a 12/10.....</i>	<i>57</i>
5.2	TOČIVÝ MOMENT STROJE FSPM 12/14	60
6	ZÁVĚR.....	62
	BIBLIOGRAFIE	64
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	67
	PŘÍLOHY	1
	PŘÍLOHA A - TECHNICKÝ LIST - PERMANENTNÍ MAGNETY NDFeB	1
	PŘÍLOHA B - LUA SKRIPT – VÝPOČET INDUKOVANÉHO NAPĚTÍ.....	2
	PŘÍLOHA C - LUA SKRIPT – VÝPOČET MOMENTOVÉ CHARAKTERISTIKY	3
	PŘÍLOHA D - ROZLOŽENÍ STROJE FSPM 12/14	4
	PŘÍLOHA E - ROZLOŽENÍ STROJE FSPM 12/10	5
	PŘÍLOHA F – 3D MODEL FSPM 12/10.....	6

Seznam symbolů a zkratek

B	[T]	Magnetická indukce
δ	[mm]	Šířka vzduchové mezery
A_s	[A.m ⁻¹]	Lineární proudová hustota
B_g	[T]	Maximální indukce ve vzduchové mezeře
D_h	[mm]	Průměr hřídele
D_s	[mm]	Vnitřní průměr stroje
$e(t)$	[V]	Napětí (okamžitá hodnota)
E_m	[V]	Maximální hodnota napětí
H	[A.m ⁻¹]	Intenzita magnetického pole
HB_{\max}	[kJ.m ⁻³]	Maximální energetický součin
H_r	[mm]	Výška rotorového pólu
H_s	[mm]	Výška magnetické obvodu statoru
$i(t)$	[A]	Proud (okamžitá hodnota)
I_1	[A]	Proud jedním vodičem vinutí
I_c	[A]	Celkový proud vinutím
I_m	[A]	Maximální hodnota proud
J	[A.m ⁻²]	Proudová hustota
J_p	[T]	Magnetická polarizace
k_1, k_2	[-]	Celá čísla
k_b	[-]	Koeficient zohledňující ztráty v železe
$k_{\text{čv}}$	[-]	Koeficient čela vinutí
K_f	[-]	Činitel rozptylu
k_{fe}	[-]	Koeficient plnění železa
K_i	[-]	Činitel zkreslení proudu
k_m	[-]	Koeficient celkové hmotnosti
K_p	[-]	Činitel zkreslení výkonu
k_p	[-]	Koeficient plnění
l_{cu}	[mm]	Je střední délka jednoho závitu
l_{cuc}	[mm]	Je celková délka vinutí jedné cívky
l_{ef}	[mm]	Efektivní délka stroje
l_{pm}	[mm]	Šířka permanentního magnetu
l_r	[mm]	Horní šířka rotorového pólu
l_s	[mm]	Vnitřní šířka oblasti vinutí
l_{st}	[mm]	Šířka pólu statorového pólu
m	[-]	Počet fází
m_{cu}	[kg]	Hmotnost vinutí
m_h	[kg]	Hmotnost hřídele
m_{PM}	[kg]	Hmotnost permanentních magnetů

m_r	[kg]	Hmotnost rotoru
m_{sp}	[kg]	Hmotnost statorových plechů
N	[ot.min ⁻¹]	Otáčky rotoru
N_ω	[-]	Počet závitů vinutí na fázi
p_r	[-]	Počet pólů rotoru
p_s	[-]	Počet pólů statoru
S_{cu}	[mm ²]	Plocha pro jedno vinutí
S_{cuc}	[mm ²]	Celková plocha pro uložení vinutí
S_v	[mm ²]	Průřez vodiče vinutí
T	[s]	Perioda
T_s	[mm]	Celková délka pro jedno vinutí statoru
U_i	[V]	Indukované napětí
V_{cu}	[mm ⁻³]	Objem vinutí
V_h	[mm ⁻³]	Objem hřídele
V_r	[mm ⁻³]	Objem rotorových plechů
V_{sp}	[mm ⁻³]	Objem statorových plechů
y	[-]	Počet odečítaných vzorků, z FEMM
α_s	[-]	Činitel pólového krytí
β	[rad]	Úhel pootočení rotoru
η	[-]	Účinnost
μ	[H.m ⁻¹]	Absolutní permeabilita
μ_0	[H.m ⁻¹]	Permeabilita vakua
μ_r	[-]	Poměrná permeabilita
ρ_{cu}	[kg.m ⁻³]	Hustota mědi
ρ_h	[kg.m ⁻³]	Hustota materiálu hřídele
ρ_{PM}	[kg.m ⁻³]	Hustota permanentního magnetu
ρ_{sp}	[kg.m ⁻³]	Hustota statorových plechů
ω_r	[rad.s ⁻¹]	Úhlová rychlost rotoru
ω_s	[rad.s ⁻¹]	Úhlová rychlost magnetického pole statoru
Φ	[Wb]	Magnetický tok

Úvod

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na tokem spínané stroje s permanentními magnety. Její text je rozdělen do pěti částí;

První část se zabývá základními vlastnostmi a druhy permanentních magnetů, jejich fyzikální podstatou a materiály, které se pro jejich výrobu používají.

V druhé části jsou popisovány reluktanční stroje, jejich princip a základní druhy. Následně jsou popisovány tokem přepínané stroje s permanentními magnety - FSPM stroje, které z reluktančních strojů vycházejí. Při popisu FSPM strojů je práce zaměřena na jejich vznik, princip činnosti a varianty těchto strojů.

Třetí část popisuje základní postup návrhu FSPM stroje, nejdříve obecně a následně je počítán konkrétní návrh FSPM stroje 12/14. Při návrhu jsou uvažovány jako hlavní kritérium rozměry stroje. Nejdříve jsou počítány rozměry magnetických obvodů stroje – statorové a rotorové plechy a rozměry permanentních magnetů, následně statorové vinutí, rychlost otáčení stroje a hmotnost stroje. Závěrem kapitoly je počítán předpokládaný mechanický výkon a presentován vytvořený 2D a 3D model.

Ve čtvrté části je popisováno sestavení konečně prvkového modelu z 2D modelu stroje a je provedena simulace rozložení magnetické indukce v programu FEMM. Dále je prováděna simulace otáčení rotoru stroje, změna pozice rotorového pólu je o pólou rozteč rotoru. Z této simulace je odečítán průběh magnetického toku v cívkách jednoho vinutí stroje, z kterého je počítáno indukované napětí. Stejným principem je odečítána závislost momentu stroje na poloze rotoru.

V poslední části jsou prezentovány výsledky simulací, jsou prováděny výpočty indukovaného napětí a výkonu stroje na hřídeli, z momentu stroje. Průběhy stroje FSPM 12/14 získané ze simulace v programu FEMM, jsou porovnány s hodnotami stroje FSPM 12/10, který se od navrhovaného stroje liší pouze počtem rotorových pólů.

1 Permanentní magnety

1.1 Magnetismus

Z pohledu tzv. „klasické fyziky“, která vrcholí Maxwellovou teorií elektromagnetického pole, jsou v pevných látkách elektrony, které jsou významnými nositeli elektrických nábojů schopnými vyvolat elektrický proud. Stejně tak jsou i hlavními nositeli magnetických vlastností, a to jak díky svému orbitálnímu pohybu v okolí atomových jader, tak i spinovou rotací. Tímto pohybem vytvářejí elektrony elementární magnetické momenty.

Magnetické vlastnosti látky jsou dány jistou mírou kompenzace výsledných magnetických momentů jednotlivých elektronů na vnitřních (ne-valenčních) slupkách atomu. Výsledný magnetický moment látky je dán součtem spinového (rotace elektronu kolem své osy) a dráhového (oběh elektronu kolem atomového jádra) magnetického momentu. [1] [2] [3]

Z pohledu kvantové elektrodynamiky jsou magnetické síly vysvětleny schopností elektronů emitovat (přijímat) fotony. Pravděpodobnost, že elektron vyzáří nebo pohltí foton je univerzální konstantou, která je zcela nezávislá na dané situaci, na pohybu elektronu, na čase, či na tom, zda a kolik jiných částic se pohybuje v jeho okolí. Pokud tuto konstantu zohledníme s elektrickým nábojem elektronu, znamená to, že onen zdroj elektřiny – elektrický náboj – který je původcem jak elektrických, tak magnetických sil, vysublimoval a přeměnil se v podstatě na schopnost elektronu, resp. protonu emitovat do svého okolí fotony a zároveň při srážce s fotony, které bloudí prostorem, je pohlcovat. Z toho vyplývá, že jde o jistou specifickou vlastnost hmotné částice, v tomto případě elektronu. Interakci mezi částicemi obdařenými touto podivuhodnou vlastností pak nazýváme interakcí elektromagnetickou a foton vystupuje jako částice zprostředkující tuto interakci. Elektrické a magnetické síly, které tuto interakci charakterizují, jsou speciálním případem tzv. elektromagnetických sil představujících jeden ze čtyř základních typů sil ovládajících celý náš vesmír.¹

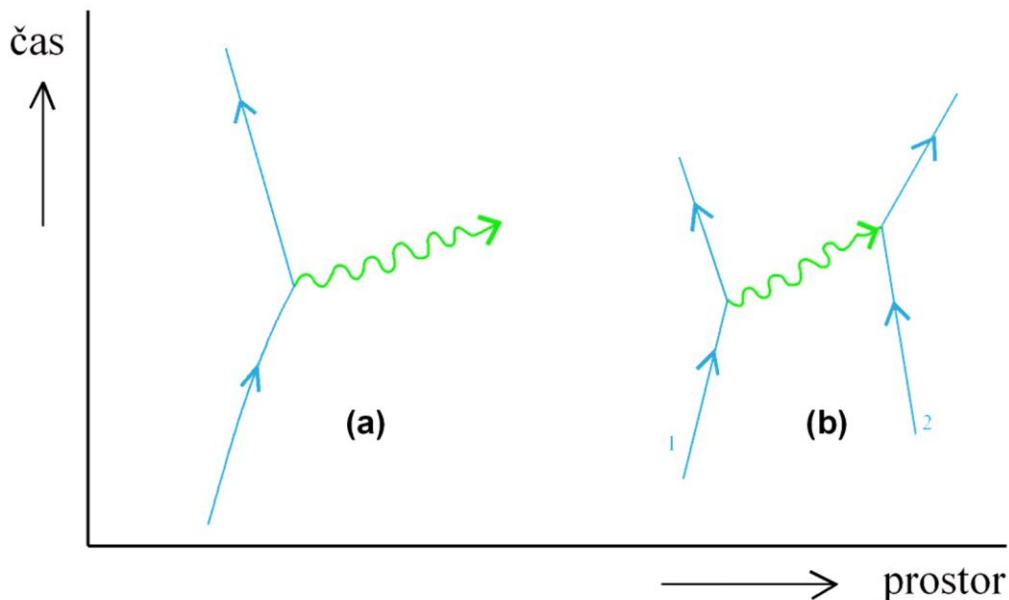
Docházíme tedy k závěru, že magnetické síly a jevy s nimi související jsou jedním z projevů elektromagnetické interakce mezi částicemi, které tak jako elektron jsou schopny vysílat a pohlcovat fotony. [2]

¹ Dalšími jsou silné a slabé síly jaderné a síly gravitační.

Obrázek 1 zobrazuje emisi fotonu letícím elektronem.

(a) – osamocený elektron

(b) – výměna fotonu mezi dvěma elektrony vytváří jejich vzájemné odpuzování



Obrázek 1 Emise fotonu letícím elektronem

Zdroj: [2]

1.2 Rozdělení látek dle poměrné permeability

Magnetické pole může být vytvořeno v jakémkoli prostředí. Magnetické pole určité intenzity vyvolá v různých prostředích odlišné účinky. Protože intenzita magnetického pole je nezávislá na prostředí, mění se v závislosti na magnetických vlastnostech prostředí magnetická indukce, což vyjadřuje rovnice 1.1

$$B = \mu \cdot H = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H \quad [\text{T}; \text{Hm}^{-1}, \text{Am}^{-1}; \text{Hm}^{-1}, -, \text{Am}^{-1}]$$

1.1 Závislost mg. indukce na vlastnostech prostředí

Kde:

B	<i>Magnetická indukce</i>
μ	<i>Absolutní permeabilita</i>
μ_0	<i>Permeabilita vakua</i>
μ_r	<i>Poměrná permeabilita</i>
H	<i>Intenzita magnetického pole</i>

Magnetické vlastnosti prostředí jsou tedy vyjádřeny zejména relativní permeabilitou² prostředí, podle jejíž hodnoty, můžeme materiály rozlišovat následovně:

- Diamagnetické $\mu_r < 1$
- Neutrální $\mu_r = 1$
- Paramagnetické $\mu_r > 1$
- Feromagnetické $\mu_r \gg 1$
 - antiferomagnetické materiály
 - feromagnetické materiály

[1] [3]

1.2.1 Diamagnetické látky

($\mu_r < 1$)

Diamagnetické látky jsou takové látky, u nichž se spinové a dráhové magnetické momenty plně vykompenzují. To je způsobeno plnou obsazeností elektronových vrstev elektrony. Vnější magnetické pole je těmito látkami mírně zeslabováno.

Mezi diamagnetické látky se řadí inertní plyny, bromid draselný, voda ($\mu_r = 0,999\ 991$), kuchyňská sůl ($\mu_r = 0,999\ 9984$), měď ($\mu_r = 0,999\ 990$), bizmut ($\mu_r = 0,999\ 848$), rtuť, zinek, olovo, stříbro, zlato, některé plasty, organické látky. Příkladem mezi materiály je měď. Za dokonalé diamagnetikum lze v současnosti považovat supravodič zchlazený pod svoji kritickou teplotu. [1] [3]

1.2.2 Neutrální látky

Jsou to takové látky nebo prostředí, která nezeslabují ani nezesilují magnetismus. Příkladem může být vakuum. [1]

² Permeabilita = magnetická vodivost resp. „propustnost“. Je to poměr magnetické indukce B k intenzitě magnetického pole v daném materiálu H. Absolutní permeabilita:

$$\mu = \mu_0 + \mu_r$$

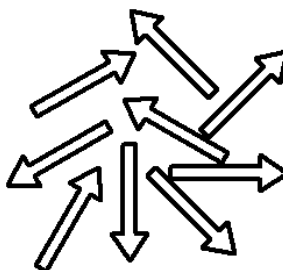
μ_r – relativní permeabilita – bezrozměrná veličina, která charakterizuje magnetické vlastnosti látek
 μ_0 – permeabilita vakua – konstanta: $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H.m}^{-1}$ ($1,256\ 637 \cdot 10^{-6} \text{ H.m}^{-1}$).

1.2.3 Paramagnetické látky

$$(\mu_r > 1)$$

Atomy paramagnetických látek mají ve valenční sféře elektronového obalu zpravidla méně než 4 elektrony. Takové látky nemají vykompenzovány všechny magnetické momenty. Každý atom má vlastní magnetický moment, který je ale vždy uspořádaný jiným směrem. Teprve v magnetickém poli se orientují souhlasně dle přiloženého pole. Paramagnetické materiály lehce vtahují siločáry do sebe a tím zesilují magnetické pole.

Do skupiny paramagnetických látek se řadí plynný kyslík ($\mu_r = 1,000\ 001\ 86$), kapalný kyslík ($\mu_r = 1,003\ 620$), hliník ($\mu_r = 1,000\ 023$), platina ($\mu_r = 1,000\ 264$), palladium, vanad, chrom, titan, ebonit, hořčík, sodík, draslík, vzduch, různé přechodné kovy, kovy vzácných zemin, aktinidy. [1] [3]



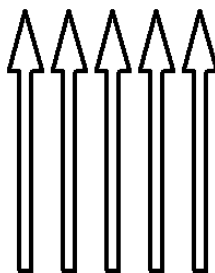
Obrázek 2 Uspořádání magnetických momentů paramagnetických látek

1.2.4 Feromagnetické látky

$$(\mu_r \gg 1)$$

Atomy feromagnetických látek mají částečně neobsazené některé vnitřní sféry elektronového obalu a současně splňují požadavek na určitý interval hodnot poměru mezi meziatomovou vzdáleností a poloměrem atomu.

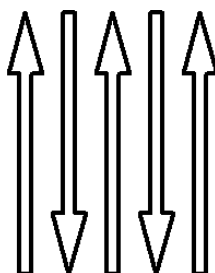
Mají stálý magnetický moment a atomy vytvářejí v látce oblasti se stejnou orientací magnetických momentů (domény). Orientace magnetických momentů jednotlivých domén jsou vůči sobě nahodilé, vlivem vnějšího magnetického pole se domény orientují v požadovaném (shodném) směru. Feromagnetismus se vyskytuje pouze u pevných látek. Materiály vtahují do sebe magnetické siločáry a zesilují mnohonásobně magnetický účinek, dokud nedojde k „nasycení“. Nasycení je stav, kdy dojde při vysokých hodnotách magnetické indukce ke ztrátě magnetické vodivosti (permeabilitě). Ta se v extrémním případě může redukovat na permeabilitu vakua. Materiály se dělí na izotropní a anizotropní. U materiálů anizotropních se liší jejich vlastnosti v několika směrech. Mezi feromagnetické látky je řazeno železo, kobalt, nikl, gadolinium a jejich slitiny. [1] [3]



Obrázek 3 Uspořádání magnetických momentů feromagnetických látek

1.2.4.1 Antiferomagnetické materiály

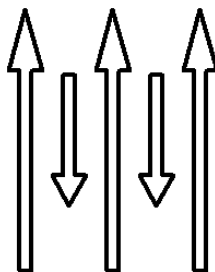
Atomy antiferomagnetických látek mají stejně velké, ale opačně orientované magnetické momenty. Příkladem těchto látek je např. chrom a mangan. [3]



Obrázek 4 Uspořádání magnetických momentů antiferomagnetických látek

1.2.4.2 Ferimagnetické materiály

Atomy ferimagnetických látek mají nesejně velké a opačně orientované magnetické momenty (zvláštní případ antiferomagnetik). Příkladem těchto látek jsou zejména ferity, vyráběné práškovou technologií z oxidu železa Fe_2O_3 a sloučenin jiných kovů případně vzácných zemin (mangan, neodym, baryum, stroncium, atd.). Kromě velké hodnoty poměrné permeability ($\mu_r = 10^2 \div 10^5$) mají také mnohem větší měrný elektrický odpor než feromagnetické látky a používají se proto např. pro výrobu jader cívek vysokofrekvenčních obvodů. [3]



Obrázek 5 Uspořádání magnetických momentů ferimagnetických látek

1.3 Materiály permanentních magnetů

Nejstarší známým permanentním magnetem je magnetit (Fe_3O_4). Ostatní typy permanentních magnetů jsou syntetického původu.

- Feritové magnety
- AlNiCo
- Samarium-kobaltové magnety SmCo
- Neodymové magnety NdFeB

[1] [3] [4]

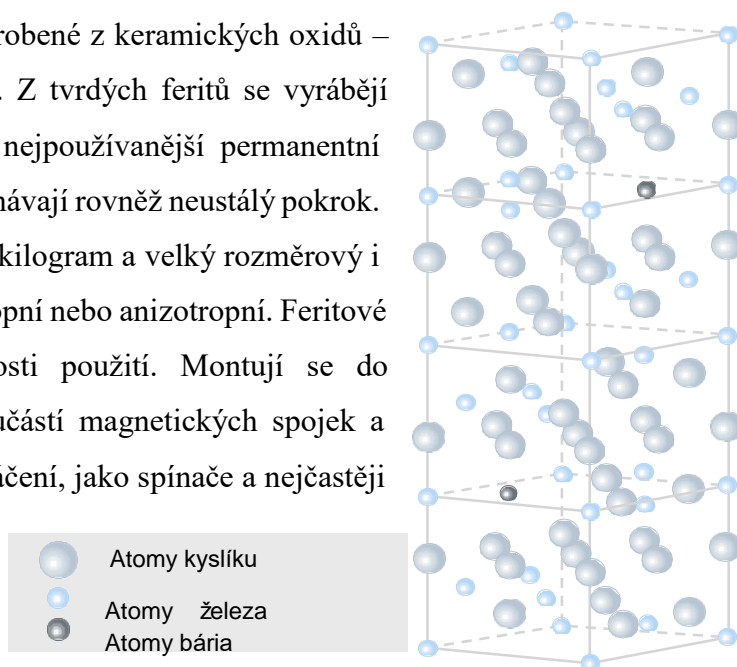
1.3.1 Keramické permanentní magnety

Keramické permanentní magnety jsou magneticky tvrdé ferity vyrobené z keramických magnetických materiálů, např. barnaté a strontnaté ferity, též spékaná kysličnicková feromagnetika. Při manipulaci se chovají jako keramické produkty, jsou tedy křehké, nesnášejí nárazy na tvrdou podložku i mezi sebou vzájemně. Používají se například v akustických snímačích. [5] [3] [4]

1.3.2 Feritové magnety

Jsou to permanentní magnety vyrobené z keramických oxidů – feritů. Jsou chemicky stálé a odolné. Z tvrdých feritů se vyrábějí cenově nejpříznivější a celosvětově nejpoužívanější permanentní magnety. Kvalita i sortiment zaznamenávají rovněž neustálý pokrok. Výhodou feritů je nejlevnější cena za kilogram a velký rozměrový i tvarový rozsah. Vyrábějí se jako izotropní nebo anizotropní. Feritové magnety mají velmi široké možnosti použití. Montují se do elektromotorů a generátorů, jsou součástí magnetických spojek a brzd. Slouží jako senzory polohy a otáčení, jako spínače a nejčastěji jsou využity v reproduktorech. [1] [6]

[5] [3] [4]



Obrázek 6 Struktura feritových magnetů

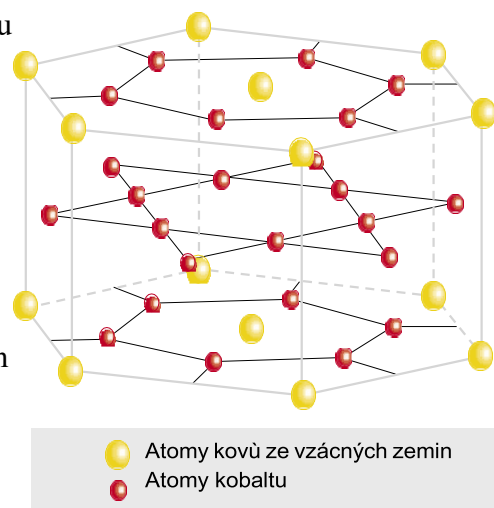
Zdroj: [3]

1.3.3 AlNiCo

Je zkratka odkazující na použité materiály slitiny, složené převážně z hliníku Al, niklu Ni a kobaltu Co, z čehož vyplývá Al-Ni-Co. AlNiCo bylo známo a používáno už před vývojem magnetů ze vzácných zemin v roce 1970. Do té doby to byl nejsilnější typ magnetu. Složení slitiny AlNiCo je obvykle 7-10% Al, 13-16% Ni, 20-40% Co, až 6% Cu, a 1% Ti, zbytek je Fe. Vývoj AlNiCo začal v roce 1931 v Japonsku. Některé druhy AlNiCo jsou izotropní (magnetická síla působí v libovolném směru) a jiné anizotropní (magnetická síla působí v určitém směru). Curieova teplota Alnica je jedna z nejvyšších a to přibližně 800°C. AlNiCo magnety jsou vyráběny odléváním nebo slinováním. Jsou široce používány v průmyslových a spotřebitelských aplikacích, kde jsou zapotřebí silné permanentní magnety, příkladem jsou elektromotory, snímače, reproduktory atd. [1] [6] [5] [3] [4]

1.3.4 Samarium-kobaltové magnety

SmCo patří k magneticky vzácným zeminám stejně jako neodýmové magnety NdFeB. Jsou známé cca od 70. let 20. století. Vyrábí se podobně jako neodýmové magnety lisováním v magnetickém poli a následným spékáním. Představují skupinu s druhou nejvyšší vnitřní energií hned po magnetech NdFeB. Nabízí nejlepší poměr ve srovnání rozměrů, výkonu a odolnosti vůči vysokým teplotám či nepříznivým podmínkám. Jsou velice odolné vůči korozi, a proto nevyžadují povrchovou úpravu. Jejich nevýhodou je vyšší cena oproti jiným druhům magnetů. Dalšími jejich nevýhodami jsou velká křehkost, malá odolnost vůči pňoucím silám a obzvláště velká náchylnost ke štěpení. Tyto magnety mohou být používány při podstatně vyšších teplotách než magnety neodýmové, maximální provozní teplota SmCo magnetů se pohybuje okolo 250 až 300°C. Jejich použití je v elektromotorech a jiných elektrotechnických aplikacích. [1] [6] [5] [3] [4]

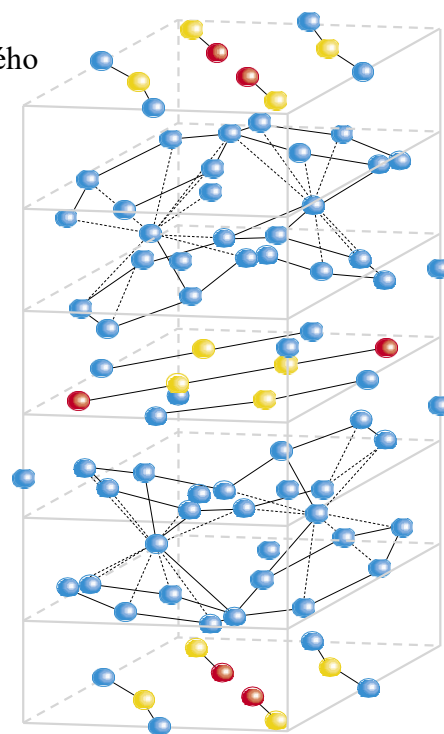
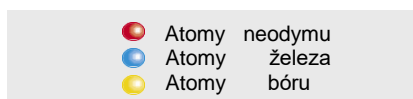


Obrázek 7 Struktura SmCo

Zdroj: [3]

1.3.5 Neodymové magnety

NdFeB byly vynalezeny počátkem 80. let dvacátého století. Představují nejsilnější a cenově nejdostupnější typ magnetu ze vzácných zemin. Jsou vyrobeny ze slitiny neodymu, železa a bóru. Neodymové magnety jsou používány v mnoha aplikacích vyžadujících silné permanentní magnety, například v elektrických motorech pro akumulátorové nářadí. Mají nižší pracovní teplotu než SmCo a jsou více náchylné k oxidaci než samariumkobaltové magnety. Proti korozi se může použít pokovení či nanesení epoxidových pryskyřičných povlaků. [1] [4]



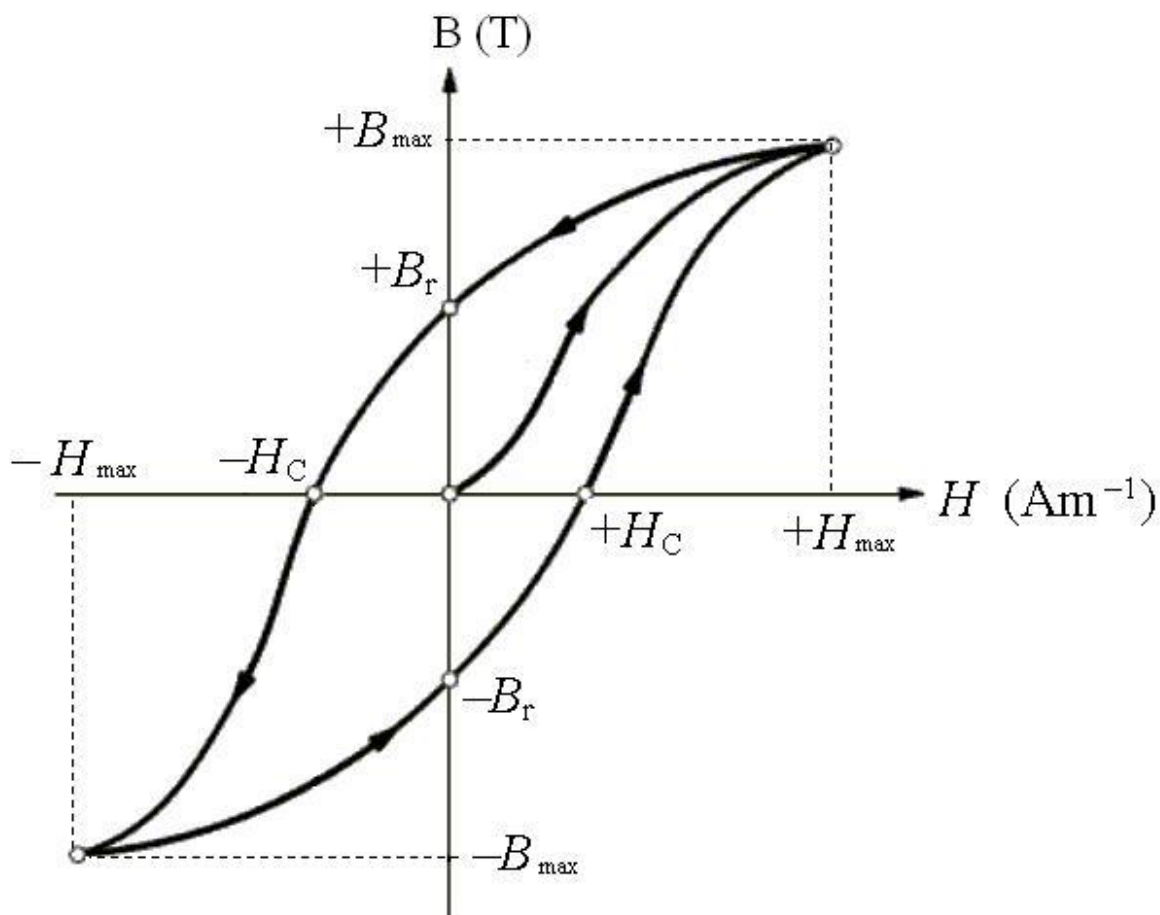
Obrázek 8 struktura NdFeB

Zdroj: [3]

1.4 Charakteristické vlastnosti magnetických materiálů

1.4.1 Hysterezní křivka

Hysterezní křivka je uzavřená smyčka magnetování feromagnetického materiálu, která vyjadřuje závislost magnetické indukce B , na intenzitě magnetického pole při plynulé změně intenzity magnetického pole od $+H_{max}$ do $-H_{max}$. Intenzita magnetického pole H_{max} , odpovídá bodu nasycení. Podle velikosti plochy hysterezní smyčky dělíme materiály na magneticky měkké a magneticky tvrdé. Magneticky měkké materiály se snadno magnetují, mají malé ztráty při magnetizaci střídavým proudem. Magneticky tvrdé materiály se naopak těžko magnetují a mají velkou remanentní indukci. Obrázek 9 zobrazuje obecnou hysterezní křivku. [4] [1]



Obrázek 9 Hysterezní smyčka

Zdroj: [1]

1.4.2 Remanence

Remanentní indukčnost B_r [T] udává velikost magnetické indukce, kterou má materiál při nulové intenzitě magnetického pole (tzv. zbytkový magnetismus). [4] [3]

1.4.3 Koercitivita

Koercitivita H_c [A.m⁻¹] je intenzita magnetického pole, která působí proti magnetizaci tak, aby výsledná magnetická indukce B byla rovna nule. Je mírou odolnosti magnetu proti odmagnetování (vyjadřuje míru snahy magnetu dostat se na nulovou energetickou hladinu). [4] [3]

1.4.4 Maximální součin HB_{\max}

Maximální energetický součin HB_{\max} [J.m⁻³] udává celkovou míru magnetické energie magnetu. Odpovídá síle, kterou magnet působí na jiné feromagnetické materiály nejčastěji na železo. Čím je větší hodnota součinu HB_{\max} , tím menší může být objem magnetu potřebný pro danou aplikaci. [4] [3]

1.4.5 Magnetická polarizace

Magnetická polarizace J_p vyjadřuje rozdíl mezi magnetickou indukcí ve feromagnetické látce a ve vakuu. Magnetickou polarizaci lze vyjádřit vztahem [4] [3]

$$\vec{J}_p = \mu \cdot \mu_0 \cdot \vec{H} - \mu_0 \cdot \vec{H} = \vec{B} - \vec{B}_0$$

1.2 magnetická polarizace

1.4.6 Curieova teplota

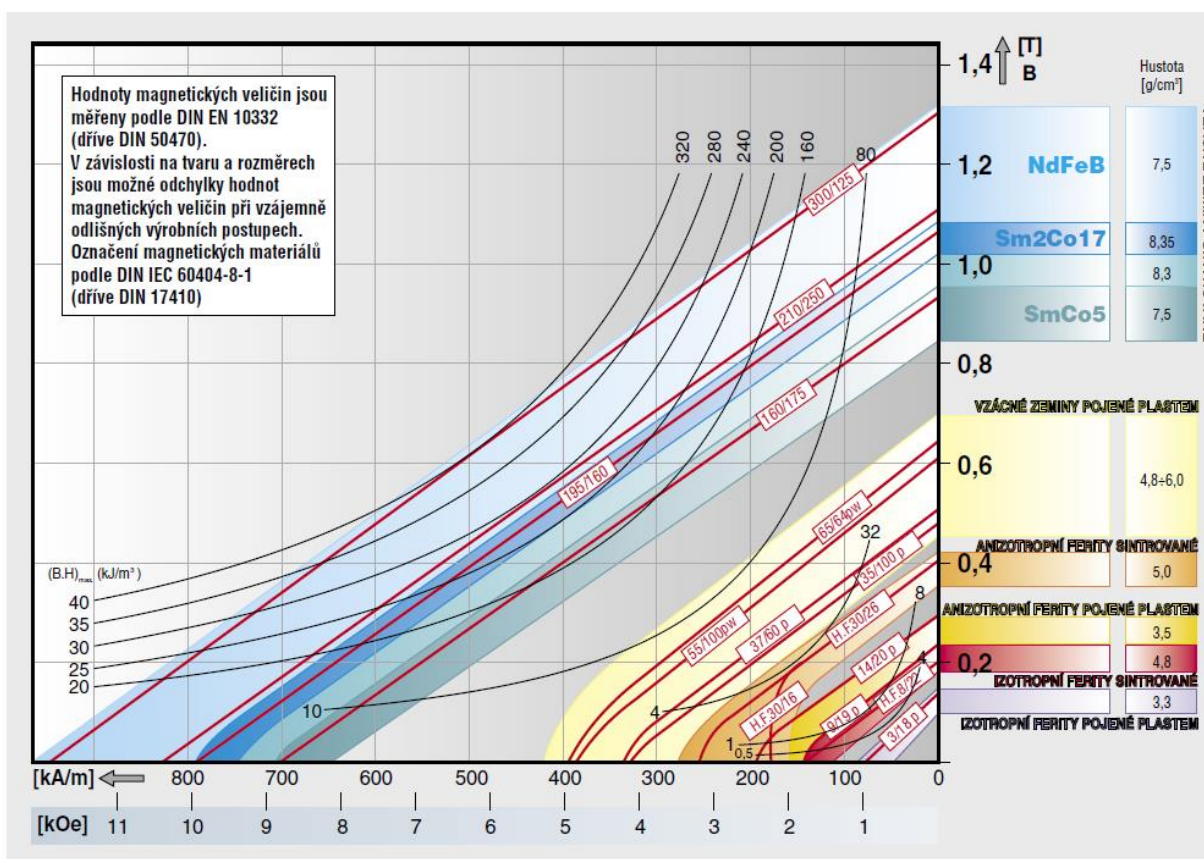
Curieova teplota je hraniční teplota, nad kterou feromagnetické, nebo ferimagnetické materiály ztrácejí spontánní magnetizaci a stávají se paramagnetickými. [1] [4] [3]

1.4.7 Porovnání základních fyzikálních vlastností permanentních magnetů

V tabulce 1 jsou uvedeny základní vlastnosti různých druhů permanentních magnetů. I z takto jednoduché tabulky je patrné, že se zvětšující se silou permanentního magnetu, dochází k významnému snížení jeho Curieovy teploty a tím i teploty pracovní. Tato skutečnost limituje použití permanentních magnetů v prostředí se zvýšenou teplotou. Dále je na obrázku 10 uvedeno porovnání demagnetizačních křivek permanentních magnetů.

Tabulka 1 Porovnání základních vlastností permanentních magnetů

Permanentní magnety	Koercitivita H_c [kAm ⁻¹]	Remanence B_r [T]	Energ. součin $(BH)_{\max}$ [kJm ⁻³]	Curieova teplota T_C [°C]
AlNiCo	42 ÷ 152	0,55 ÷ 1,22	8 ÷ 48	890
Ferity	140 ÷ 310	0,20 ÷ 0,45	6,50 ÷ 40,60	450
SmCo	600 ÷ 800	0,85 ÷ 1,10	110 ÷ 240	750 ÷ 800
NdFeB	800 ÷ 1000	1,00 ÷ 1,40	220 ÷ 390	300



Obrázek 10

Porovnání demagnetizačních křivek permanentních magnetů

Zdroj: [3]

2 Tokem spínaný stroj s permanentními magnety (FSPM)

FSPM stroje patří do skupiny reluktančních strojů s permanentními magnety. Hlavní výhodou reluktančních strojů je velmi jednoduchá konstrukce jejich rotorů, což je důvod, proč jsou používány v celé řadě aplikací (pohony strojů, elektromobily, trakční vozidla, elektro kola, elektro koloběžky,...).

2.1 Reluktanční stroje

2.1.1 Princip reluktančních strojů

Reluktanční stroje pracují na základě změny reluktance magnetického obvodu stroje. Magnetický obvod statoru se uzavírá přes rotor (který je bez vinutí), jelikož rotor nemá stejný počet pólů jako stator, je rotor magnetickým polem natáčen tak, aby magnetický obvod mezi póly statoru dosahoval nejmenší možné hodnoty reluktance. [7]

Základními typy reluktančních strojů jsou synchronní reluktanční stroj a spínaný reluktanční stroj. [8] [9]

Výhody reluktančních strojů

Hlavní výhodou reluktančních strojů je jednoduchá konstrukce rotoru, která na sobě nenese žádné vinutí, díky tomu v rotoru nevznikají Jouleovy ztráty a tím odpadá běžný problém s jeho chlazením. Také díky absenci rotorového vinutí, na které nepůsobí odstředivé síly, může stroj v běžném provozu pracovat při velmi vysokých rychlostech. Reluktanční stroje mají malý moment setrvačnosti a výborné dynamické vlastnosti. Vynikající vlastností reluktančních strojů je veliký záběrný moment. Reluktanční stroje bez PM mohou pracovat při vyšší pracovní teplotě, protože většina ztrát vzniká ve statoru, který se snáze chladí. Z hlediska provozní spolehlivosti jsou reluktanční stroje výhodné, protože nemají kartáče ani komutátor.

Nevýhody

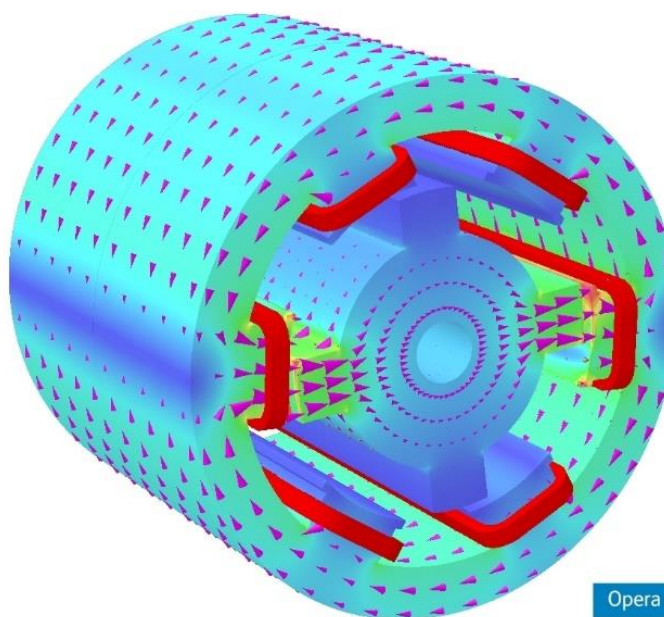
Nevýhodou všech druhů reluktančních strojů je pulzační moment, s čímž je spojena i vyšší hlučnost stroje. V reluktančních strojích jsou zvýšené ztráty v železe, protože pracují při vysokém nasycení magnetického obvodu. Další nevýhodou u spínaného reluktančního stroje je nutnost elektroniky pro řízení chodu a snímání polohy rotoru.

2.1.2 Vznik točivého momentu

Když je pól statoru zmagnetován (jeho cívkou protéká elektrický proud), krouticí moment rotoru působí ve směru, který sníží reluktanci. Nejbližší rotorový pól je tažen z nevyrovnané polohy magnetickým polem statoru do polohy s nejmenší reluktancí. Tento účinek je stejný jako u válcové cívky s jádrem nebo když magnet přitahuje feromagnetický kov. Aby byla udržena rotace, pole statoru musí rotovat v předstihu před póly rotoru, aby neustále „táhlo“ rotor. Tento princip znázorňuje obrázek 11.

Motory mohou fungovat na třífázový střídavý proud (rychlost otáčení je omezena frekvencí a počtem pólů), nebo mohou být jednotlivé statorové póly elektronicky spínány. Se zdokonalením polovodičových spínacích součástek je většina moderních konstrukcí typu spínaných reluktančních motorů spínána elektronicky, protože elektronická komutace poskytuje významné výhody pro start, řízení rychlosti a hladký běh motoru.

[10], [11]



Obrázek 11 Vznik točivého momentu SRM stroje

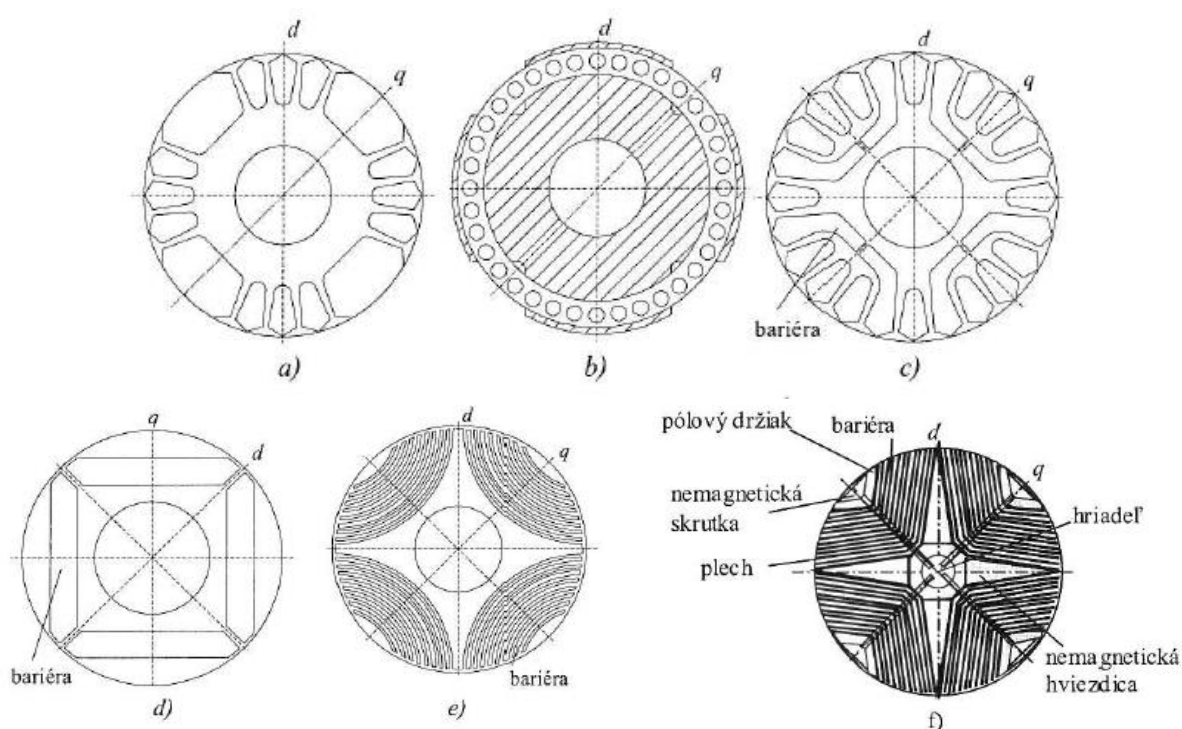
Zdroj : [12]

2.1.3 Synchronní reluktanční stroj

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

U synchronního reluktančního stroje má klíčový vliv na výkon stroje konstrukce rotoru.

V současné době je jednou z možností, jak zajistit vyniklost rotoru, radiálně vrstvený rotor, jeho varianty jsou zobrazeny na: obrázku 12, a), b), c), d), e). U varianty e) jsou černě vyplněny magnetické bariéry, které způsobují velkou magnetickou vodivost ve směru osy d a malou magnetickou vodivost ve směru osy q . Sledovaným parametrem je podíl příčné a podélné reaktance $\frac{X_d}{X_q}$. Čím je tento poměr větší, tím má stroj výhodnější parametry. Poměr $\frac{X_d}{X_q}$ v současné době typicky dosahuje hodnot 2 až 3. Axiálně vrstvený rotor je zobrazen na: obrázku 12, varianta f). [7], [8]



Obrázek 12 Varianty provedení rotorů synchronních reluktančních strojů

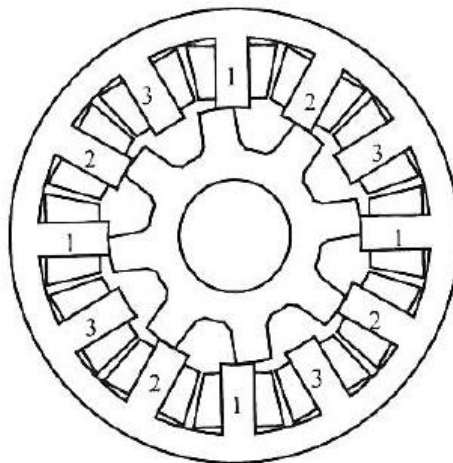
Zdroj: [7]

2.1.4 Spínaný reluktanční stroj

Princip spínaného reluktančního stroje je známý již od roku 1838, ale jeho plný rozvoj nastal až s rozvojem výkonové elektroniky - šedesátá léta dvacátého století.

Stator i rotor stroje má vyniklé póly a pouze na statorových pólech jsou navinuty cívky, které budí magnetický tok. Tyto cívky statorového vinutí jsou pomocí řídicí elektroniky spínány (elektronická komutace) tak, aby se rotor plynule otáčel. Současně je sepnuta vždy jen jedna

fáze stroje. Pro správnou funkci stroje je tedy nutné čidlo polohy rotoru. Směr otáčení stroje závisí na sledu spínání statorových fází. Moment spínaného reluktančního motoru závisí na kvadrátu velikosti napájecího proudu. Nezávisí tedy na polaritě protékaného proudu. Hlavními technickými parametry spínaného reluktančního stroje je počet pólů statoru p_s , počet pólů rotoru p_r a m počet statorových fází. Obrázek 13 zobrazuje konstrukci třífázové spínaného reluktančního motoru 12/8. Stroj má 24 pracovních cyklů na jednu otáčku. [7], [8]



Obrázek 13

Provedení třífázového spínaného stroje 12/8

Zdroj: [7]

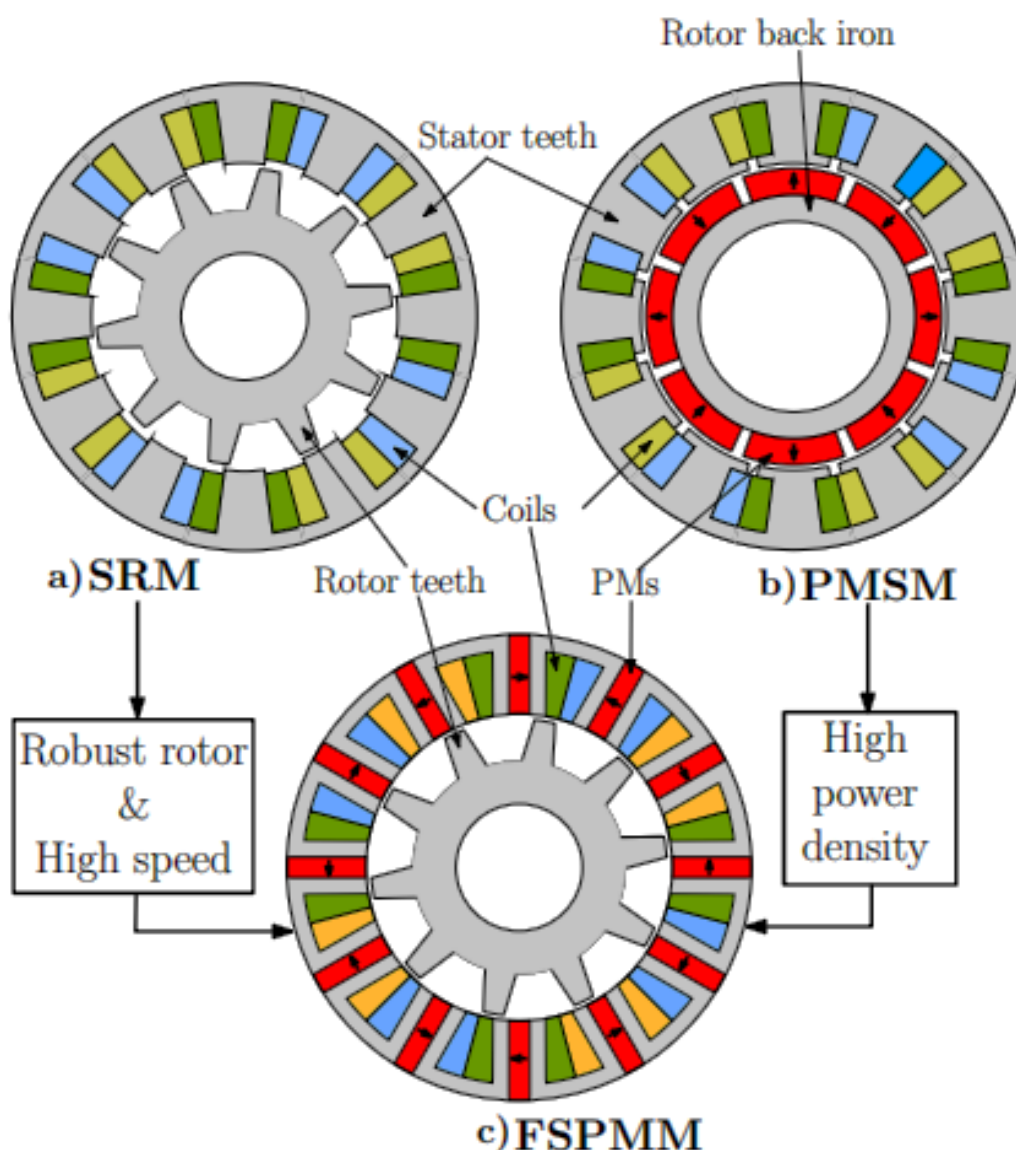
2.2 Tokem spínané stroje s permanentními magnety

Tokem spínané stroje s permanentními magnety (FSPM stroje) vycházejí z předpokladu zesílení momentu stroje pomocí permanentních magnetů. Jejich konstrukce vychází ze spojení spínaných reluktančních strojů (SRM) a synchronních strojů s permanentními magnety (PMSM), viz obrázek 14.

Výhodou PMSM strojů je velký točivý moment, který získávají díky permanentním magnetům, které jsou umístěny na rotoru stroje. Omezením PMSM strojů je potřeba chlazení permanentních magnetů a také jejich mechanické uchycení (musí odolat odstředivým silám působícím na otáčející se rotor). [9] [5]

Konstrukce rotoru u SRM je velmi odolná a bez zvýšených požadavků na chlazení. Rotor je vyroben z feromagnetických plechů bez vinutí a permanentních magnetů. Vzhledem k absenci druhého magnetického pole má však tento stroj nižší hustotu energie a točivého momentu.

Pokud na stator spínaného reluktančního stroje SRM přidáme magnety, získáme stroj se spínaným tokem a permanentními magnety neboli zkráceně FSPM stroj. Rotor FSPM stroje je složen, stejně jako u SRM, pouze z navzájem izolovaných elektromagnetických plechů. Přidáním permanentních magnetů na stator stroje zvýšíme hustotu magnetického toku procházejícího ze statoru na rotor stroje, a tím zvýšíme i dosažitelnou velikost točivého momentu. Při umístění permanentních magnetů na statoru stroje je také možno zajistit jednodušeji jejich chlazení. [5] [10] [11]



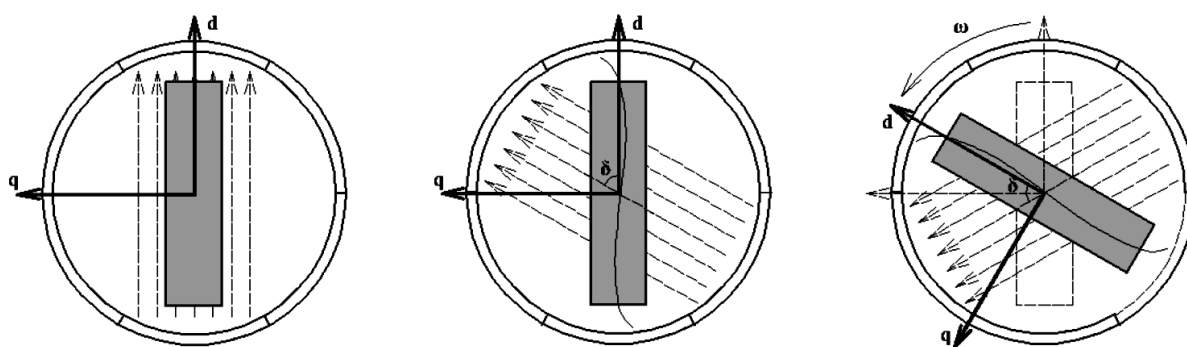
Obrázek 14 Koncepce FSPM z SRM a PMSM

Zdroj: [13]

2.2.1 Princip činnosti FSPM stroje

Jak již bylo řečeno základní princip FSPM je obdobný jako u SRM stroje, tedy magnetický tok, vybuzený statorovým vinutím, při snaze o průchod obvodem s nejmenším odporem – reluktancí, natáčí rotor do nejpříznivější polohy.

Základem je tedy snaha o vytvoření maximální magnetické vodivosti v ose d a zároveň o vznik maximálního magnetického odporu v ose q . Při působení magnetického pole na rotor bude vznikat pohyb vždy, když se úhel δ mezi podélnou osou d a směrem magnetického pole nebude rovnat nule. Tímto způsobem se rotor při otáčení magnetického pole vždy bude snažit zaujmout takovou polohu, při které magnetický odpor bude co nejmenší a tento stav bude odpovídat minimální velikosti potenciální energie soustavy. Tím pádem se při zachování konstantního úhlu δ mezi magnetickým polem statoru a podélnou osou d bude elektromagnetická energie vždy přeměňovat na mechanickou. Jelikož je princip funkce obdobný jako u synchronního reluktančního stroje, lze jej znázornit pomocí obrázku 15.



Obrázek 15 princip funkce synchronního reluktančního stroje

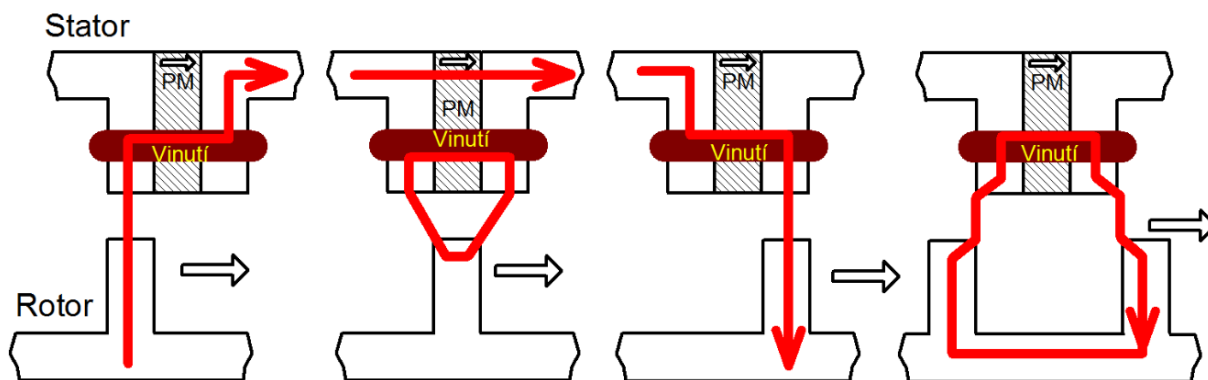
Zdroj: [14]

V první poloze rotoru se úhel mezi podélnou osou d a směrem magnetického pole rovná nule. V této poloze je magnetický odpor v podélné ose d minimální. Soustava se nachází ve stavu rovnováhy. Při otočení magnetického pole se rotor snaží zachovat minimální magnetický odpor a v důsledku toho se začíná synchronně otáčet s magnetickým polem statoru. Úhel δ je v tomto případě větší než nula – elektromagnetická energie se přeměňuje na mechanickou. Při zachování konstantního úhlu δ se rotor dál otáčí synchronně s polem statoru tak, aby byla zachována minimální hodnota reluktance. [6]

Ve FSPM stroji dochází k superpozici magnetického pole permanentních magnetů a magnetického pole vybuzeného cívkami vinutí. Výsledný magnetický tok se uzavírá přes vzduchovou mezeru a vyvolává točivý moment. Směr toku se během otáčení rotoru mění.

Obrázek 16 znázorňuje průběh magnetického toku v hlavních polohách rotorových pólů vůči statorovému pólu. Obrázek je pouze ilustrativní, konečné rozložení magnetického toku je závislé na rozteči rotorových pólů. Na obrázku také není zobrazen rozptyl („únik“) magnetického toku mezi póly statoru a uvnitř rotorových pólů. Pokud by rotorové póly byly širší a počet pólů rotoru by byl větší, než počet pólů statoru ($P_r > P_s$), potom bude vliv rozptylového toku významnější.

[15]

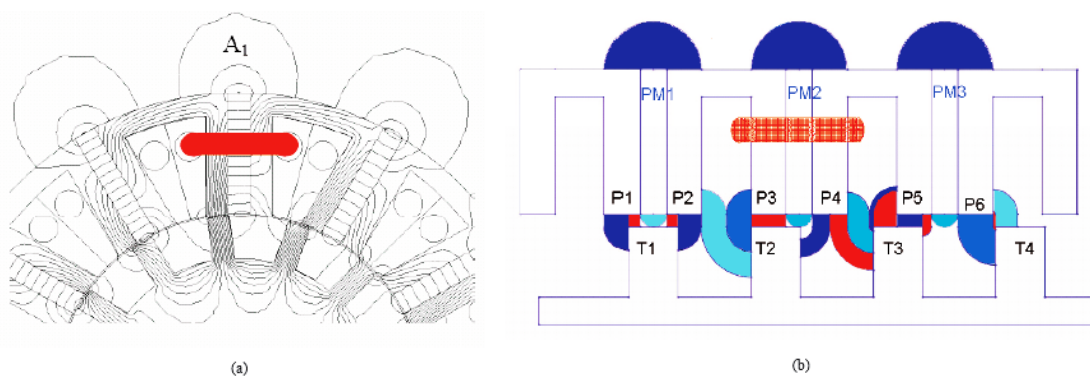


Obrázek 16

Princip FSPM stroje

2.2.2 Model magnetického toku pomocí soustředěných parametrů

V [15] je uveden základní model magnetického toku (s uvažováním konstantní vzduchové mezery a zanedbáním reluktance plechů statoru a rotoru). [16] řeší problematiku podrobněji. Model vychází z rozložení magnetického toku, který byl vyšetřen při simulaci. Je předpokládáno, že magnetický tok rotorovým pólem je převážně složen z magnetického toku tří sousedních permanentních magnetů. Rozložení magnetického toku vzduchovou mezerou bude závislé na konkrétním natočení rotoru.



Obrázek 17 Rozložení magnetického toku v rotorovém pólu

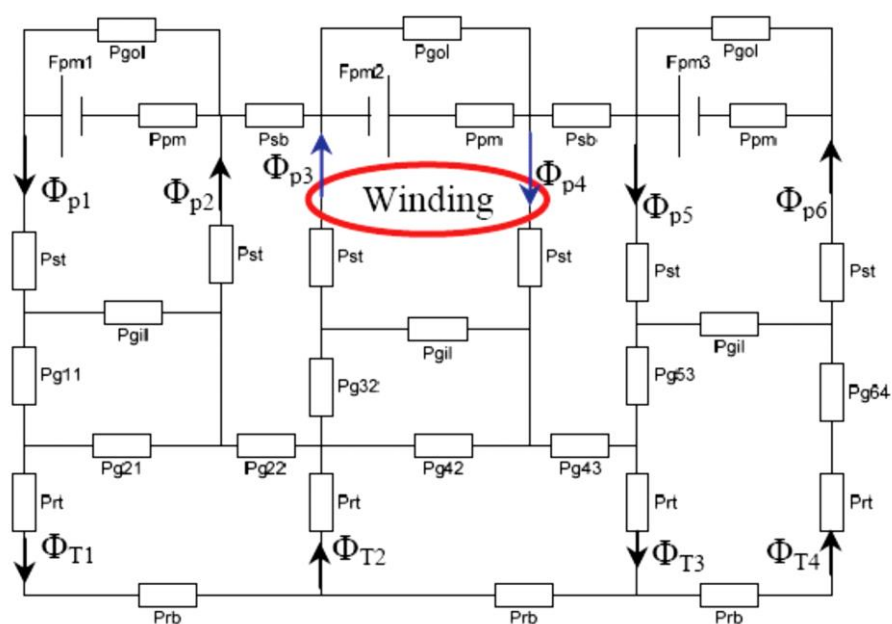
a) Model magnetického toku

b) Schematické znázornění

Zdroj: [16]

Obrázek 17 zobrazuje rozložení magnetického toku nezátíženého stroje. Rozložení magnetického toku strojem, je základem pro sestavení náhradního schématu magnetického obvodu stroje. Model magnetického obvodu FSPM stroje je pro zobrazen na obrázku 18. Při sestavování byl zanedbán rozptyl magnetického toku v čelech rotoru, z důvodu že délka tohoto stroje je v porovnání s jeho průměrem poměrně velká $l_{ef} \sim 2 \cdot D_s$. Tento model neplatí pro stroj navrhovaný ve třetí kapitole, poměr rozměrů navrhovaného stroje bude $2 \cdot l_{ef} \sim D_s$.

[16], [15], [17]

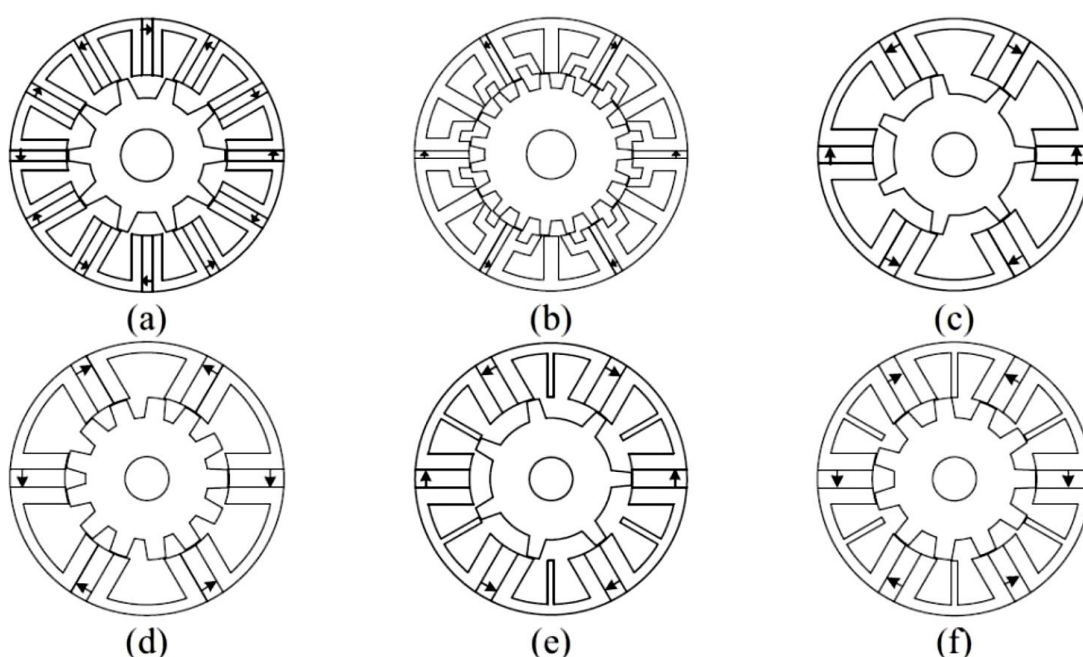


Obrázek 18 Model magnetického toku pomocí soustředěných parametrů

Zdroj: [16]

2.2.3 Varianty FSPM stroje

Snahy o vylepšení vlastností stroje nebo jejich úpravu pro konkrétní aplikace, vedou k masivnímu rozšíření typů FSPM strojů. Vlastnosti nových konstrukcí jsou obvykle ověřovány pomocí počítačových programů pracujících s metodou konečných prvků. To umožňuje teoreticky ověřit funkčnost stroje ještě před výrobou prototypu, a tím ušetřit za případnou výrobu nefunkčního vzorku. Hlavním směrem vývoje je snaha o plynulý průběh točivého momentu stroje, zmenšení jeho rozměrů, zjednodušení konstrukce a v neposlední řadě snížení nákladů na konstrukční materiály a jeho výroby. [18]



Obrázek 19 Různé konstrukce FSPM strojů:

(a) FSPM 12/10, (b) Multi-tooth FSPM, (c) FSPM 6/7 s C jádrem, (d) FSPM 6/13 s C jádrem, (e) 6/7 s E jádrem, (f) 6/11 s E jádrem, zdroj: [18]

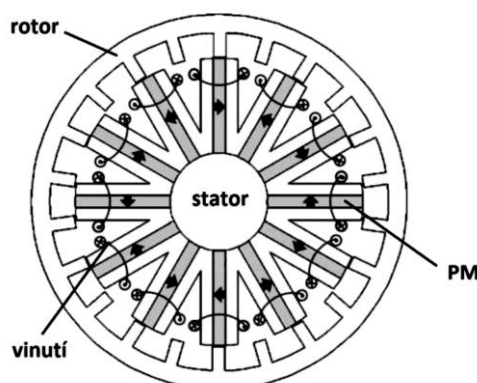
2.2.3.1 Fault-tolerant konstrukce

Stroje typu fault-tolerant jsou určeny pro aplikace, kde je výpadek stroje nežádoucí a k výpadku stroje nesmí dojít ani při částečném poškození (anglicky Fault-tolerant systémy). U takovýchto FSPM strojů je například galvanicky i magneticky oddělena každá fáze vinutí. Toho je dosaženo tím, že stator je složen z plechů ve tvaru E, které jsou vzájemně galvanicky izolovány. Obrázek 19 (e), (f). To znamená, že na statoru se nacházejí i póly, na kterých není vinutí, ale uzavírá se přes ně magnetický tok (tzv. fault-tolerant teeth, zkráceně FTT), a tím je zajištěno, že se sousední fáze vzájemně nemohou ovlivňovat. Při poruše vinutí jedné fáze tedy

může stroj nadále pracovat se zbývajícími fázemi se sníženým výkonem. Je dokonce možné navrhout i takový stroj, aby byl schopen pracovat s pouze jednou funkční fází. [19], [20]

2.2.3.2 FSPM s oběžným rotorem

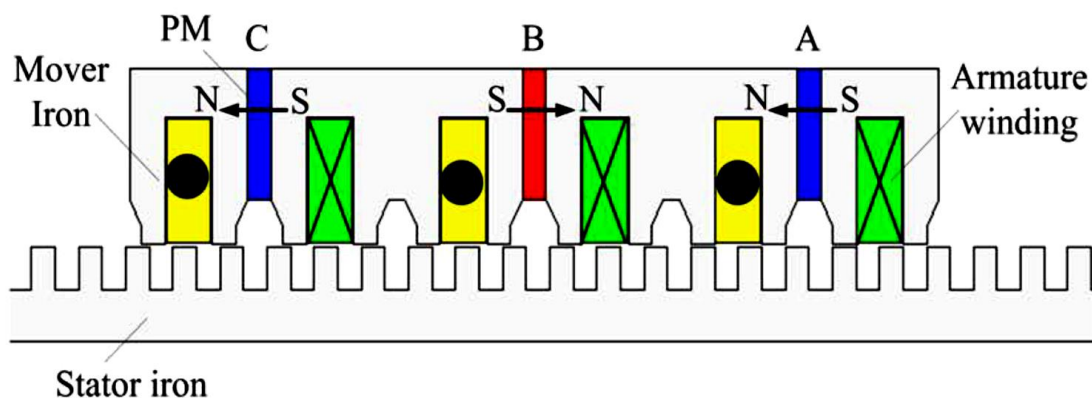
Tak jako například u BLDC strojů je hojně využíváno konstrukce s oběžným rotorem, je možno takto zkonstruovat i FSPM stroj. Principiálně pracuje stroj naprosto stejně, s tím rozdílem, že rotor není umístěn uvnitř statoru, ale obíhá okolo něj (Obrázek 20). Hlavní výhodou tohoto uspořádání je snížení zvlnění momentu od permanentních magnetů tzv. Cogging torque. Tento moment způsobuje nežádoucí pulzace momentu, a proto se ho snažíme potlačit. Hlavní nevýhodou konstrukce s oběžným rotorem je problematické chlazení vinutí statoru, které je uvnitř stroje hůře přístupné. Tato konstrukce může být využita například v trakci, v automobilovém průmyslu, kde lze motor přímo integrovat do náboje kola. [21]



Obrázek 20 FSPM stroj s oběžným rotorem
Zdroj: [21]

2.2.3.3 Lineární FSPM stroj

Lineární FSPM stroj je v podstatě rozvinutý FSPM stroj. Lineární stroje produkují přímo tažnou či tlačnou sílu bez převádění z otáčivého pohybu. Tím odpadá nutnost použití mechanických převodů a dochází ke zvýšení účinnosti a spolehlivosti soustavy stroje. Lineární stroje jsou využívány převážně v transportních systémech. Základní princip naznačuje obrázek 22.

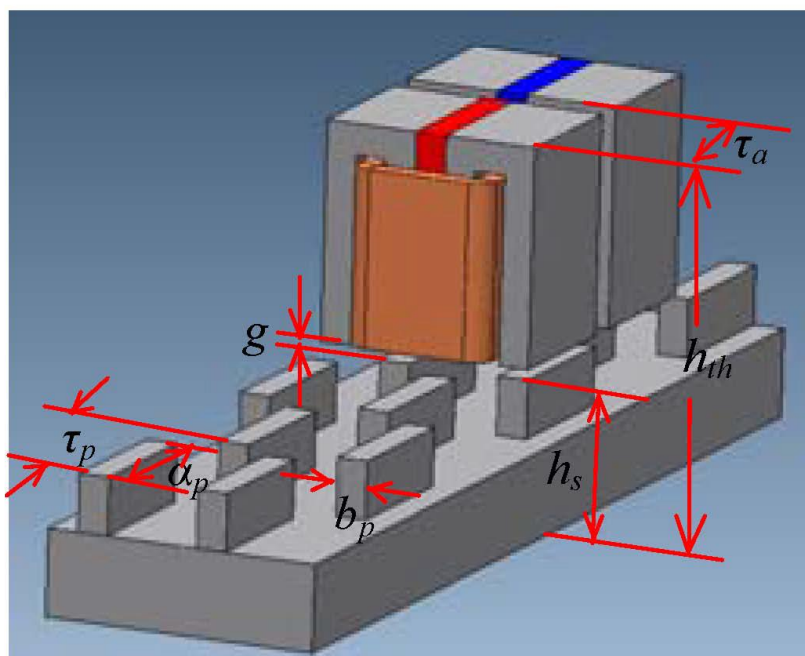


Obrázek 21 Standartní provedení lineárního FSPM stroje

Zdroj: [22]

Z jejich principu s přihlédnutím na konstrukci FSPM strojů plyne několik základních nedostatků. Na koncích magnetického obvodu má stroj jiné vlastnosti než uprostřed, Magnetický obvod lineárního FSPM stroje je tedy nevyvážený. Z toho plyne větší pulzační moment od magnetů a tedy větší zvlnění tažné či tlačné síly. Tyto nevýhody je možno do jisté míry potlačit vhodným návrhem stroje. [23], [22]

Na obrázku níže je zobrazen lineární stroj s vysokou přítláčnou silou s označením TFSFLM (transverse-flux switched-flux linear motor) – příčným tokem spínaný lineární motor.



Obrázek 22

Hlavní struktura lineárního TFSFLM stroje

Zdroj: [23]

3 Návrh FSPM stroje 12 / 14

V této části bude řešen postup návrhu FSPM stroje. Nejdříve jako obecný postup, následně pro konkrétní parametry.

U FSPM stroje v provedení 12 / 14, lze předpokládat skoro sinusový průběh napětí (Back-EMF) a relativně malé zvlnění momentu.

3.1 Obecný postup návrhu FSPM stroje

1. Volba počtu pólů
2. Návrh hlavních rozměrů stroje
3. Rozložení statoru
4. Rozložení rotoru
5. Výpočet vinutí statoru
6. Volba permanentního magnetu
7. Proud vinutím stroje
8. Otáčky stroje
9. Magnetická indukce ve vzduchové mezeře
10. Hmotnost stroje

3.1.1 Počet pólů

Volba rotorových a statorových pólů, by měla být provedena dle následujících podmínek.

$$p_s = k_1 \cdot m$$

3.1 Počet statorových pólů

$$p_r = p_s \pm 2 \cdot k_2$$

3.2 Počet rotorových pólů

Kde:

p_s	Počet pólů statoru
p_r	Počet pólů rotoru
m	Počet fází
k_1, k_2	Celá čísla

Při návrhu stroje by mělo platit, že pokud m je sudé číslo, k_1 se volí liché a pokud je m

liché, pak k_1 by mělo být číslo sudé. Výsledný počet rotorových pólů p_r , by měl být sudý a měl by být blízký počtu statorových pólů (touto volbou se zajistí maximální točivý moment). [16]

3.1.2 Hlavní rozměry stroje

Určení hlavních rozměrů stroje vychází z výkonu, který od něj požadujeme. Pokud mechanický výkon stroje označíme P_2 , lze jej vyjádřit jako:

$$P_2 = \eta \cdot \frac{1}{T} \cdot \int_0^T e(t) \cdot i(t) dt = \eta \cdot K_p \cdot E_m \cdot I_m$$

3.3 Výpočet výkonu FSPM stroje

Kde:

η	Účinnost navrhovaného stroje, při zanedbání mechanických ztrát může dosahovat až 94 %
T	Perioda
$e(t)$	Napětí (okamžitá hodnota)
$i(t)$	Proud (okamžitá hodnota)
K_p	Činitel zkreslení výkonu (rozkmit průběhu do osy „z“)
E_m	Maximální hodnota napětí
I_m	Maximální hodnota proudu

Maximální hodnotu napětí E_m lze vyjádřit jako:

$$E_m = N_\omega \cdot \omega_r \cdot P_r \cdot B_g \cdot l_{ef} \cdot \frac{\pi \cdot D_s}{p_s} \cdot \alpha_s \cdot K_f$$

3.4 Maximální napětí stroje

Kde:

N_ω	Počet závitů vinutí na fázi
ω_r	Úhlová rychlost rotoru
B_g	Maximální indukce ve vzduchové mezeře
l_{ef}	Efektivní délka stroje
D_s	Vnitřní průměr stroje
α_s	Činitel pólového krytí (poměr průměru statorového pólu ku vnitřnímu průměru statoru)
K_f	Činitel rozptylu

A maximální proud jako:

$$I_m = K_i \cdot \frac{A_s \cdot \pi \cdot D_s}{2 \cdot m \cdot N_\omega}$$

3.5 Maximální proud stroje

Kde:

K_i Činitel zkreslení proudu, pokud zanedbáme vliv vyšší harmonické (nejvýraznější je 5.) potom $K_i = \sqrt{2}$
 A_s Lineární proudová hustota [A/m]

Pokud rovnice označené 3.4 a 3.5 vložíme do rovnice 3.3 a vyjádříme součin kvadrátu průměru statoru a efektivní délky stroje dostaneme rovnici:

$$D_s^2 \cdot l_{ef} = \frac{2 \cdot p_s}{\pi^2} \cdot \frac{P_2}{\eta \cdot K_p \cdot K_i \cdot B_g \cdot \omega_r \cdot p_r \cdot A_s \cdot K_f \cdot \alpha_s}$$

3.6 Hlavní rozměry FSPM stroje

Z této rovnice vyplývají základní rozměry stroje, pokud zvolíme délku stroje³ a známe požadovaný výkon na hřídeli, lze dopočítat vnitřní poloměr jeho statoru. Obvod kružnice s tímto poloměrem, určuje efektivní prostor / délku pro osazení vinutí a permanentních magnetů.

Tuto rovnici lze upravit do tvaru:

$$D_s^2 \cdot l_{ef} = \frac{P_2}{C}$$

3.7 Zobecněná rovnice výpočtu hlavních rozměrů FSPM stroje s koeficientem C

Kde:

$$C = \frac{2 \cdot p_s}{\pi^2} \cdot \frac{1}{\eta \cdot K_p \cdot K_i \cdot B_g \cdot \omega_r \cdot p_r \cdot A_s \cdot K_f \cdot \alpha_s}$$

3.8 Vyjádření koeficientu C

³ jedná se o efektivní délku statoru, tj. o délku statorových plechů, pro určení vnější délky stroje je nutné připočítat délku čel vinutí a štítů s ložisky.

Kde C lze považovat za jistý ekvivalent Essonova činitele. Krouticí moment stroje lze vyjádřit jako:

$$T = \frac{P_2}{\omega_r}$$

3.9 Krouticí moment stroje

[19] [16] [6]

3.1.3 Rozložení statoru

V předchozí kapitole byly definovány základní rozměry FSPM stroje. V této kapitole bude popisován výpočet velikosti statorových pólů, jha, permanentních magnetů a vinutí ve statoru. Podle [16], lze poměr mezi vnějším a vnitřním průměrem statoru vyjádřit pomocí rovnice 3.10.. Vhodně zvolený poměr je důležitý z důvodu efektivního využití magnetického obvodu, tak aby plechy byly efektivně využity a nedocházelo k jejich přesycení.

$$D_s = D_0 \cdot \left(0,8 - \frac{0,8}{p_s}\right)$$

3.10 Poměr mezi vnějším a vnitřním průměrem statoru

Pokud budeme pro prvotní návrh uvažovat rovnoměrné rozvržení statoru a magnetického toku lze psát⁴

$$l_{st} = l_s = l_{pm} = l_r = H_s = \frac{T_s}{4}$$

3.11 Předpoklad rovnoměrného rozložení statoru

Kde:

l_{st}	Šířka pólu statorového pólu
l_s	Vnitřní šířka oblasti vinutí
l_{pm}	Šířka permanentního magnetu
l_r	Horní šířka rotorového pólu
H_s	Výška magnetické obvodu statoru
T_s	Celková délka pro jedno vinutí statoru (délka na vnitřním obvodu statoru)

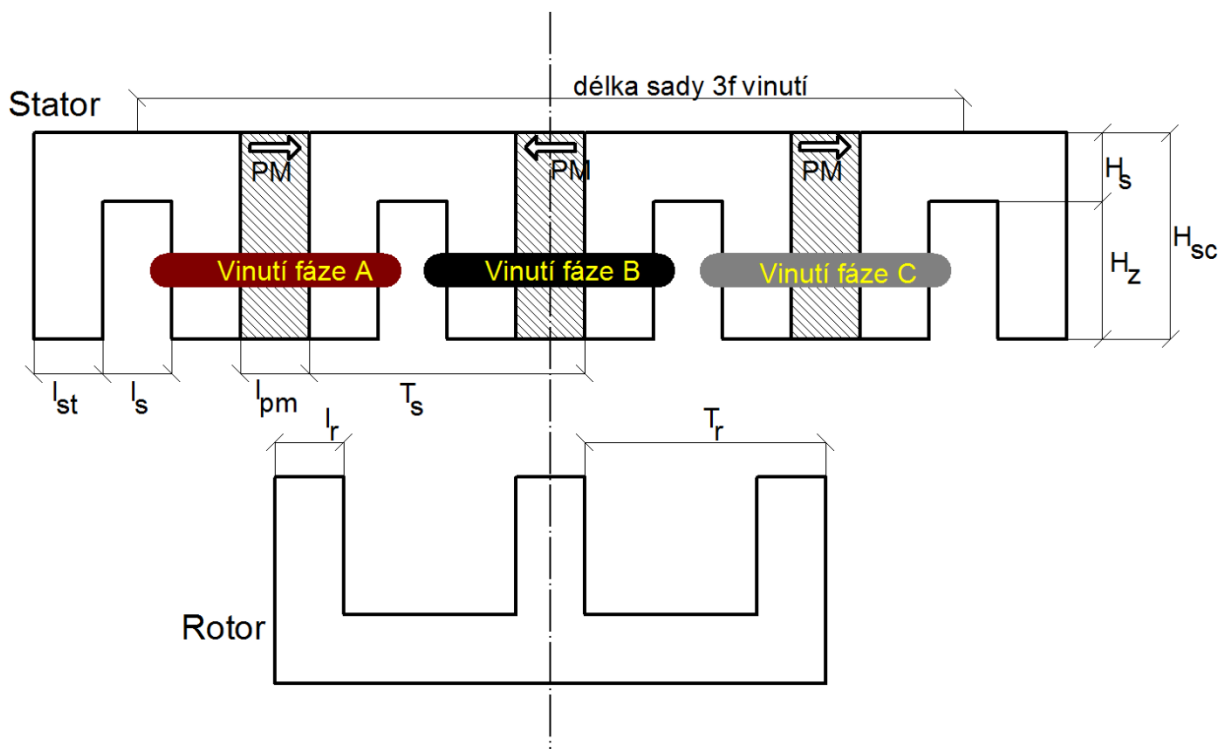
Tyto rozměry znázorňuje obrázek 23. Jelikož rozměry šířky statorového pólu a PM budeme uvažovat stejné po celé výšce statoru H_{sc} a za pevnou budeme uvažovat i šířku l_s v místě vnitřního obvodu statoru, dojde k natažení obvodové délky statoru a tím i ke zvětšení

⁴ [12] uvádí, že optimální výška H_s , by se měla pohybovat přibližně $0,7 \cdot l_{st}$ aby bylo zabráněno přesycení.

místa pro vinutí (vznikne lichoběžníkový prostor s kratší stranou směrem k rotoru). Výška jha H_s se uvažuje v rozmezí:

$$H_s = (0,7 \div 1) \cdot l_{st}$$

3.12 Výška jha



Obrázek 23

Zjednodušené zobrazení polohy rotoru a statoru

Šířka statoru H_{sc} závisí na požadované velikosti oblasti pro vinutí, respektive na počtu závitů vinutí.

Velikost celkové oblasti pro vinutí lze vypočítat jako:

$$S_{cuc} = \pi \cdot \left(\frac{D_s}{2} + H_z\right)^2 - \pi \cdot \left(\frac{D_s}{2}\right)^2 - p_s \cdot H_z \cdot (l_{st} + l_{st} + l_{pm})$$

3.13 Celková plocha pro vinutí

Plochu pro jedno vinutí pak lze vyjádřit jako:

$$S_{cu} = \frac{S_{cuc}}{2 \cdot p_s}$$

3.14 Plocha jednoho vinutí

Kde:

$$\begin{array}{ll} S_{cuc} & \text{Celková plocha pro uložení vinutí} \\ S_{cu} & \text{Plocha pro jedno vinutí} \end{array}$$

[9] [21] [16]

3.1.4 Rozložení rotoru

Výšku rotorového pólu můžeme definovat jako $2 \cdot l_{st}$ (šířka statorového pólu), dle [16]. Pro prvotní návrh použijeme šířku rotorového pólu. $l_r = l_{st}$. Tedy:

$$H_r = 2 \cdot l_r$$

3.15 Výška rotorového pólu

Vzdálenost mezi póly rotoru můžeme definovat jako:

$$T_r = \frac{\pi \cdot D_s - 2 \cdot \delta}{p_r}$$

3.16 Vzdálenost mezi rotorovými póly

Kde:

$$\begin{array}{ll} \delta & \text{Šířka vzduchové mezery} \\ H_r & \text{Výška rotorového pólu} \end{array}$$

Aby bylo zajištěno vhodné rozložení magnetického toku procházejícího rotorovým pólem, měl by mít rotorový pól přibližný vzhled rovnoramenného lichoběžníku, s širší stranou směrem ke hřídeli (tento tvar zlepšuje i mechanické vlastnosti rotoru). Proto budu uvažovat šířku rotorového pólu u hřídele jako $1,5 \cdot l_r$

[16] [9]

3.1.5 Výpočet vinutí statoru

V kapitole 3.1.3 byla vypočítána celková plocha vinutí a odvozena plocha jednoho vinutí. Při návrhu je nutné znát počet závitů jedné cívky, které lze do této plochy navinout, to lze vyjádřit jako:

$$N_\omega = \frac{S_{cu} \cdot k_p}{S_v}$$

3.17 Počet závitů

Kde:

$$S_v \quad \text{Průřez vodiče vinutí}$$

k_p *Koeficient plnění (<1)*

Celková délka vinutí jedné cívky statorového pólu, lze vyjádřit jako:

$$l_{cuc} = N_\omega \cdot l_{cu}$$

3.18 Celková délka vinutí

Kde:

l_{cu} *Je střední délka jednoho závitu*
 l_{cuc} *Je celková délka vinutí jedné cívky*

Výpočet střední délky závitu cívky

$$l_{cu} = k_{\check{c}v} \cdot 2 \cdot \left[\frac{\pi \cdot (D_s + H_z)}{p_s} - \frac{\left(\frac{\pi \cdot (D_s + H_z)}{p_s} - (2 \cdot l_{st} + l_{mg}) \right)}{2} \right] + 2 \cdot l_{ef}$$

3.19 Střední délka jednoho závitu

Kde:

$k_{\check{c}v}$ *Koeficient čela vinutí (přibližně 1,05 ÷ 1,1)*

3.1.6 Volba permanentního magnetu

Volba permanentního magnetu by měla zohledňovat cenové nároky a technické podmínky provozu stroje. Zejména pracovní teplotu stroje, která dlouhodobě nesmí překračovat pracovní teplotu permanentního magnetu. Dalším specifikem je umístění stroje, ze kterého vycházejí požadavky nejen na korozní odolnost vnějších částí stroje, ale i permanentních magnetů.

Rovnice 3.20 uvádí výpočet objemu jednoho permanentního magnetu V_{pm} .

$$V_{pm} = l_{pm} \cdot l_{ef} \cdot H_{sc}$$

3.20 Výpočet objemu jednoho PM

3.1.7 Proud vinutím stroje

Proud jedním vodičem vinutím stroje, lze vypočítat podle rovnice

$$I_1 = J \cdot S_v$$

3.21 *Proud jedním vodičem*

Kde:

$$\begin{array}{ll} I_1 & \text{Proud jedním vodičem vinutí} \\ J & \text{Proudová hustota [A/mm}^2\text{]} \end{array}$$

Proudová hustota vinutí je volena na základě konstrukce stroje, jeho rozměrů, způsobu chlazení, požadavku na maximální provozní teplotu a materiál pláště stroje. Po přepočtu proudové hustoty na proud procházející jedním vodičem, zohledňuje také nejmenší možný průřez vodiče, který lze pro vinutí použít. V [24] je uveden doporučený rozsah proudové hustoty 3 – 6 A/mm². Publikace se zabývá generátory pro větrné turbíny, uvedený rozsah je v ní uvažován pro generátor s vnějším průměrem 60mm a délkou 70mm.

Celkový proud jedním vinutím, lze vyjádřit jako součet proudu ve všech vodičích cívky, tedy:

$$I_c = I_1 \cdot N_w \quad 3.22 \quad \text{Celkový proud vinutí}$$

$$I_c \quad \text{Celkový proud vinutím}$$

3.1.8 Příkon stroje

Předpokládaný příkon stroje lze vyjádřit:

$$P_1 = 3 \cdot E \cdot I_1 \quad 3.23 \quad \text{Příkon stroje}$$

3.1.9 Rychlost stroje

Rychlost otáčení rotoru FSPM stroje lze uvažovat jako rychlost otáčení synchronního pole statoru. Nejdříve je potřeba vyjádřit otáčky stroje za minutu:

$$N = \frac{60 \cdot f}{p_s} \quad 3.24 \quad \text{Otáčky rotoru za minutu}$$

Kde:

$$N \quad \text{Otáčky rotoru za minutu}$$

Úhlová rychlost rotoru stroje je pak rovna:

$$\omega_r = \frac{2 \cdot \pi \cdot N}{60} \quad 3.25 \quad \text{Úhlová rychlost rotoru}$$

3.1.10 Magnetická indukce ve vzduchové mezeře

Základní odhad magnetické indukce ve vzduchové mezeře, lze definovat jako vektorový součet stejnosměrné a střídavé složky. Stejnosměrná složka magnetické indukce je vybuzena permanentním magnetem, střídavá pak statorovým vinutím. Pro sestavení zjednodušeného vzorce je uvažováno zanedbání rozptylu magnetické indukce v magnetickém obvodu, také není uvažován vzájemný vliv permanentních magnetů a vinutí jednotlivých fází.

$$B = \sqrt{B_r^2 + B_v^2} \cdot k_b$$

Kde:

$$k_b = (0,8 \div 0,9)$$

Koeficient zohledňující ztráty v železe

3.1.11 Hmotnost stroje

Celková hmotnost stroje lze vyjádřit jako součet váhy hlavních částí (plechů statoru a rotoru, permanentních magnetů a vinutí) s jistou korekcí zohledňující volbu typu ložisek (keramické, ocelové, silikonové...), pláště stroje (plast, nemagnetická ocel, mosaz,..), délku a materiál hřídele.

$$m_{FSPM} = k_m \cdot (m_{cu} + m_{sp} + m_{PM} + m_r + m_h)$$

3.26 *Hmotnost stroje*

Kde:

m_{cu} *Hmotnost vinutí*

m_{sp} *Hmotnost statorových plechů*

m_{PM} *Hmotnost permanentních magnetů*

m_r *Hmotnost rotoru*

m_h *Hmotnost hřídele*

k_m *Koeficient celkové hmotnosti $k_m > 1$ (zohledňující volbu materiálu / typu ložisek, pláště stroje, délku rotoru)*

3.1.11.1 Hmotnost vinutí

Z celkové délky vinutí stroje – součtu délky vinutí na všech pólech: $p_s \cdot l_{cuc}$, pak lze odvodit celkovou váhu vinutí jako:

$$m_{cu} = V_{cu} \cdot \rho_{cu} = p_s \cdot l_{cuc} \cdot S_v \cdot \rho_{cu}$$

3.27 *Hmotnost vinutí*

Kde:

V_{cu} *Objem vinutí*

ρ_{cu} *Hustota mědi (8 960 kg.m⁻³)*

3.1.11.2 Hmotnost statorových plechů

$$m_{sp} = V_{sp} \cdot \rho_{sp} = l_{ef} \cdot k_{fe} \cdot \left[\pi \cdot \left(\frac{D_0}{2} \right)^2 - \pi \cdot \left(\frac{D_s}{2} \right)^2 - S_{cuc} - p_s \cdot l_{pm} \cdot H_{sc} \right] \cdot \rho_{sp}$$

3.28 *Hmotnost statorových plechů*

Kde:

V_{sp} *Objem statorových plechů*

ρ_{sp} *Hustota statorových plechů (třída 35JN210 ~ 7 600 kg.m⁻³)*

k_{fe} *Koeficient plnění železa ($k_{fe} \sim 0,95 \div 1$) hodnota se odečítá z tabulek na základě zvoleného typu plechu.*

3.1.11.3 Hmotnost permanentních magnetů

$$m_{PM} = V_{PM} \cdot \rho_{PM} = p_s \cdot l_{pm} \cdot l_{ef} \cdot H_{sc} \cdot \rho_{PM}$$

3.29 *Hmotnost permanentních magnetů*

Kde:

ρ_{PM} *Hustota permanentního magnetu (neodymové ~ 7 488 kg.m⁻³)*

3.1.11.4 Hmotnost rotoru

Hmotnost rotoru se skládá pouze z hmotnosti hřídele a rotorových plechů. Pro hmotnost rotorových plechů lze definovat rovnici:

$$m_r = V_r \cdot \rho_{sp} = l_{ef} \cdot k_{fe} \cdot \rho_{sp} \cdot \left[\pi \cdot \left(\frac{D_s}{2} - \delta - 2 \cdot l_r \right)^2 + 2 \cdot l_r \cdot p_r \left(\frac{1,5 \cdot l_r + l_r}{2} \right) - \pi \cdot \left(\frac{D_h}{2} \right)^2 \right]$$

3.30 *Hmotnost rotorových plechů*

Kde:

V_r *Objem rotorových plechů*

D_h *Průměr hřídele*

Jelikož jsou proporce hřídele předem těžko odhadnutelné, budeme při výpočtu předpokládat její dvojnásobnou délku, oproti efektivní délce stroje. Tím by měla vzniknout dostatečná rezerva zvětšení délky stroje s uvažováním čel vinutí a ložiskových štítů. Běžně

používané materiály na hřídele malých strojů, jsou například: nemagnetická ocel, mosaz a slitiny hliníku. Pro hmotnost hřídele, tedy bude platit rovnice:

$$m_h = V_h \cdot \rho_h = 2 \cdot l_{ef} \cdot \pi \cdot \left(\frac{D_h}{2}\right)^2 \cdot \rho_h$$

3.31 Hmotnost hřídele

Kde:

V_h

Objem hřídele

ρ_h

Hustota materiálu hřídele

3.2 Návrh FSPM stroje 12 / 14

Označení 12 / 14 udává poměr pólů statoru a pólů rotoru, navrhovaný FSPM stroj tedy bude mít 12 statorových pólů a 14 rotorových pólů. Stroj bude napájen třífázovým napětím s efektivní hodnotou 24V.

Pro návrh jsou uvažovány rozměry stroje jako hlavní kritérium, definované pomocí vnějšího průměru a délky statoru.

Zvolené parametry jsou uvedeny v tabulce 2

Tabulka 2 volené parametry navrhovaného stroje FSPM 12/14

<i>Vnější průměr statoru</i>	$D_o [mm]$	150
<i>Efektivní délka stroje</i>	$l_{ef} [mm]$	50
<i>Napětí⁵</i>	$E [V]$	24
<i>Počet fází</i>	m	3
<i>Počet pólů statoru</i>	p_s	12
<i>Počet pólů rotoru</i>	p_r	14
<i>Koeficient plnění</i>	k_p	0,7
<i>Šířka vzduchové mezery</i>	$\delta [mm]$	1
<i>Frekvence</i>	$F [Hz]$	50
<i>Průměr hřídel</i>	$D_h [mm]$	20
<i>Proudová hustota</i>	$J [A \cdot mm^{-2}]$	5

3.2.1 Rozložení statoru

Nejdříve bude provedeno ověření, správného zvolení počtu pólů rotoru a statoru. Následný návrh statoru bude vycházet z podmínky: $l_{st} = l_s = l_{pm} = l_r = H_s = \frac{T_s}{4}$, tedy šířka pólu = kratší podstavě lichoběžníkové oblasti pro vinutí = šířce permanentního magnetu = šířka jha.

3.2.1.1 Ověření správného zvolení počtu pólů

Ověření jestliže zvolený počet pólů vyhovuje výrazům, které definuje rovnice 3.1 a rovnice 3.2. Počet statorových pólů je vyjádřen $p_s = k_1 \cdot m$, pokud je počet fází $m=3$, a zvolíme konstantu $k_1=4$, potom:

$$p_s = k_1 \cdot m = 4 \cdot 3 = 12$$

⁵ Napájecí napětí stroje je označeno E – převzato z použité literatury

Jestliže zvolíme konstantu $k_2=1$ a dosadíme počet pólů statoru do rovnice 3.2, dostáváme:

$$p_r = p_s \pm 2 \cdot k_2 = 12 \pm 2 \cdot 1 = \begin{array}{l} 10 \\ 14 \end{array}$$

Počet zvolených pólů, vyhovuje rovnicím.

3.2.1.2 Hlavní rozměry statoru

Vnitřní průměr statoru, lze dle rovnice 3.10 vyjádřit (vnější průměr statoru byl zvolen):

$$D_s = D_0 \cdot \left(0,8 - \frac{0,8}{p_s}\right) = 150 \cdot \left(0,8 - \frac{0,8}{12}\right) = 110$$

Vnitřní průměr statoru $D_s = 110$ mm, v dalším kroku budu předpokládat rovnoměrné rozložení statoru a pro vedu výpočet pro základní rozložení.

$$l_{st} = l_s = l_{pm} = l_r = H_s = \frac{\pi \cdot D_s}{p_s \cdot 4} = \frac{\pi \cdot 110}{12 \cdot 4} = 7,20mm$$

Při rovnoměrném rozložení statoru, odpovídá šířka permanentního magnetu, 7,20mm. Pro vhodnější rozměry permanentního magnetu a získání více místa pro vinutí a pro větší šíři zubu statorového pólu, jsem se rozhodl, zaokrouhlit šířku permanentního magnetu na $l_{pm} = 6mm$, je tedy nutné přepočítat ostatní rozměry:

$$l_{st} = l_s = l_r = H_s = \frac{\pi \cdot D_s - p_s \cdot l_{pm}}{p_s \cdot 3} = \frac{\pi \cdot 110 - 12 \cdot 6}{12 \cdot 3} = 7,59mm$$

Pro jednodušší výrobu (stříh) statorového „C“ plechu, volím šířku pólu statorového pólu, stejně jako šířku rotorového pólu, $l_{st} = l_r = 7$ mm. Šířka mezery pro vinutí na vnitřním poloměru statoru l_s je tedy nutné dopočítat jako:

$$l_s = \frac{\pi \cdot D_s - p_s \cdot l_{pm} - 2 \cdot p_s \cdot l_{st}}{p_s} = \frac{\pi \cdot 110 - 12 \cdot 6 - 2 \cdot 12 \cdot 7}{12} \sim 8,79mm$$

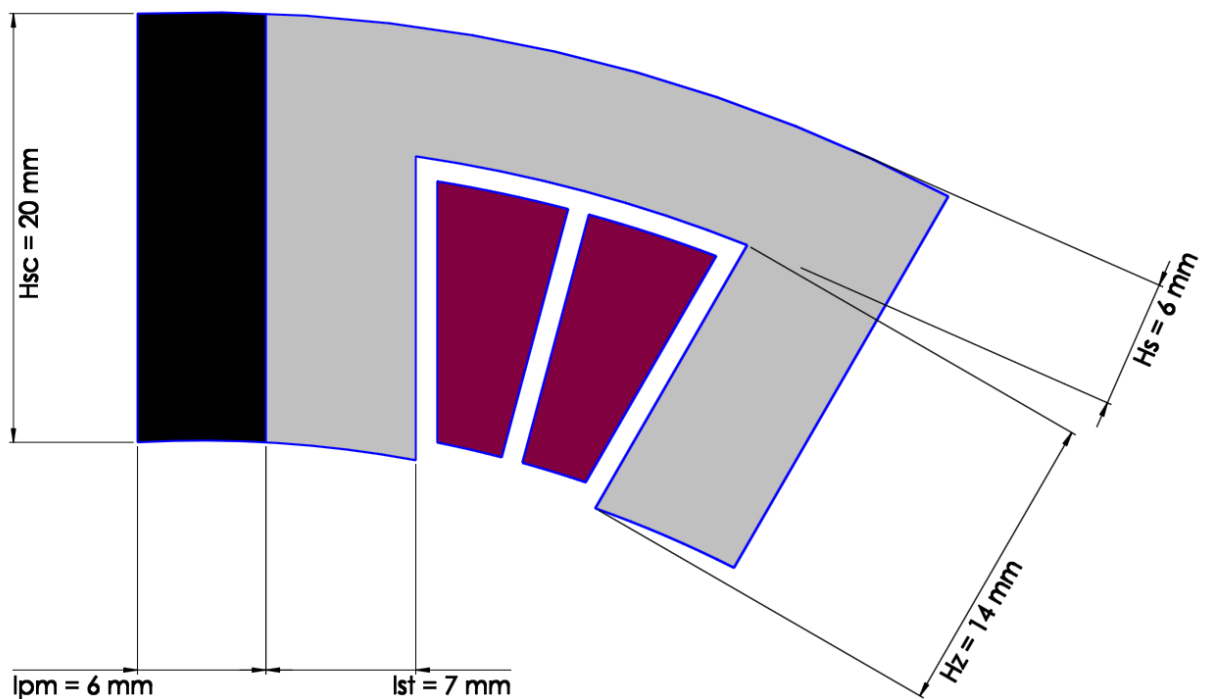
Výška jha by měla vyhovovat rovnici 3.12. Výšku jha tedy volím 6 mm.

$$H_s = (0,7 \div 1) \cdot l_{st} = 6 \text{ mm}$$

Výška zubu pólu lze vypočítat jako:

$$H_z = H_{sc} - H_s = \frac{D_0 - D_s}{2} - H_s = \frac{150 - 110}{2} - 6 = 14 \text{ mm}$$

Obrázek 24 zobrazuje vypočítané rozměry statorového pólu.



Obrázek 24 Rozměry statorového pólu

3.2.1.3 Výpočet plochy pro vinutí

Výpočet celkové plochy pro statorové vinutí je proveden dle rovnice 3.13, tedy:

$$\begin{aligned} S_{cuc} &= \pi \cdot \left(\frac{D_s}{2} + H_z \right)^2 - \pi \cdot \left(\frac{D_s}{2} \right)^2 - p_s \cdot H_z \cdot (l_{st} + l_{st} + l_{pm}) \\ &= \pi \cdot \left(\frac{110}{2} + 14 \right)^2 - \pi \cdot \left(\frac{110}{2} \right)^2 - (12 \cdot 14) \cdot (2 \cdot 7 + 6) = 2\,093,80 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Plocha pro jedno vinutí je tedy:

$$S_{cu} = \frac{S_{cuc}}{2 \cdot p_s} = \frac{2\,093,80}{2 \cdot 12} = 87,24 \text{ mm}^2$$

3.2.1.4 Výpočet vinutí

Při uvažování koeficientu $k_p=0,7$ a průřezu vodiče vinutí $S_v = 0,5 \text{ mm}^2$ (průměr vodiče 0,8 mm) lze počet závitů jedné cívky statorového vinutí vypočítat podle rovnice 3.17 jako:

$$N_\omega = \frac{S_{cu} \cdot k_p}{S_v} = \frac{87,24 \cdot 0,7}{0,5} = 122,13$$

Výsledný počet závitů vinutí je 122,13 závitů, po zaokrouhlení na celé číslo s jistou rezervou, je výsledný počet závitů $N_\omega=120$.

Dalším důležitým parametrem je střední délka vinutí Střední délka vinutí lze vyjádřit jako součet efektivní délky stroje a šířky vinutí.

Výpočet střední délky vinutí je proveden dle rovnice 3.19 Střední délka jednoho závitu:

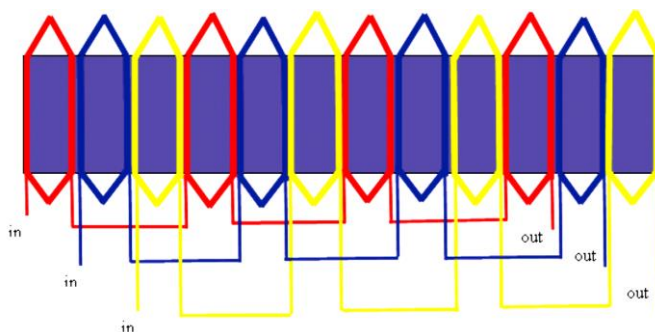
$$\begin{aligned} l_{cu} &= k_{\check{c}v} \cdot 2 \cdot \left[\frac{\pi \cdot (D_s + H_z)}{p_s} - \frac{\left(\frac{\pi \cdot (D_s + H_z)}{p_s} - (2 \cdot l_{st} + l_{mg}) \right)}{2} \right] + 2 \cdot l_{ef} \\ &= 1,1 \cdot 2 \cdot \left[\frac{\pi \cdot (110 + 14)}{12} - \frac{\left(\frac{\pi \cdot (110 + 14)}{12} - (2 \cdot 7 + 6) \right)}{2} \right] + 2 \cdot 50 \\ &= 167,71 \text{ mm} \end{aligned}$$

Střední délka jedno závitů je tedy přibližně 167,71 mm, přibližná celková délka vinutí jedné cívky lze vyjádřit:

$$l_{cuc} = N_{\omega} \cdot l_{cu} = 120 \cdot 171,42 = 20\,125,13 \text{ mm}$$

Z toho lze odvodit, že celková délka vodiče průřezu $0,5 \text{ mm}^2$ potřebná pro vinutí tohoto stroje je 241 501,58 mm ($p_s \cdot l_{cuc}$), to je 241,50 m.

Způsob rozložení vinutí je znázorněn na obrázku 25, vinutí je možné zapojit do hvězdy i trojúhelníka, oproti asynchronním motorům je v jedné drážce uloženo vždy jen jedno vinutí.



Obrázek 25 Rozložení vinutí FSPM

Zdroj: [22]

3.2.2 Rozložení rotoru

Při návrhu statoru byla definována úvaha, že šířka pólu rotoru je shodná s šířkou pólu statorového pólu: $l_{st} = l_s = l_{pm} = l_r = H_s = \frac{T_s}{4}$. Šířka rotorového pólu v horní část (u statoru) je tedy $l_r = 7 \text{ mm}$. Pokud zvolím velikost vzduchové mezery $\delta = 1 \text{ mm}$ lze pomocí rovnice 3.16 určit vzdálenost mezi rotorovými póly T_r jako:

$$T_r = \frac{\pi \cdot D_s - 2 \cdot \delta}{p_r} = \frac{\pi \cdot 110 - 2 \cdot 1}{14} = 24,24 \text{ mm}$$

Kde

$$D_s - 2 \cdot \delta = D_r \quad \text{Je průměr rotoru}$$

Výška rotorového pólu lze dle rovnice 3.15 vypočítat:

$$H_r = 2 \cdot l_r = 2 \cdot 7 = 14,00 \text{ mm}$$

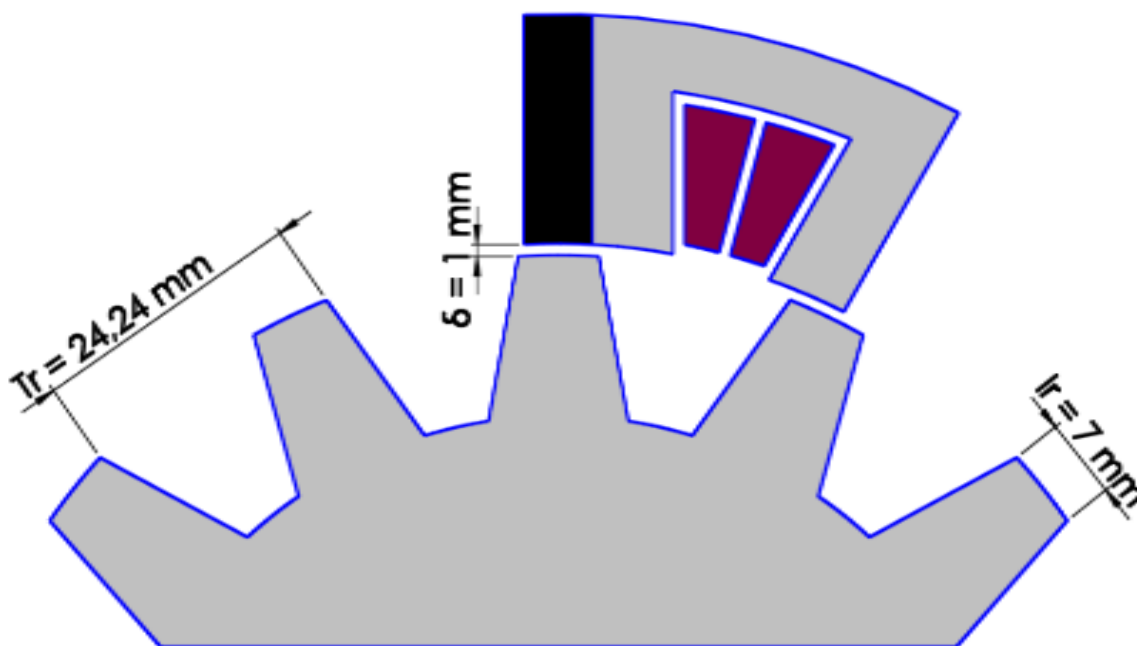
Přibližná šířka rotorového pólu u hřídele, $1,5 \cdot l_r = 10,5 \text{ mm}$, pro ověření vhodně zvoleného rozměru, lze uvažovat podmínku:

$$\frac{\pi \cdot (D_r - 2 \cdot H_r)}{p_r} \geq 1,5 \cdot l_r$$

$$\frac{\pi \cdot (108 - 2 \cdot 14)}{14} \geq 1,5 \cdot 7$$

$$17,95 \geq 10,5$$

Jelikož přibližná šířka rotorového pólu u hřídele vyhovuje podmínce (součet šířky všech pólu, není větší než obvod rotoru o příslušném poloměru) a maximální šířka může být 17,95 mm, volím šířku rotorového pólu u hřídele 12 mm.



Obrázek 26 řez rotoru stroje

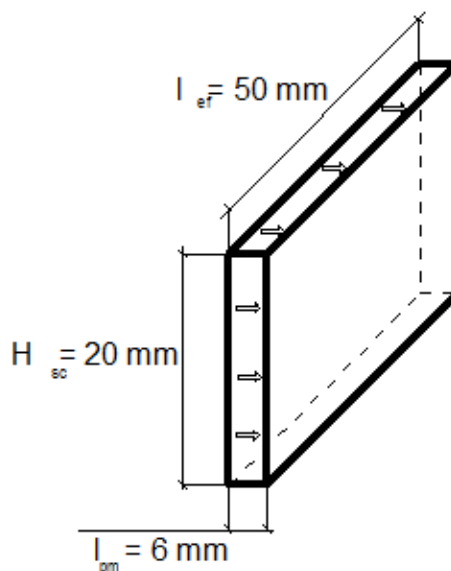
3.2.3 Volba permanentního magnetu

Pro své vlastnosti jsou zvoleny permanentní magnety NdFeB (typ N35H) s remanentní indukcí 1,2 T. Počet permanentních magnetů je roven počtu statorových pólu, $p_s = 12$. Obrázek 27 naznačuje rozměry a směr magnetování zvolených permanentních magnetů. Curieova teplota je 310 °C a maximální provozní teplota do 120°C. Koercivita je větší než 876 kA/m a

vnitřní koercivita je větší než 1353 kA/m. Energetický součin $B \cdot H_{max}$ je 263-287 kJ/m. Přídržná síla je přibližně 5,5 kg. Váha magnetu je 44,9 g. Antikorozní povrchová ochrana je třívrstvá - Nikl + Měď + Nikl. Technický list je uveden v příloze práce.

Objem permanentního magnetu lze vypočítat dle rovnice 3.20:

$$V_{pm} = l_{pm} \cdot l_{ef} \cdot H_{sc} = 6 \cdot 50 \cdot 20 = 7\,199,48 \text{ mm}^3$$



Obrázek 27 Rozměry zvolených permanentních magnetů

3.2.4 Hmotnost stroje

3.2.4.1 Hmotnost vinutí

Hmotnost vinutí vypočítaná podle rovnice 3.27 je 1,06kg.

$$m_{cu} = V_{cu} \cdot \rho_{cu} = p_s \cdot l_{cuc} \cdot S_v \cdot \rho_{cu} = 241,50 \cdot 0,5 \cdot 10^{-6} \cdot 8\,960 = 1,08 \text{ kg}$$

3.2.4.2 Hmotnost statorových plechů

Pro výpočet dle rovnice 3.28 volím $k_{fe} = 0,98$, na základě tabulkových hodnot pro materiál plechů viz tabulka 3.

Tabulka 3 Charakteristické vlastnosti statorového a rotorového plechu

Třída	Tloušťka [mm]	ρ_{fe} [kg.m ⁻³]	$\Delta\rho_{(1,5T, 50Hz)}$ [W.kg ⁻¹]	Magnetická indukce [T]				k_{fe}
				B 10	B 25	B 75	B 100	
35JN210	0,35	7 600		1,47	1,57	1,66	1,77	0,98

$$\begin{aligned}
 m_{sp} &= V_{sp} \cdot \rho_{sp} = l_{ef} \cdot k_{fe} \cdot \left[\pi \cdot \left(\frac{D_0}{2} \right)^2 - \pi \cdot \left(\frac{D_s}{2} \right)^2 - S_{cuc} - p_s \cdot l_{pm} \cdot H_{sc} \right] \cdot \rho_{sp} \\
 &= 50 \cdot 0,98 \cdot \left[\pi \cdot \left(\frac{150}{2} \right)^2 - \pi \cdot \left(\frac{110}{2} \right)^2 - 2\,093,8 - 12 \cdot 6 \cdot 20 \right] \cdot 10^{-9} \cdot 7\,600 \\
 &= 1,73 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

3.2.4.3 Hmotnost permanentních magnetů

$$m_{PM} = V_{PM} \cdot \rho_{PM} = p_s \cdot l_{pm} \cdot l_{ef} \cdot H_{sc} \cdot \rho_{PM} = (12 \cdot 6 \cdot 50 \cdot 20) \cdot 10^{-9} \cdot 7488 = 0,54 \text{ kg}$$

3.2.4.4 Hmotnost rotorových plechů

$$\begin{aligned}
 m_r &= V_r \cdot \rho_{sp} = l_{ef} \cdot k_{fe} \cdot \left[\pi \cdot \left(\frac{D_s}{2} - \delta - 2 \cdot l_r \right)^2 + 2 \cdot l_r \cdot p_r \left(\frac{1,5 \cdot l_r + l_r}{2} \right) - \pi \cdot \left(\frac{D_h}{2} \right)^2 \right] \\
 &\quad \cdot \rho_{sp} \\
 &= 50 \cdot 0,98 \cdot \left[\pi \cdot \left(\frac{110}{2} - 1 - 2 \cdot 7 \right)^2 + 2 \cdot 7 \cdot 14 \left(\frac{12 + 7}{2} \right) - \pi \cdot \left(\frac{20}{2} \right)^2 \right] \\
 &\quad \cdot 7\,600 = 3,27 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

3.2.4.5 Hmotnost hřídele

Z běžně používaných materiálů na hřídele malých strojů, byla zvolena mosaz. Hustota mosazi se pohybuje v rozmezí $8\,400 \div 8\,700 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, volím průměrnou hodnotu $8\,550 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

$$m_h = V_h \cdot \rho_h = 2 \cdot l_{ef} \cdot \pi \cdot \left(\frac{D_h}{2} \right)^2 \cdot \rho_h = 2 \cdot 50 \cdot \pi \cdot \left(\frac{20}{2} \right)^2 \cdot 8\,550 = 0,27 \text{ kg}$$

3.2.4.6 Celková hmotnost navrhovaného stroje

Celková hmotnost navrhovaného stroje lze vyjádřit dle rovnice 3.26, volím váhový koeficient $k_m = 1,15$.

$$\begin{aligned}
 m_{FSPM} &= k_m \cdot (m_{cu} + m_{sp} + m_{PM} + m_r + m_h) \\
 &= 1,15 \cdot (1,08 + 1,73 + 0,54 + 3,27 + 0,27) = 7,92 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

Předpokládaná hmotnost stroje je tedy přibližně 7,95 kg.

3.2.5 Rychlost otáčení

Pro běžný chod předpokládám síťovou frekvenci 50Hz. Otáčky rotoru stroje a úlovou rychlost lze vyjádřit dle rovnice 3.24 a 3.25.

Tedy počet otáček rotoru za minutu:

$$N = \frac{60 \cdot f}{p_s} = \frac{60 \cdot 50}{12} = 250 \text{ ot./min}$$

Úhlový rychlost rotoru:

$$\omega_r = \frac{2 \cdot \pi \cdot N}{60} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 250}{60} = 26,18 \text{ rad/s}$$

3.2.6 Proud vinutím

Na základě publikace [24] byla zvolena proudová hustota vynutí $J = 5 \text{ [A.mm}^{-2}\text{]}$, z té lze dle rovnice 3.21 vypočítat předpokládaný proud jedním vodičem I_1 . Celkový proud vinutím I_c , lze vypočítat po dosazení do rovnice 3.22.

$$I_1 = J \cdot S_v = 5 \cdot 0,5 = 2,5 \text{ A}$$

$$I_c = I_1 \cdot N_\omega = 2,5 \cdot 120 = 300 \text{ A}$$

3.2.7 Předpokládaný příkon stroje

Předpokládaný příkon stroje dle rovnice 3.23

$$P_1 = 3 \cdot E \cdot I_1 = 3 \cdot 24 \cdot 2,5 = 180 \text{ VA}$$

3.2.8 Předpokládaný mechanický výkon

Předpokládaný mechanický výkon stroje vypočítáme dle rovnice 3.3.

Nejdříve je však nutné doplnit, do této chvíle nepočítané veličiny (koeficienty):

- Činitel pólového krytí α_s , vyjadřuje poměr mezi celkovou délkou statorových pólů, ku celkovému vnitřnímu obvodu statoru.

$$\alpha_s = \frac{(2 \cdot l_{st} + lp) \cdot p_s}{\pi \cdot D_s} = \frac{(2 \cdot 7 + 6) \cdot 12}{\pi \cdot 110} = 0,69$$

- Na základě [16] byla zvolena účinnost stroje $\eta = 0,95$

- Činitel zkreslení výkonu je předpokládán $K_p = 1,1$
- Činitel zkreslení proudu, na základě simulací a z nich plynoucího malého zkreslení, je předpokládán $K_i = \sqrt{2}$
- Ze simulace v programu FEMM vyšla průměrná hodnota magnetické indukce $B_g = 0,9 T$
- Lineární proudová hustota je vyjádřena z proudové hustoty, jako:

$$A_s = \frac{S_{cu} \cdot J \cdot K_p}{\pi \cdot D_s} = \frac{87,24 \cdot 5 \cdot 1,1}{\pi \cdot 110} = 1,39 A/mm$$

- Činitel rozptylu je zvolen $K_f = 1,4$

Vyjádříme-li z rovnice 3.3 výkon na hřídeli a dosadíme-li výše vypočtené veličiny, dostáváme vztah:

$$\begin{aligned} D_s^2 \cdot l_{ef} &= \frac{2 \cdot p_s}{\pi^2} \cdot \frac{P_2}{\eta \cdot K_p \cdot K_i \cdot B_g \cdot \omega_r \cdot p_r \cdot A_s \cdot K_f \cdot \alpha_s} \Rightarrow P_2 \\ &= \frac{\pi^2}{2 \cdot p_s} \cdot D_s^2 \cdot l_{ef} \cdot \eta \cdot K_p \cdot K_i \cdot B_g \cdot \omega_r \cdot p_r \cdot A_s \cdot K_f \cdot \alpha_s \\ &= \frac{\pi^2}{2 \cdot 12} \cdot 110 \cdot 10^{-6} \cdot 50 \cdot 10^{-3} \cdot 0,95 \cdot 1,1 \cdot \sqrt{2} \cdot 0,9 \cdot 26,18 \cdot 14 \cdot 1,51 \cdot 10^3 \\ &\quad \cdot 1,4 \cdot 0,69 = 171,47 W \end{aligned}$$

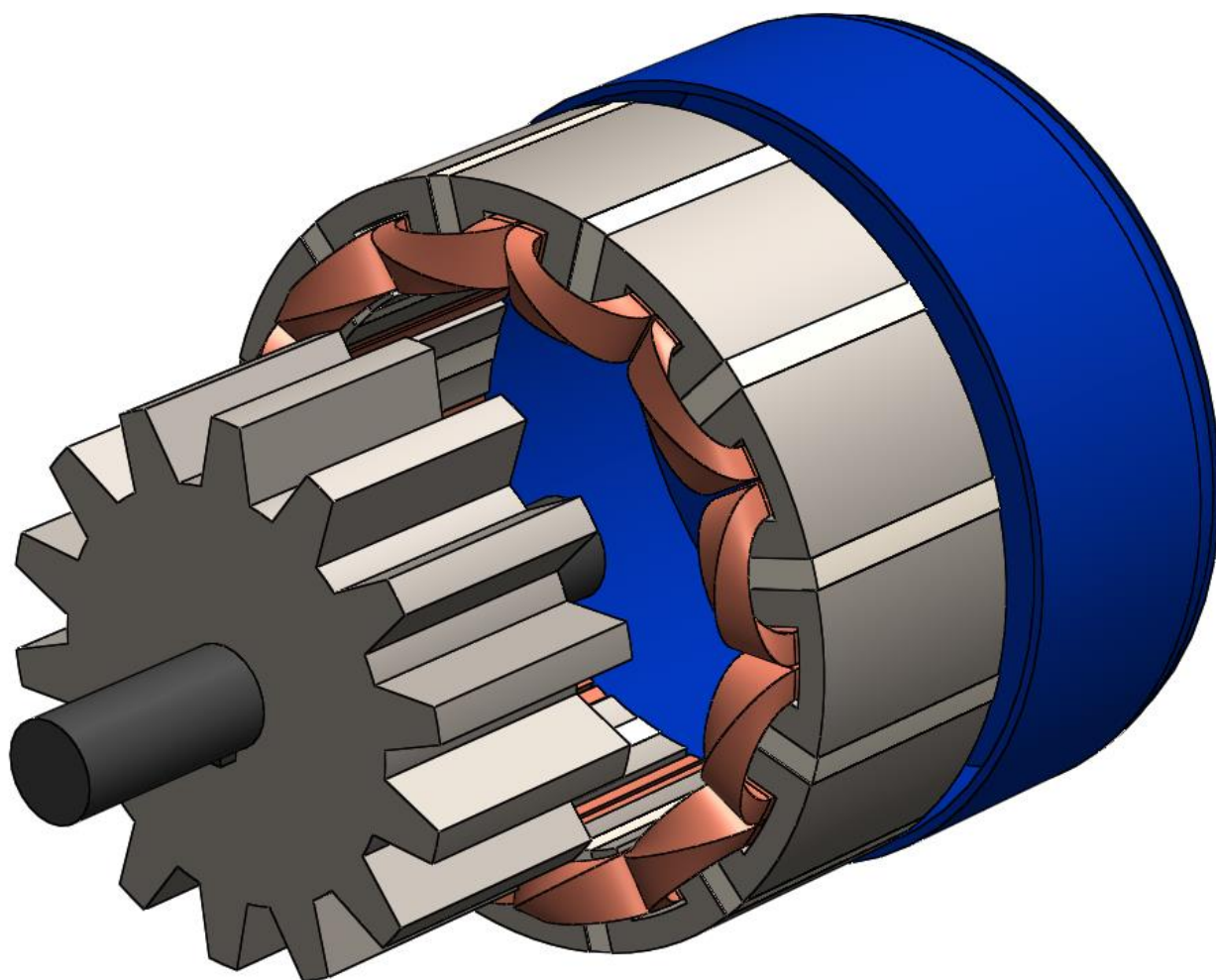
Předpokládaný výkon na hřídeli dle výkonové rovnice je 171,47 W.

3.2.9 Rekapitulace zvolených a vypočítaných rozměrů

Tabulka 4 Rekapitulace zvolených a vypočítaných rozměrů

<i>Vnější průměr statoru</i>	D_o [mm]	150
<i>Efektivní délka stroje</i>	l_{ef} [mm]	50
<i>napětí</i>	E [V]	24
<i>Počet fází</i>	m [-]	3
<i>Počet pólů statoru</i>	p_s [-]	12
<i>Počet pólů rotoru</i>	p_r [-]	14
<i>Koeficient plnění</i>	k_p [-]	0,7
<i>Šířka vzduchové mezery</i>	δ [mm]	1
<i>Průměr hřídel</i>	D_h [mm]	20
<i>Proudová hustota</i>	J [A · mm ⁻²]	5
<i>Frekvence</i>	F [Hz]	50
<i>Vnitřní průměr statoru</i>	D_s [mm]	110
<i>Průměr rotoru</i>	D_r [mm]	108
<i>Šířka permanentního magnetu</i>	l_{pm} [mm]	6
<i>Výška jha</i>	H_s [mm]	6
<i>Výška zubu statorového pólu</i>	H_z [mm]	14
<i>Šířka statorového pólu</i>	l_{st} [mm]	7
<i>Počet závitů</i>	N_ω [-]	120
<i>Střední délka vodiče</i>	L_{cu} [mm]	167,70
<i>Proud vodičem</i>	I_1 [A]	2,5
<i>Celková hmotnost motoru</i>	m_{FSPM} [kg]	7,92
<i>Příkon motoru</i>	P_1 [VA]	180
<i>Výkon na hřídeli</i>	P_2 [W]	171,47
<i>Otáčky rotoru</i>	N [ot/min]	250
<i>Úhlová rychlost rotoru</i>	ω_r [rad/s]	26,18

3.2.10 3D model



Obrázek 28

3D model navrhovaného FSPM stroje

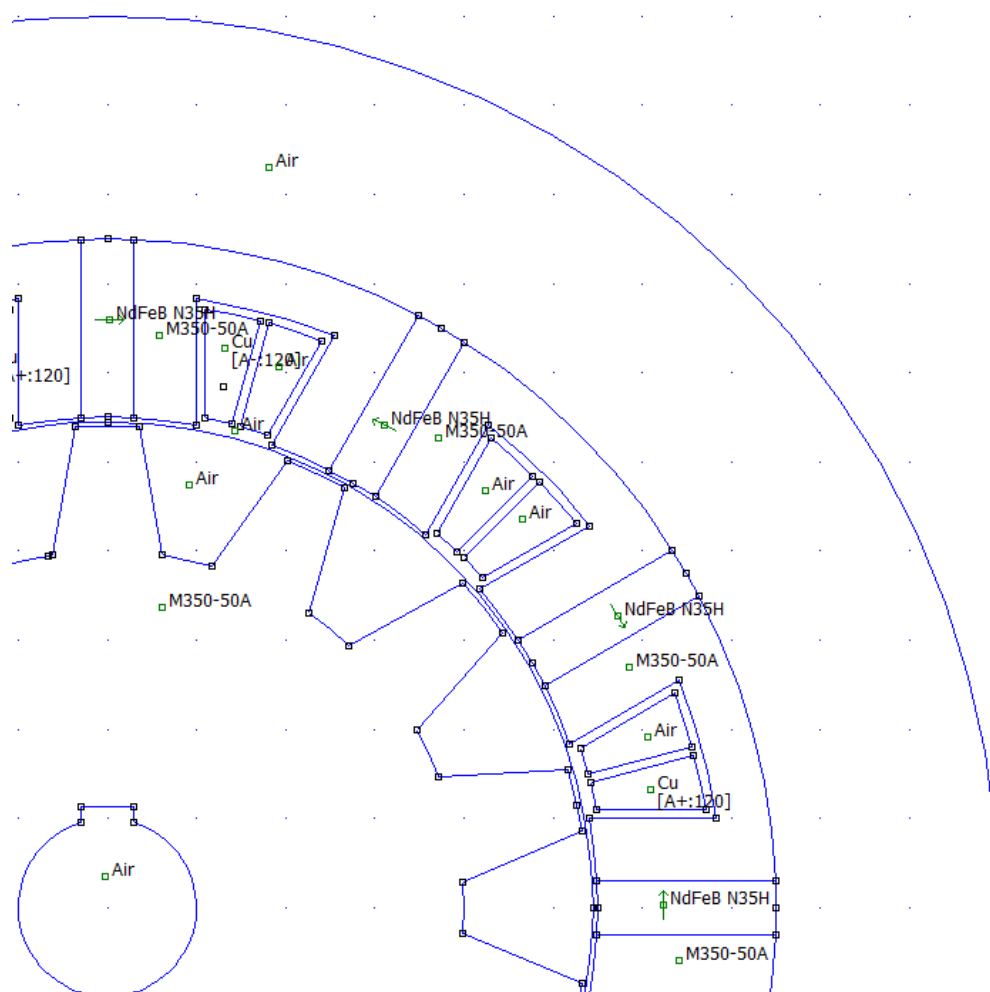
4 Konečně prvkový model FSPM stroje

Konečně prvkový model byl sestavován v programu FEMM. Nejdříve byly do modelu přidány dvě kružnice, jedna s průměrem 200mm pro stanovení okrajové podmínky, druhá s průměrem 109mm, která prochází středem vzduchové mezery a bude na ní odečítán moment stroje a magnetická indukce ve vzduchové mezeře.

Při prvním spuštění programu FEMM, byl vybrán příslušný model a definován magnetická úloha, dále byli definovány použité materiály (měď, permanentní magnet NdFeB N35H, vzduch, a materiál magnetického obvodu – statorové a rotorové plechy M350 – 50A) také byla definována okrajová podmínka na vnější kružnici.

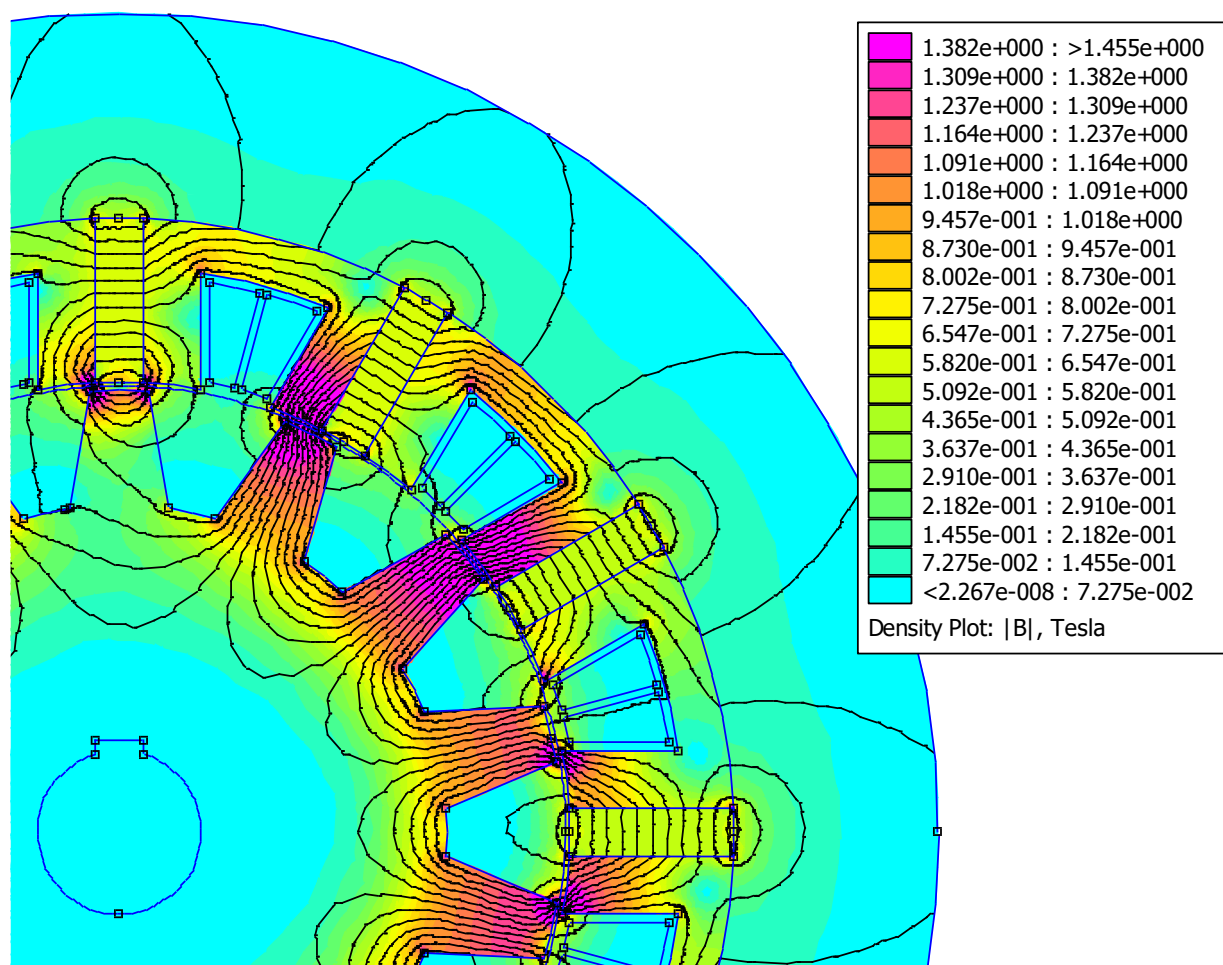
Dalším krokem bylo definováno vinutí jedné fáze – proud závitem 2,5A, 120 závitů, v kladné a záporné proudové hodnotě pro danou stranu cívky. Jednotlivé vlastnosti byly rozmístěny do modelu.

Prvky rotoru byly zařazeny do skupiny 1, při simulaci průběhu indukovaného napětí s nimi bude otáčeno.



Obrázek 29 Definování prvků, FEMM

Obrázek 30 zobrazuje rozložení magnetické indukce FSPM stroje 12/14.

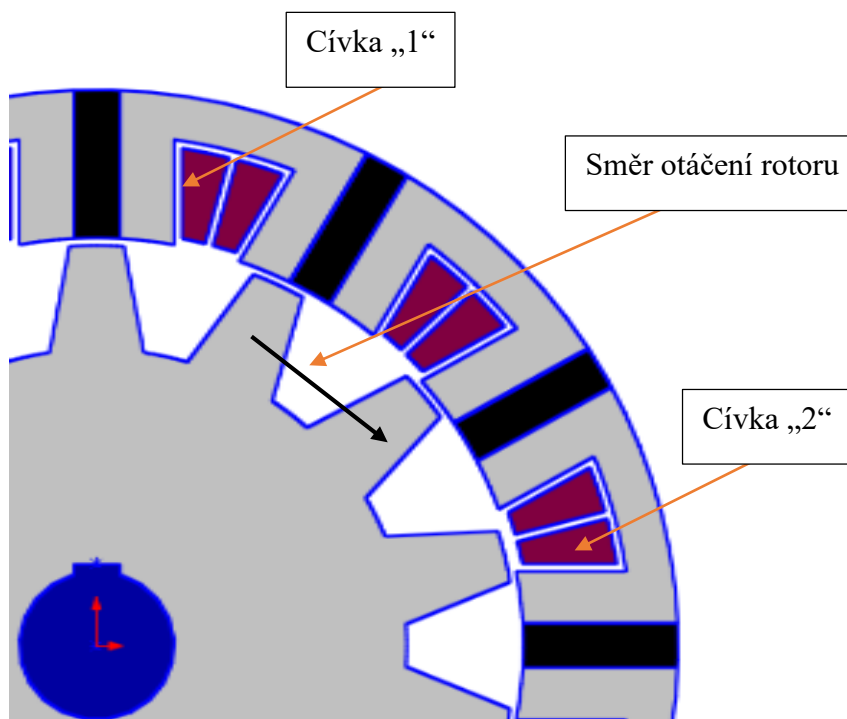


Obrázek 30 FSPM 12/14 - rozložení magnetické indukce

5 Indukované napětí a moment stroje FSPM 12/14

5.1 Indukované napětí

Indukované napětí bylo zjišťováno taktéž pomocí programu FEMM. Externí LUA skript (skript je uveden v příloze práce) otáčel prvky zařazenými do skupiny 1 – rotorem. Otočení bylo rotoru provedeno o $25,7^\circ$, tedy tak aby rotorový pól přešel do polohy předchozího rotorového pólu. Otočení bylo snímáno po $0,071^\circ$, bylo tedy naměřeno 360 hodnot magnetického toku v závislosti na úhlu natočení rotoru.



Obrázek 31 znázornění směru pohybu rotoru

Pro simulaci byl samozřejmě zrušen definovaný proud v cívce statoru. Jelikož předpokladem pro simulaci průběhu indukovaného napětí je generátorický režim stroje.

Předpokladem pro platnost odečtu je rovnice vyjadřující indukované napětí. Jelikož bylo indukované napětí počítáno z řady naměřených hodnot, byla rovnice pro indukované napětí upravena do diskrétního tvaru:

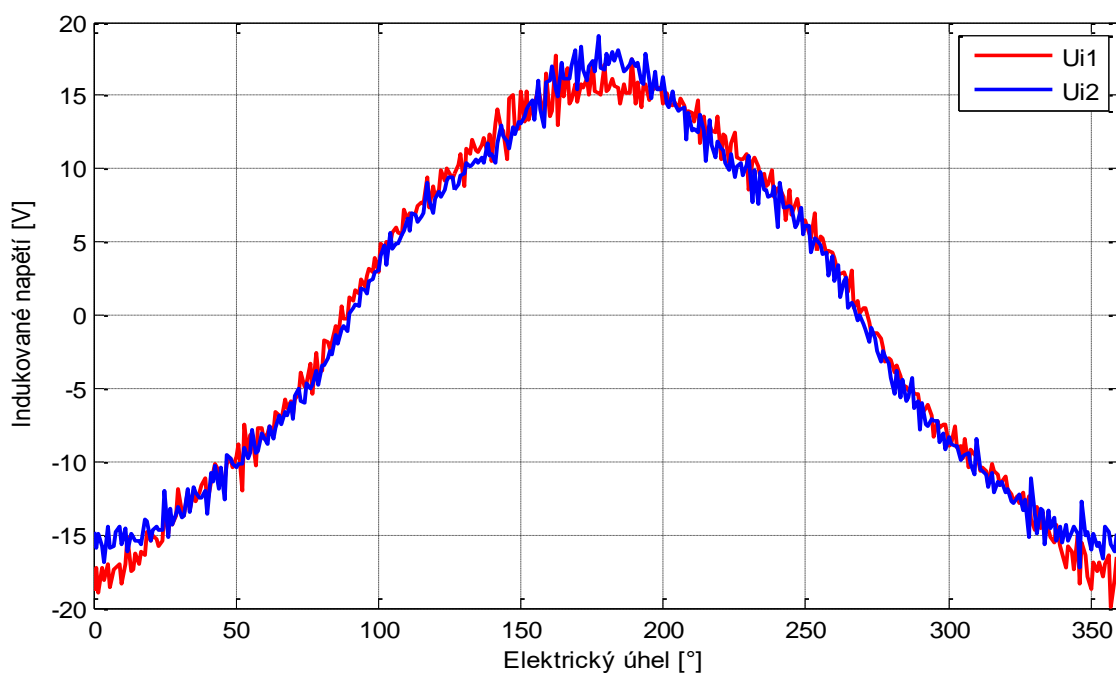
$$U_i = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{N_\omega \cdot (\Phi_{\beta+1} - \Phi_\beta)}{\frac{T}{y}}$$

Kde:

β	<i>Úhel pootočení rotoru</i>
y	<i>Počet odečítaných vzorků</i>
$T = \frac{1}{f}$	<i>Perioda</i>
Φ	<i>Magnetický tok</i>
U_i	<i>Indukované napětí</i>

Tedy indukované napětí je rovno změně magnetického toku v čase.

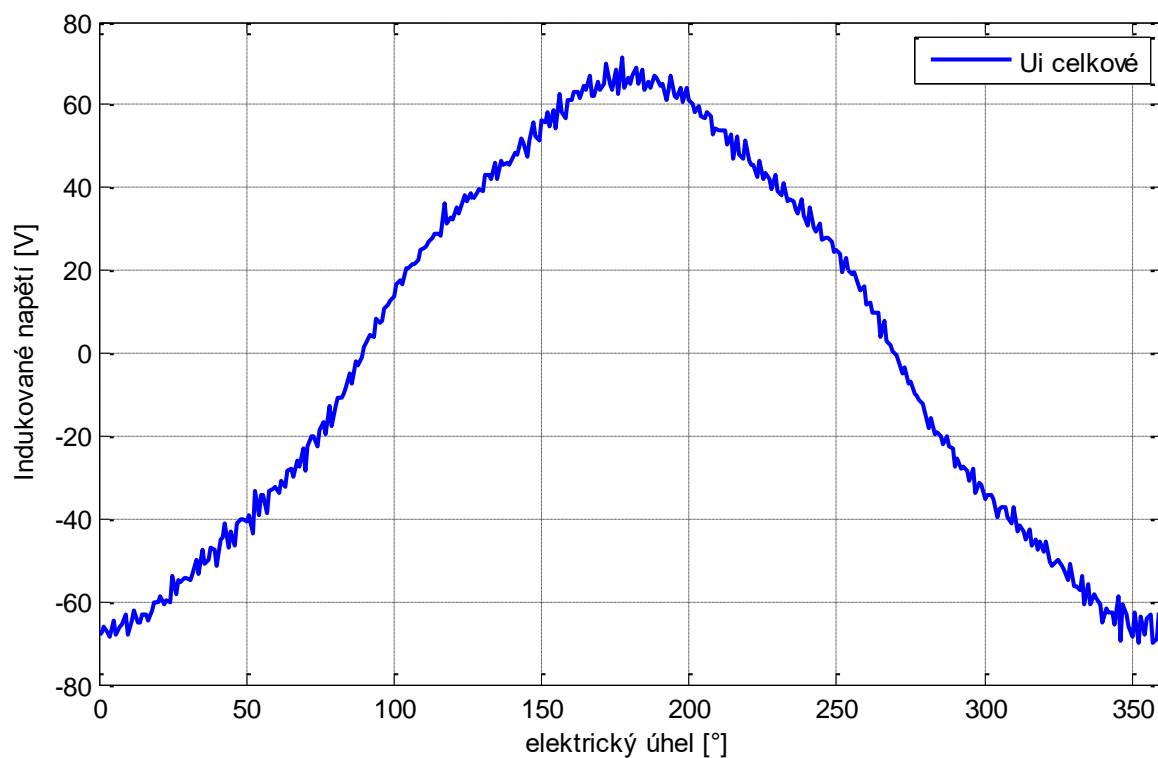
Indukované napětí bylo odečítáno ve všech čtyřech cívkách jednoho vinutí.



Obrázek 32 FSPM 12/14 - průběh indukovaného napětí v 1. a 2. cívce jednoho vinutí

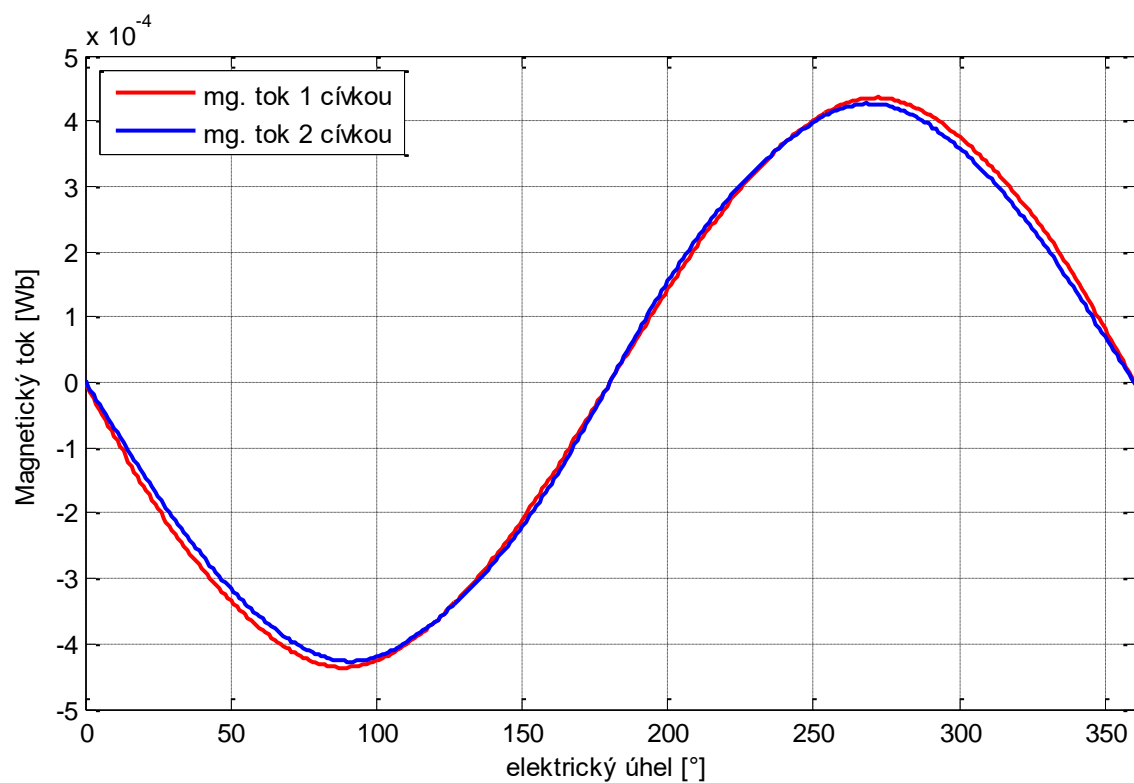
Obrázek 32 znázorňuje průběh indukovaného napětí v první a druhé cívce jedné fáze. Průběh indukovaného napětí ve třetí cívce je shodný s průběhem v první (jedná se o protilehlé cívky) a průběh ve čtvrté cívce je shodný s průběhem v druhé.

Celková hodnota indukovaného napětí je součtem indukovaného napětí v jednotlivých cívkách (v podstatě sériově řazené napěťové zdroje). Celkové indukované napětí je zobrazeno na obrázku 33.



Obrázek 33 FSPM 12/14 - celkové indukované napětí jedné fáze

Obrázek 34 znázorňuje průběh magnetického toku v první a druhé cívkě jedné fáze, je z něj patrné, že průběh je skoro sinusový. Průběhy v protilehlých cívkách jednoho vinutí jsou shodné.

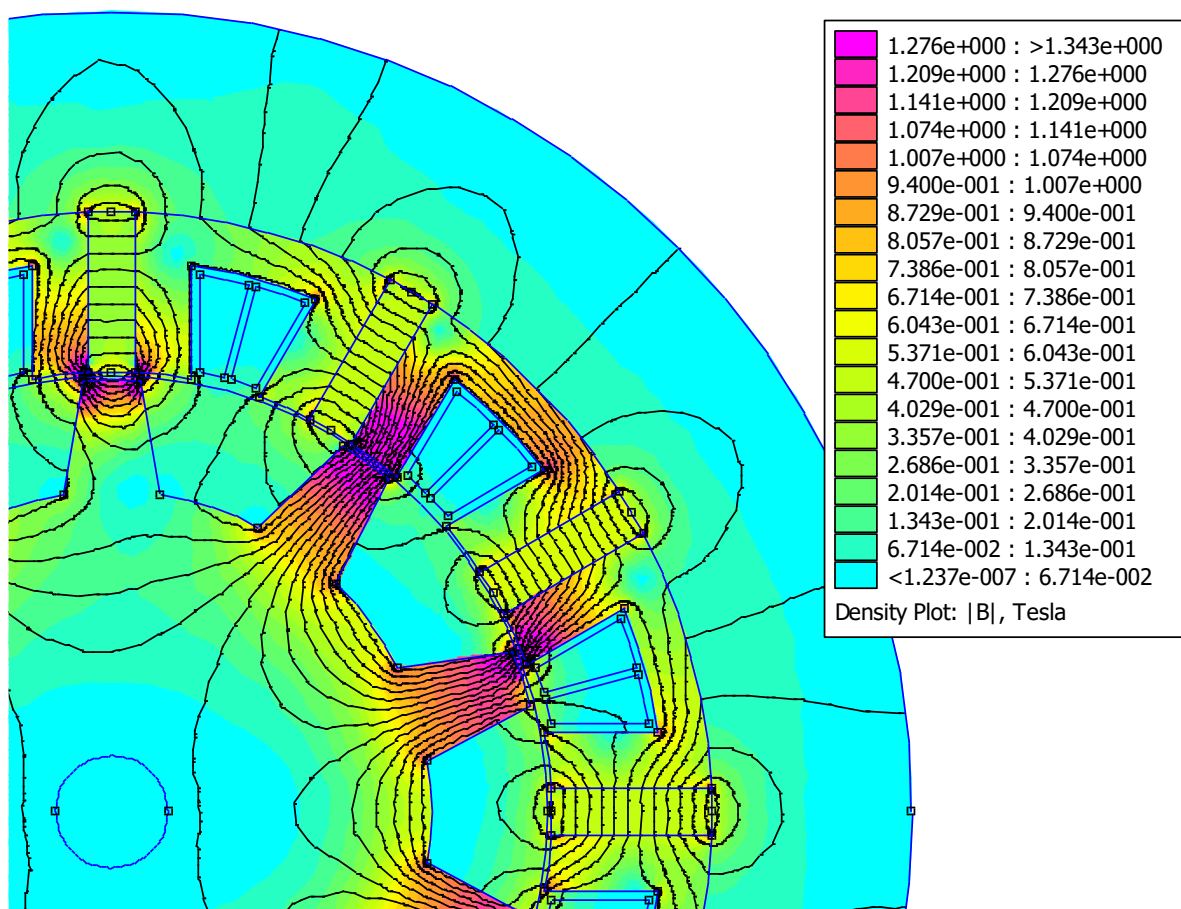


Obrázek 34 FSPM 12/14 - průběh magnetického toku v 1. a 2. cívkě jednoho vinutí

5.1.1 Porovnání indukovaného napětí FSPM stroje 12/14 a 12/10

Pro možné porovnání získaných hodnot magnetického toku a indukovaného napětí, jsem sestrojil model FSPM stroje 12/10. Stator je naprosto totožný jako u navrhovaného FSPM 12/14. Šířka a výška rotorového pólu je také shodná, jediným rozdílem je vzdálenost mezi póly rotoru T_r .

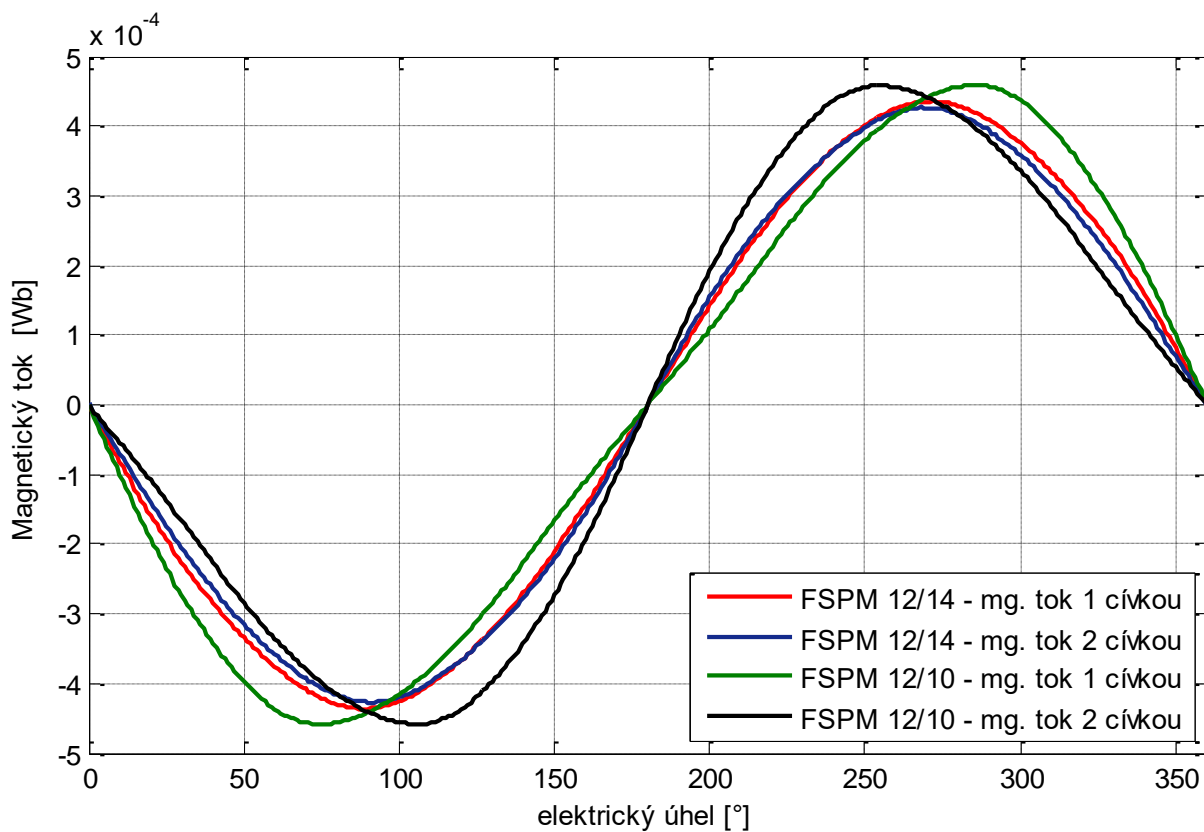
Obrázek 35 zobrazuje rozložení magnetické indukce stroje FSPM 12/10. Z barevné legendy je patrné, že magnetická indukce v tomto případě dosahuje nižších hodnot, než u stroje s rozložením 12/14. (například maximální hodnota magnetické indukce stroje FSPM 12/14 je 1,455 T a stroje FSPM 12/10 je 1,343 T)



Obrázek 35 FSPM 12/10 - rozložení magnetické indukce

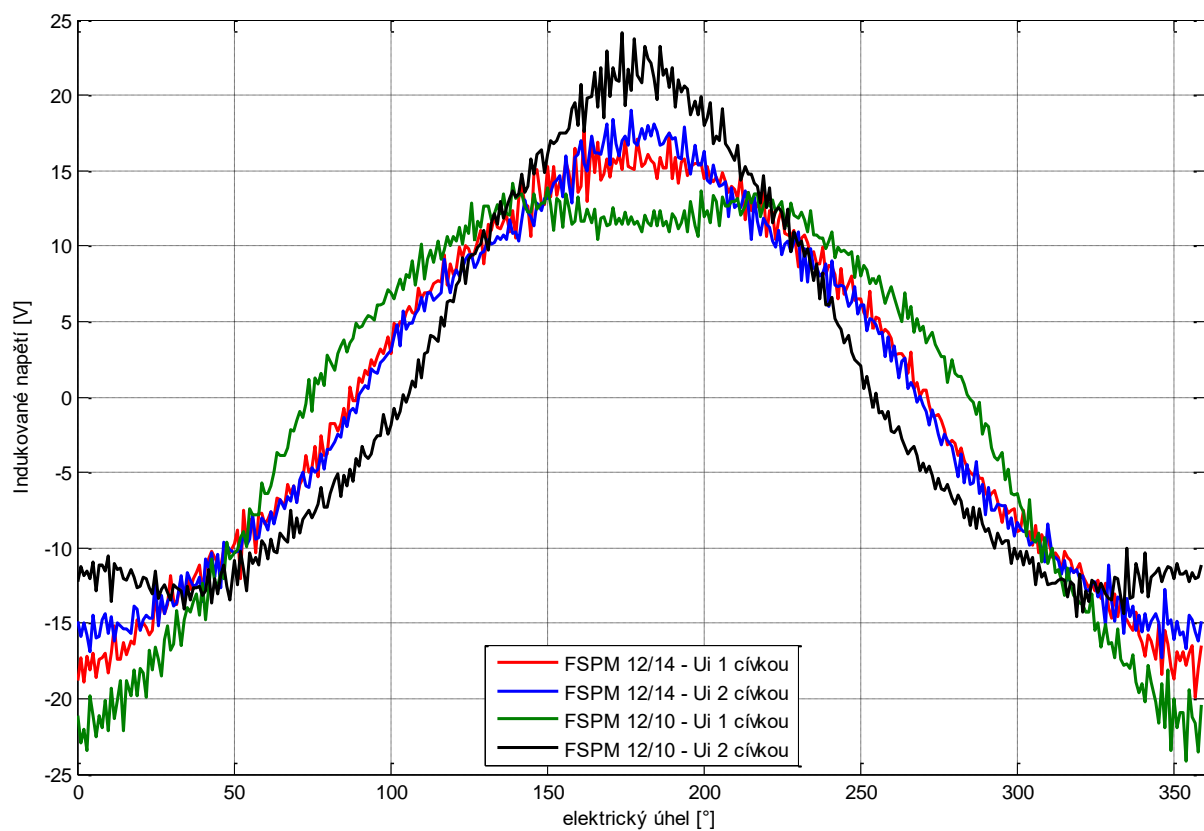
Jelikož magnetický tok i indukované napětí mají přibližně stejný průběh na protilehlých cívkách, budu jejich průběhy porovnávat pouze na „1“ a „2“ cívce, viz obrázek 31.

Obrázek 36 znázorňuje porovnání magnetického toku strojů konstrukce 12/14 a 12/10, u stroje s 14 rotorovými póly je menší odchylka v průběhu magnetického toku mezi cívkami „1“ a „2“. Stejná odchylka platí i pro indukované napětí v těchto cívkách, viz obrázek 37



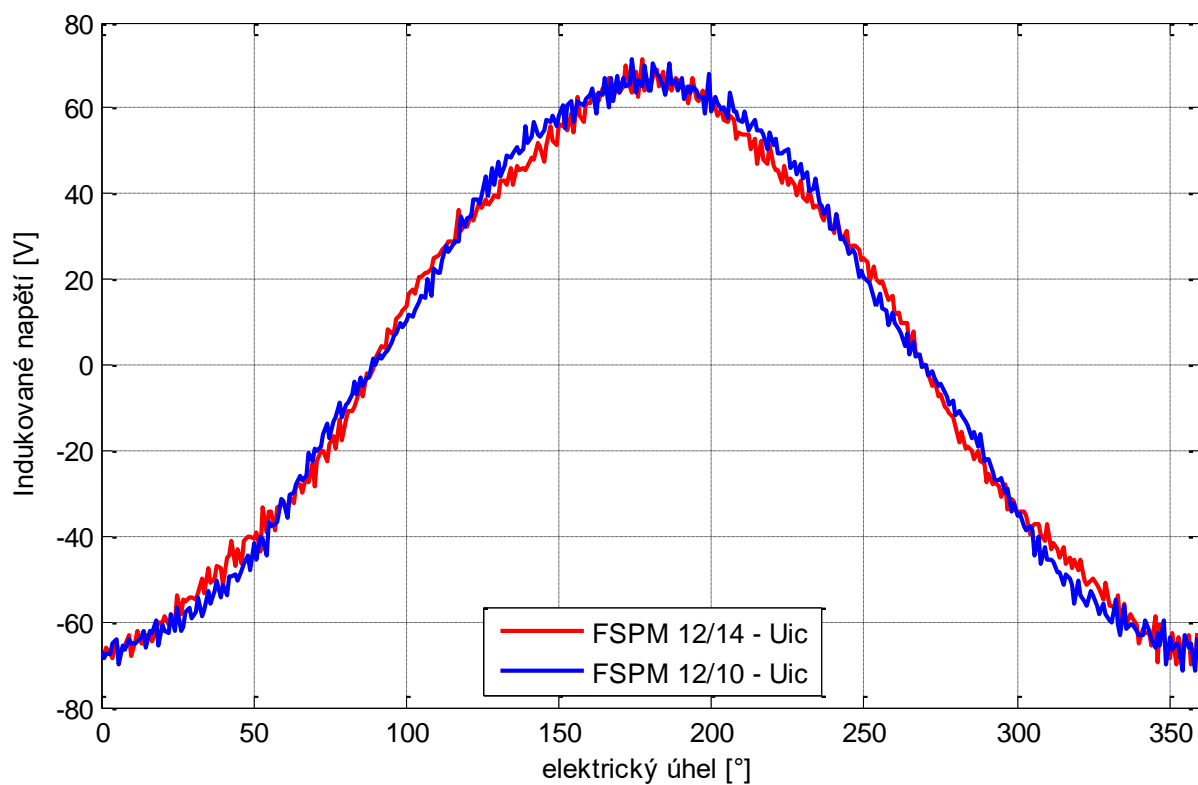
Obrázek 36

Porovnání FSPM 12/14 a 12/10 - magnetický tok v 1. a 2. cívkce jednoho vinutí



Obrázek 37 Porovnání FSPM 12/14 a 12/10 - indukované napětí v 1. a 2. cívkce jednoho vinutí

Při porovnání celkového indukovaného napětí jedné fáze, viz obrázek 38, jsou odchylky v průběhu indukovaného napětí v jednotlivých cívkách eliminovány (součtem průběhů – napětí jednotlivých sériově řazených cívek) a průběhy celkového indukovaného napětí strojů 12/14 a 12/10 vypadají velice podobně.



Obrázek 38 Porovnání FSPM 12/14 a 12/10 – celkové indukované napětí jedné fáze

5.2 Točivý moment stroje FSPM 12/14

V programu FEMM byl na kružnici procházející středem vzduchové mezery odečten předpokládaný moment stroje. Moment stroje lze vyjádřit podle rovnice 3.9. Z této rovnice můžeme vyjádřit předpokládaný výkon na hřídeli P_2 .

$$T = \frac{P_2}{\omega_r} \Rightarrow P_2 = T \cdot \omega_r$$

Naměřené hodnoty krouticího momentu v programu FEMM, pro motor konstrukce 12/14 a 12/10:

$$T_{12/14} = 7,39 \text{ Nm}$$

$$T_{12/10} = 5,21 \text{ Nm}$$

Lze tedy říci, že konstrukce FSMP stroje 12/14 má 1,42 krát vyšší moment na hřídeli, než FSPM 12/10. $\left(\frac{T_{12/14}}{T_{12/10}}\right)$. Pokud naměřené hodnoty dosadíme do rovnice 3.9 a úhlovou rychlost rotoru vyjádříme podle rovnice 3.25, dostáváme výraz pro předpokládaný výkon stroje na hřídeli:

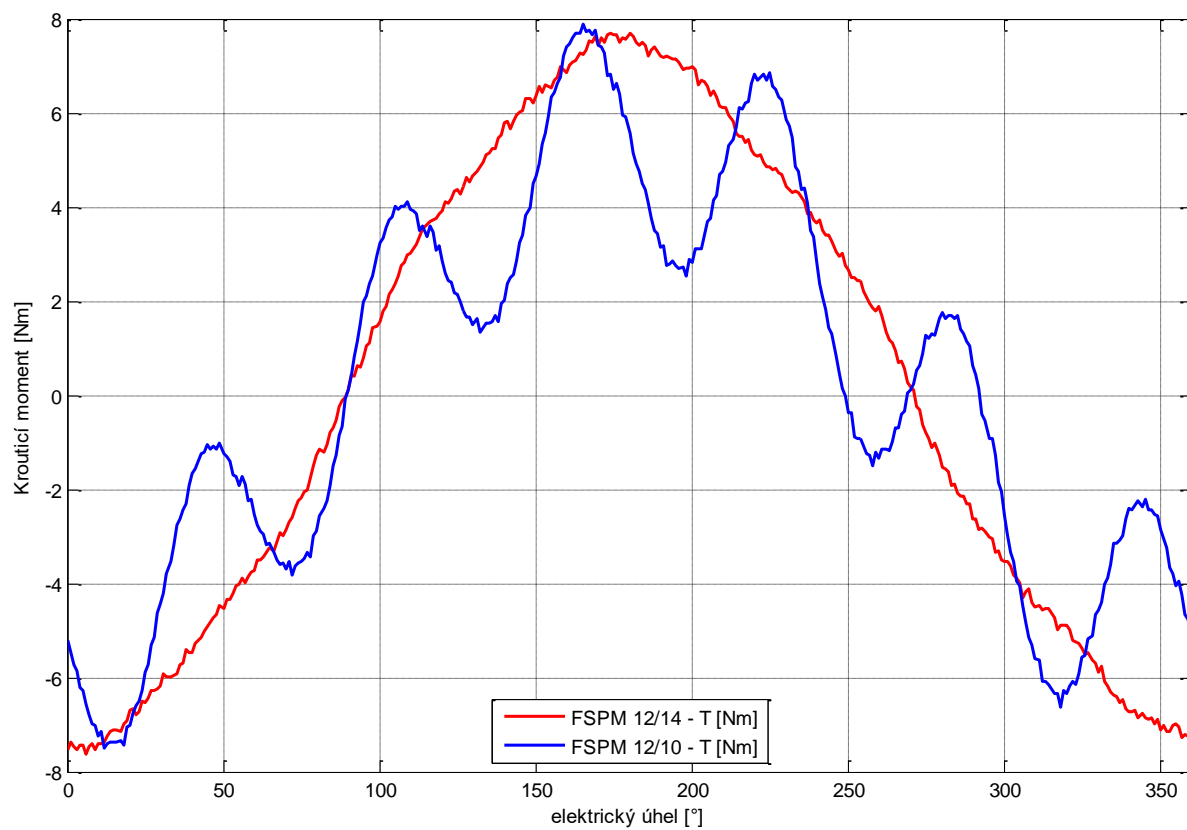
$$P_2 = T \cdot \omega_r = T \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot N}{60} \Rightarrow$$

$$P_{2_12/14} = T \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot N}{60} = 7,39 \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot 250}{60} = 193,47 \text{ W}$$

$$P_{2_12/10} = T \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot N}{60} = 5,21 \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot 250}{60} = 136,40 \text{ W}$$

Obdobně jako pro indukované napětí, bylo v programu FEMM, pomocí LUA skriptu (skript je uveden v příloze práce), simulováno otáčení rotorem o změnu pozice jednoho rotorového pólu do pozice pólu následujícího. Tedy otočení rotoru pro $FSPM_{12/14} = \frac{360}{14}^\circ$ a pro $FSPM_{12/10} = \frac{360}{10}^\circ$, vždy bylo měřeno 360 hodnot.

Obrázek 39 zobrazuje porovnání krouticího momentu stroje FSPM 12/14 a FSPM 12/10. Z grafu je patrné mnohonásobně větší zvlnění momentu stroje FSPM 12/10.



Obrázek 39

Porovnání FSPM 12/14 a 12/10 – průběh momentu stroje

6 Závěr

Při psaní této práce jsem se nejdříve seznámil s problematikou permanentních magnetů, jež popisují v první kapitole. Následně jsem se zabýval obecným popisem tokem spínaných motorů s permanentními magnety a reluktančních strojů, z jejichž principu FSPM vycházejí. Zabýval jsem se také druhy FSPM strojů (Fault –tolerant konstrukce, s oběžným rotorem, lineární). Praktická aplikace těchto strojů je velice široká, od generátorů větrných elektráren, generátorů určených do výbušného prostředí (doly), po pohony automobilů, trakčních vozidel, kol a koloběžek.

Velkou výzvou této práce bylo sestavení návrhu FSPM stroje s rozložením 12/14, tedy stroje s dvanácti statorovými a čtrnácti rotorovými póly. Pro tyto motory neexistuje postup návrhu jako například pro synchronní stroje, nejsou tedy dostupné ověřené rovnice ani grafy, nebo tabulky, ze kterých by bylo možné odečítat hodnoty koeficientů a hlavních elektrických parametrů. Základní postup, který jsem sestavil, neodpovídá běžné struktuře návrhu točivého stroje. Při návrhu se zaměřuji především na mechanické vlastnosti – vhodnou volbu rozměrů. Elektrické parametry jsem odečítal ze simulace v programu FEMM. Na základě teoretického postupu, který je uveden v první části třetí kapitoly, jsem vypočítal parametry stroje FSPM 12/14, výpočet je uveden v druhé části třetí kapitoly.

Na základě vypočtených parametrů jsem v programu SolidWorks nakreslil 2D a 3D model stroje. S 2D modelem jsem dále pracoval v programu FEMM.

V páté kapitole je popsána simulace průběhu magnetického toku, kterou jsem pomocí LUA skriptu realizoval v programu FEMM. Skript simuloval otočení rotoru o pólovou rozteč rotoru a odečetl 360 hodnot. Z naměřených hodnot magnetického toku, jsem vypočítal indukované napětí. Odečet magnetického toku jsem prováděl postupně na všech čtyřech cívkách vinutí jedné fáze. Vypočetl jsem tedy čtyři průběhy indukovaného napětí, při jejich grafickém porovnání jsem zjistil, že průběhy v protilehlých cívkách jsou shodné. Celkovou hodnotu indukovaného napětí jsem určil jako součet napětí na jednotlivých cívkách.

Abych mohl získané výsledky s něčím porovnat, sestrojil jsem model stroje s naprosto shodným statorem, rotor jsem nakreslil s deseti póly, takže došlo ke zvětšení pólové rozteče rotorových pólů. Při porovnávání průběhů indukovaného napětí a magnetického toku v jednotlivých cívkách strojů FSPM 12/14 a FSPM 12/10, jsem zjistil, že stroj s 14 rotorovými póly vykazuje daleko menší zvlnění, než stroj s 10 rotorovými póly. Zvlnění celkového

indukovaného napětí těchto strojů je srovnatelné.

Dále jsem provedl simulaci a odečetl točivý moment stroje (odečet jsem provedl na kružnici procházející středem vzduchové mezery). Moment jsem odečetl pro FSPM 12/14 a FSPM 12/10, stroj s 14 pólovým rotorem má podle simulace o 2,18 Nm větší moment než stroj s desetipólovým rotorem. Dále jsem pomocí LUA skriptu provedl odečet momentu při pohybu rotoru, princip simulace byl obdobný jako při odečtu magnetického toku, hodnoty byly měřeny na kružnici procházející středem vzduchové mezery. Při porovnání průběhů točivého momentu strojů FSPM 12/14 a FSPM 12/10, jsem zjistil velké zvlnění průběhu momentu stroje s deseti pólovým rotorem.

Z momentu stroje FSPM 12/14 jsem vypočítal předpokládaný mechanický výkon stroje $P_2 = 193,47 \text{ W}$, v závěru třetí kapitoly jsem vypočítal předpokládaný výkon na hřídeli $P_2 = 171,47 \text{ W}$. Hodnoty mají mezi sebou (vzhledem k jejich velikosti) odchylku přibližně 10%. Vzhledem k tomu že hodnota vypočtena v závěru třetí kapitoly je ovlivněna volbou koeficientů a hodnota vypočítaná z krouticího momentu, je ovlivněna nepřesnostmi při simulaci, je odchylka mezi nimi přijatelná.

Pokud tyto hodnoty mechanického výkonu porovná s předpokládanou hodnotu elektrického příkonu stroje $P_1 = 180 \text{ VA}$ zjišťuji, že získané hodnoty mechanického výkonu se pohybují v blízkosti předpokládaného příkonu. Hodnota mechanického výkonu získaná z momentu stroje je vyšší než příkon, to je způsobeno nepřesnostmi výpočtu při simulaci v programu FEMM. Jelikož si hodnoty nejsou významně vzdáleny lze výsledky s jistou korekcí považovat za důvěryhodné.

Předpokládám, že hodnoty získané ze simulace neodpovídají reálným hodnotám stroje (nejsou uvažovány ztráty a nepřesnosti při výrobě), ovšem porovnání získaných hodnot (magnetický tok, indukované napětí, moment) pro stroje s různou konstrukcí rotoru má svoji vypovídací schopnost, přinejmenším jako poměrná hodnota.

Bibliografie

- [1] P. Budař, „Stroje s permanentními magnety,“ Západočeská univerzita v Plzni, Bakalářská práce, Plzeň 2013.
- [2] S. Krupička, „Magnetismus: historie a současnost,“ 10 2007. [Online]. Dostupné z: http://www.learned.cz/userfiles/pdf/prednasky-cleny-odborne/svatopluk.krupicka_0207.pdf. [Cit. 5. 12. 2015].
- [3] Sinomag s.r.o, „Permanentní magnety - co je třeba vědět o magnetech,“ [Online]. Dostupné z: http://www.sinomag.cz/sinomag.cz/data/sinomag/downloads/Permanentni_magnety.pdf. [Cit. 5. 1. 2016].
- [4] J. L. Salpeter, „Permanent magnets,“ *Journal of the British institution of radio engineers*, pp. 211-248, 1943.
- [5] M. Vidlička, „Supermagnety.cz,“ [Online]. Dostupné z: <http://www.supermagnety.cz/cz/64/magneticky-tvrde-ferity/>. [Cit. 3. 5. 2015].
- [6] D. Hanselman, *Brushless Permanent Magnet Motor Design*, Orono, ME 04469, USA: University of Maine, 2003. ISBN 1-881855-15-5
- [7] V. Hrabovcová, L. Janoušek a P. Rafa, *Moderné elektrické stroje*, Žilina: Žilinská univerzita, 2001. ISBN 80-7100
- [8] M. Stolařík a F. Veselka, „Přehledová studie reluktančních motorů,“ *časopis Elektro*, č. 3, pp. 1 -9, 3 2006. [Online] . Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/prehledova-studie-reluktancnich-motoru—13249>. [Cit. 3. 11. 2015].
- [9] S. A. Gawish, A. El-Wakeel a M. A. Badr, „Systematic design procedure of switched reluctance motors,“ v *Proceedings of the 2nd ICEENG Conference, 23-25 Nov. 1999.*, Cairo, Egypt, 1999.
- [10] K. Pavlíček, „Návrh a modelování reluktančního motoru s permanentními magnety,“ Západočeská univerzita v Plzni, Diplomová práce, Plzeň 2013.
- [11] L. Kopecký, „Reluktanční motor a elektromobil,“ 2008. [Online]. Dostupné z: http://www.elektromobily.org/w/images/a/ad/Reluktancni_motor_Kopecky.pdf. [Cit. 4. 7. 2015].

-
- [12] „Opera - simulation software,“ © Chelton Ltd, 2012-2016. [Online]. Dostupné z: <http://operafea.com/wp-content/uploads/2012/06/TSB-Jaguar-Landrover-Ricardo-Switched-Reluctance-Project1.jpg>. [Cit. 9. 3. 2016].
- [13] E. Ilhan, E. T. Motoasce, J. Paulides a E. Lomonova, „Technische University, Eindhoven, University of technology,“ 2015. [Online]. Dostupné z: https://www.tue.nl/uploads/media/2012-10-04_EPE_Website_smart_mobility.pdf. [Cit. 28. 1. 2016].
- [14] M. Koshelev, „Návrh synchronního reluktančního motoru,“ Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Diplomová práce, Brno 2014.
- [15] N. Rotevatn, „Design and testing of Flux Switched,“ 6 2009. [Online]. Dostupné z: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:347864/FULLTEXT01.pdf>. [Cit. 7. 4. 2015].
- [16] A. Chen, „Investigation of Permanent Magnet Machines for Downhole Applications,“ 2011. [Online]. Dostupné z: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:386834/FULLTEXT02.pdf>. [Cit. 5. 11. 2015].
- [17] G. Li, J. Ojeda, E. Hoang a M. Gabsi, „Double and single layers flux-switching permanent magnet motors: Fault tolerant model for critical applications,“ v *International Conference on Electrical Machines and Systems 2011, Aug 2011*, Beijing, China. pp.1-6, 2011. <hal-00628851>, 2011.
- [18] H. Liu, Y. Wang, Z. Deng a L. Song, „Comparison of FSPM topologies applied in open-winding wind power system,“ Industrial Electronics and Applications ICIEA),“ v *2014 9th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, Hangzhou, pp. 1527-1532, 2014.
- [19] X. Xue, W. Zhao, J. Z. G. Liu, X. Zhu a M. Cheng, „Design of Five-Phase Modular Flux-Switching Permanent-Magnet,“ v *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 49, NO. 7, JULY 2013*, pp. 3941-3944, 2013.
- [20] W. Zhao, M. Cheng, J. Ji a R. Cao, „Electromagnetic analysis of a modular flux-switching permanent-magnet motor using finite-element method,“ v *Progress In Electromagnetics Research B, Vol. 43, 239-253, 2012*, 2012.

-
- [21] Y. Li, D. Bobba a B. Sarlioglu, „A Novel 6/4 Flux-Switching Permanent Magnet Machine Designed for High-Speed Operations,“ v *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. PP, no. 99, pp. 1-1.
- [22] R. Cao, M. Cheng a W. Hua, „Investigation and General Design Principle of a New Series of Complementary and Modular Linear FSPM Motors,“ v *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, VOL. 60, NO. 12, DECEMBER 2013, pp. 5436-5446, 2013.
- [23] Q. Lu, Y. Li, Y. Ye a Y. Fang, „A Novel Transverse-flux Switched-flux PM Linear Motor,“ v *International Conference on Electrical Machines and Systems*, Oct. 26-29, 2013, Busan, Korea, 2013.
- [24] A. Zohoori, A. Vahedi a M. A. Noroozi, „Design Study of FSPM Generator with Novel Outer Rotor Configuration for Small Wind Turbine Application,“ v *Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, Krakow, 2014.

Seznam obrázků

OBRÁZEK 1	EMISE FOTONU LETÍCÍM ELEKTRONEM.....	8
OBRÁZEK 2	USPOŘÁDÁNÍ MAGNETICKÝCH MOMENTŮ PARAMAGNETICKÝCH LÁTEK	10
OBRÁZEK 3	USPOŘÁDÁNÍ MAGNETICKÝCH MOMENTŮ FEROMAGNETICKÝCH LÁTEK.....	11
OBRÁZEK 4	USPOŘÁDÁNÍ MAGNETICKÝCH MOMENTŮ ANTIFEROMAGNETICKÝCH LÁTEK....	11
OBRÁZEK 5	USPOŘÁDÁNÍ MAGNETICKÝCH MOMENTŮ FERIMAGNETICKÝCH LÁTEK	11
OBRÁZEK 6	STRUKTURA FERITOVÝCH MAGNETŮ	12
OBRÁZEK 7	STRUKTURA SMCo	13
OBRÁZEK 8	STRUKTURA NdFeB	14
OBRÁZEK 9	HYSTEREZNÍ SMYČKA.....	15
OBRÁZEK 10	POROVNÁNÍ DEMAGNETIZAČNÍCH KŘIVEK PERMANENTNÍCH MAGNETŮ	17
OBRÁZEK 11	VZNIK TOČIVÉHO MOMENTU SRM STROJE	19
OBRÁZEK 12	VARIANTY PROVEDENÍ ROTORŮ SYNCHRONNÍCH RELUKTANČNÍCH STROJŮ ...	20
OBRÁZEK 13	PROVEDENÍ TŘÍFÁZOVÉHO SPÍNANÉHO STROJE 12/8.....	21
OBRÁZEK 14	KONCEPCE FSPM Z SRM A PMSM	22
OBRÁZEK 15	PRINCIP FUNKCE SYNCHRONNÍHO RELUKTANČNÍHO STROJE	23
OBRÁZEK 16	PRINCIP FSPM STROJE	24
OBRÁZEK 17	ROZLOŽENÍ MAGNETICKÉHO TOKU V ROTOROVÉM PÓLU.....	25
OBRÁZEK 18	MODEL MAGNETICKÉHO TOKU POMOCÍ SOUSTŘEDĚNÝCH PARAMETRŮ	25
OBRÁZEK 19	RŮZNÉ KONSTRUKCE FSPM STROJŮ:	26
OBRÁZEK 20	FSPM STROJ S OBĚŽNÝM ROTOREM	27
OBRÁZEK 21	STANDARTNÍ PROVEDENÍ LINEÁRNÍHO FSPM STROJE	28
OBRÁZEK 22	HLAVNÍ STRUKTURA LINEÁRNÍHO TFSFLM STROJE.....	28
OBRÁZEK 23	ZJEDNODUŠENÉ ZOBRAZENÍ POLOHY ROTORU A STATORU	33
OBRÁZEK 24	ROZMĚRY STATOROVÉHO PÓLU.....	42
OBRÁZEK 25	ROZLOŽENÍ VINUTÍ FSPM.....	44
OBRÁZEK 26	ŘEZ ROTORU STROJE	45
OBRÁZEK 27	ROZMĚRY ZVOLENÝCH PERMANENTNÍCH MAGNETŮ	46
OBRÁZEK 28	3D MODEL NAVRHOVANÉHO FSPM STROJE	51
OBRÁZEK 29	DEFINOVÁNÍ PRVKŮ, FEMM.....	52
OBRÁZEK 30	FSPM 12/14 - ROZLOŽENÍ MAGNETICKÉ INDUKCE	53
OBRÁZEK 31	ZNÁZORNĚNÍ SMĚRU POHYBU ROTORU	54
OBRÁZEK 32	FSPM 12/14 - PRŮBĚH INDUKOVANÉHO NAPĚTÍ V 1. A 2. CÍVCE JEDNOHO VINUTÍ	

	55
OBRÁZEK 33	FSPM 12/14 - CELKOVÉ INDUKOVANÉ NAPĚTÍ JEDNÉ FÁZE	56
OBRÁZEK 34	FSPM 12/14 - PRŮBĚH MAGNETICKÉHO TOKU V 1. A 2. CÍVCE JEDNOHO VINUTÍ	56
OBRÁZEK 35	FSPM 12/10 - ROZLOŽENÍ MAGNETICKÉ INDUKCE	57
OBRÁZEK 36	POROVNÁNÍ FSPM 12/14 A 12/10 - MAGNETICKÝ TOK V 1. A 2. CÍVCE JEDNOHO VINUTÍ	58
OBRÁZEK 37	POROVNÁNÍ FSPM 12/14 A 12/10 - INDUKOVANÉ NAPĚTÍ V 1. A 2. CÍVCE JEDNOHO VINUTÍ.....	58
OBRÁZEK 38	POROVNÁNÍ FSPM 12/14 A 12/10 – CELKOVÉ INDUKOVANÉ NAPĚTÍ JEDNÉ FÁZE	59
OBRÁZEK 39	POROVNÁNÍ FSPM 12/14 A 12/10 – PRŮBĚH MOMENTU STROJE	61

Přílohy

Příloha A - Technický list - permanentní magnety NdFeB

Typ materiálu	Remanence Br		Koercivita Hcb		Vnitřní koercivita Hci		Hustota energie (BH) max		Maximální pracovní teplota	
	KG	T	KOe	KA/m	KOe	KA/m	MGOe	KJ/m ³	°C	°F
N35	11.4-11.8	1.18-1.28	≥ 10.8	≥ 836	≥ 12	≥ 955	33-36	263-287	80	176
N38	11.8-12.3	1.18-1.28	≥ 10.8	≥ 860	≥ 12	≥ 955	36-39	287-310	80	176
N40	12.7-12.9	1.27-1.29	≥ 11.0	≥ 876	≥ 12	≥ 955	38-41	303-326	80	176
N42	12.9-13.3	1.29-1.33	≥ 10.5	≥ 836	≥ 12	≥ 955	40-43	318-342	80	176
N45	13.3-13.8	1.33-1.38	≥ 9.5	≥ 756	≥ 12	≥ 955	43-46	342-366	80	176
N48	13.8-14.2	1.38-1.42	≥ 10.5	≥ 835	≥ 12	≥ 955	46-49	366-390	80	176
N50	13.8-14.5	1.38-1.45	≥ 10.5	≥ 835	≥ 11	≥ 955	47-51	374-406	80	176
N52	14.3-14.8	1.43-1.48	≥ 10.8	≥ 860	≥ 11	≥ 876	50-53	398-422	80	176
33M	11.4-11.8	1.14-1.18	≥ 10.3	≥ 820	≥ 14	≥ 1114	31-33	247-263	100	212
35M	11.8-12.3	1.18-1.23	≥ 10.8	≥ 860	≥ 14	≥ 1114	33-36	263-287	100	212
38M	12.3-12.7	1.23-1.27	≥ 11.0	≥ 876	≥ 14	≥ 1114	38-41	303-326	100	212
40M	12.7-12.9	1.27-1.29	≥ 11.4	≥ 907	≥ 14	≥ 1114	38-41	303-326	100	212
42M	12.8-13.2	1.28-1.32	≥ 11.6	≥ 923	≥ 14	≥ 1114	40-43	318-342	100	212
45M	13.2-13.8	1.32-1.38	≥ 11.8	≥ 939	≥ 14	≥ 1114	43-46	342-366	100	212
48M	13.6-14.0	1.36-1.40	≥ 11.8	≥ 939	≥ 14	≥ 1114	46-49	366-390	100	212
50M	14.0-14.5	1.40-1.45	≥ 13.0	≥ 1033	≥ 14	≥ 1114	48-51	382-406	100	212
30H	10.8-11.4	1.08-1.14	≥ 10.2	≥ 812	≥ 17	≥ 1353	28-31	223-247	120	248
33H	11.4-11.8	1.14-1.18	≥ 10.6	≥ 844	≥ 17	≥ 1353	31-33	247-263	120	248
35H	11.8-12.3	1.18-1.28	≥ 11.0	≥ 876	≥ 17	≥ 1353	33-36	263-287	120	248
38H	12.3-12.7	1.23-1.27	≥ 11.2	≥ 890	≥ 17	≥ 1353	36-39	287-310	120	248
40H	12.7-12.9	1.27-1.29	≥ 11.5	≥ 915	≥ 17	≥ 1353	38-41	303-326	120	248
42H	12.8-13.2	1.28-1.32	≥ 12.0	≥ 955	≥ 17	≥ 1353	40-43	318-342	120	248
45H	13.2-13.5	1.32-1.38	≥ 12.0	≥ 955	≥ 17	≥ 1353	42-46	335-366	120	248
46H	13.3-13.8	1.33-1.38	≥ 12.2	≥ 972	≥ 16	≥ 1274	44-47	350-374	120	248
48H	13.6-14.3	1.36-1.43	≥ 12.5	≥ 995	≥ 16	≥ 1274	46-49	366-390	120	248
30SH	10.8-11.4	1.081.14	≥ 10.0	≥ 796	≥ 20	≥ 1672	28-31	223-247	150	302
33SH	11.4-11.8	1.14-1.18	≥ 10.5	≥ 836	≥ 20	≥ 1672	31-34	247-276	150	302
35SH	11.8-12.3	1.18-1.23	≥ 11.0	≥ 876	≥ 20	≥ 1672	33-36	263-287	150	302
38SH	12.3-12.7	1.23-1.27	≥ 11.4	≥ 907	≥ 20	≥ 1972	36-39	287-310	150	302
40SH	12.5-12.8	1.25-1.28	≥ 11.8	≥ 939	≥ 20	≥ 1972	38-41	302-326	150	302
42SH	12.8-13.2	1.28-1.32	≥ 11.8	≥ 939	≥ 20	≥ 1672	40-43	320-343	150	302
45SH	13.2-13.8	1.32-1.38	≥ 12.6	≥ 1003	≥ 20	≥ 1592	43-46	342-366	150	302
30UH	10.8-11.4	1.08-1.14	≥ 10.2	≥ 812	≥ 25	≥ 1990	28-31	223-247	180	356
33UH	11.3-11.7	1.13-1.17	≥ 10.7	≥ 852	≥ 25	≥ 1990	31-33	247-263	180	356
35UH	11.7-12.1	1.17-1.21	≥ 10.7	≥ 852	≥ 25	≥ 1990	33-36	263-287	180	356
38UH	12.1-12.5	1.21-1.25	≥ 11.4	≥ 907	≥ 25	≥ 1990	36-39	287-310	180	356
40UH	12.5-12.8	1.25-1.28	≥ 11.4	≥ 907	≥ 25	≥ 1990	38-41	302-326	180	356
28EH	10.5-10.8	1.05-1.08	≥ 9.5	≥ 756	≥ 30	≥ 2388	26-29	207-231	200	392
30EH	10.8-11.4	1.08-1.14	≥ 9.5	≥ 756	≥ 30	≥ 2388	28-31	223-241	200	392
33EH	11.3-11.7	1.13-1.17	≥ 10.2	≥ 812	≥ 30	≥ 2388	31-33	247-263	200	392
35EH	11.7-12.1	1.17-1.21	≥ 10.2	≥ 812	≥ 30	≥ 2388	33-36	263-287	200	392
38EH	12.1-12.5	1.21-1.25	≥ 11.4	≥ 907	≥ 30	≥ 2388	36-39	287-310	200	392
30AH	10.8-11.3	1.08-1.13	≥ 10.2	≥ 812	≥ 35	≥ 2785	28-32	223-255	220	428
33AH	11.2-11.7	1.12-1.17	≥ 10.2	≥ 812	≥ 35	≥ 2785	31-34	247-271	220	428

Zdroj: <http://www.neomag.cz/cz/katalog/neodymove-magnety/>

Příloha B - LUA skript – Výpočet indukovaného napětí

```
--- vypocet indukovaneho napeti ve FSPM
--- (c) 2013 Pushkin
--- skript verze 1.0
--- FSPM models revision 1.0

start=0
substeps=360
p=14
tp=360/p
dAlfa=-(tp/substeps)

if start==0 then
  open("nepras.fem")
  --- priprava vystupniho souboru
  vystup1=openfile("tok.txt", "w")
else
  open(format("FSPM_revisited_%1$d.fem",start))
  --- priprava vystupniho souboru
  vystup1=openfile("tok.txt", "a")
end

mi_seteditmode("group")
mi_saveas(format("FSPM_revisited_%1$d.fem",start))
mi_analyse()
mi_loadsolution()
  --- oznaceni civky
mo_seteditmode("contour")
mo_addcontour(-13,60)
mo_addcontour(13,60)

flux_re, flux_im, bn_re, bn_im=mo_lineintegral(0)
write(vystup1, flux_re, "\n")

mo_close()

for n=(start+1),substeps do

  mi_selectgroup(1)
  mi_move_rotate(0,0,dAlfa)
  mi_saveas(format("FSPM_revisited_%1$d.fem",n))
  mi_analyse()
  mi_loadsolution()
  --- oznaceni civky
  mo_seteditmode("contour")
  mo_addcontour(-13,60)
  mo_addcontour(13,60)

  flux_re, flux_im, bn_re, bn_im=mo_lineintegral(0)
  write(vystup1, flux_re, "\n")

  mo_close()

end
closefile(vystup1)
```

Příloha C - LUA skript – výpočet momentové charakteristiky

```
--- vypocet momentove charakteristiky FSPM
--- (c) 2013                               Pushkin
--- skript verze 1.0
--- FSPM models revision 1.0

start=0
substeps=360
p=14
tp=360/p
dAlfa=-(tp/substeps)

if start == 0 then
  open("nepras.fem")

  vystup=openfile("moment.txt", "w")
else
  open(format("FSPM_revisited_%1$d.fem",start))

  vystup=openfile("moment.txt", "a")
end

mi_seteditmode("group")

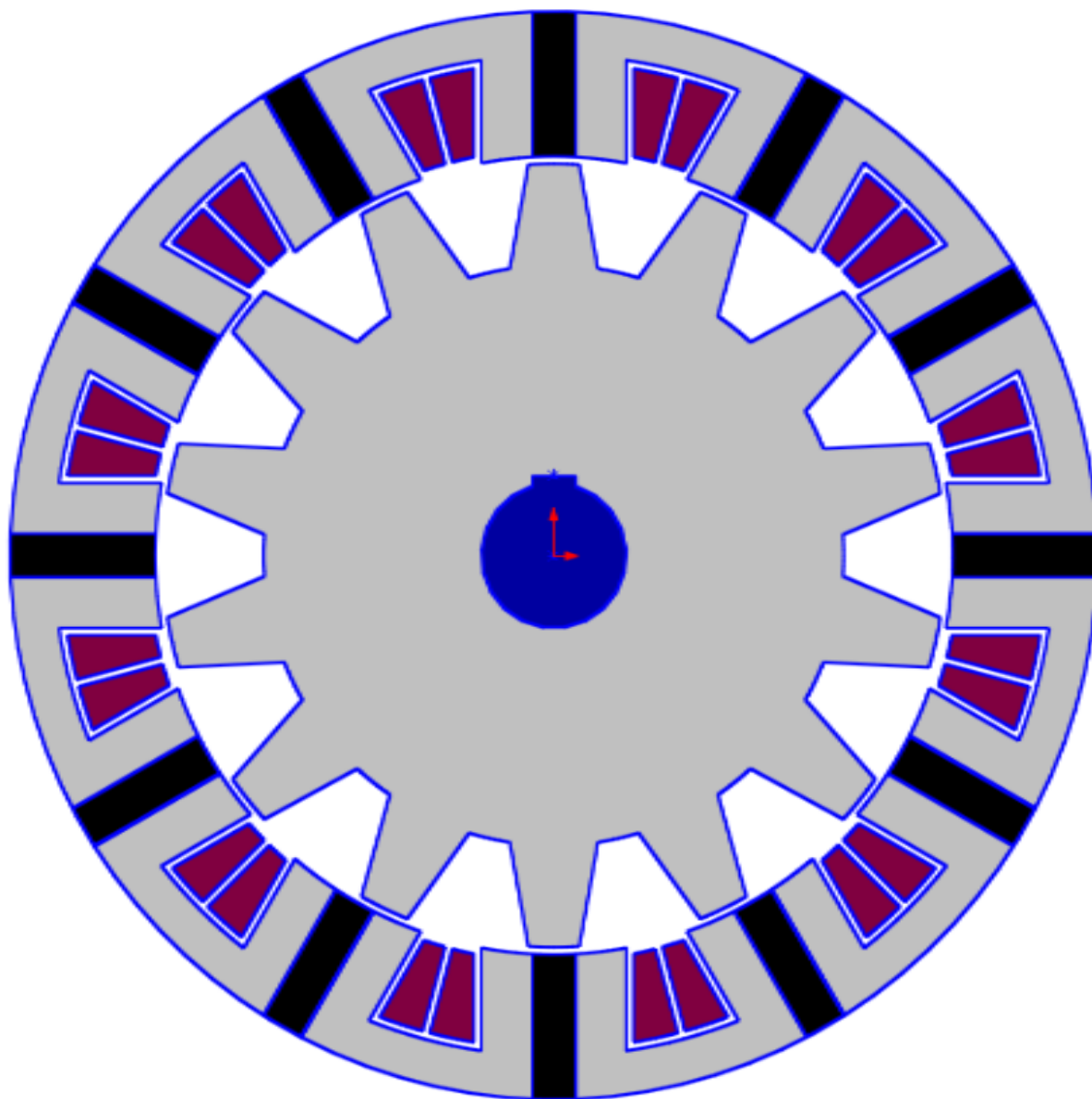
mi_saveas(format("FSPM_revisited_%1$d.fem",start))
mi_analyse()
mi_loadsolution()
mo_seteditmode("contour")
mo_selectpoint(-54.5,-0.01)
mo_selectpoint(54.5,-0.01)
mo_selectpoint(54.5,0.01)
mo_selectpoint(-54.5,0.01)
MDC,DM,TV,FV =mo_lineintegral(4)
write(vystup, MDC, "\n")
mo_close()

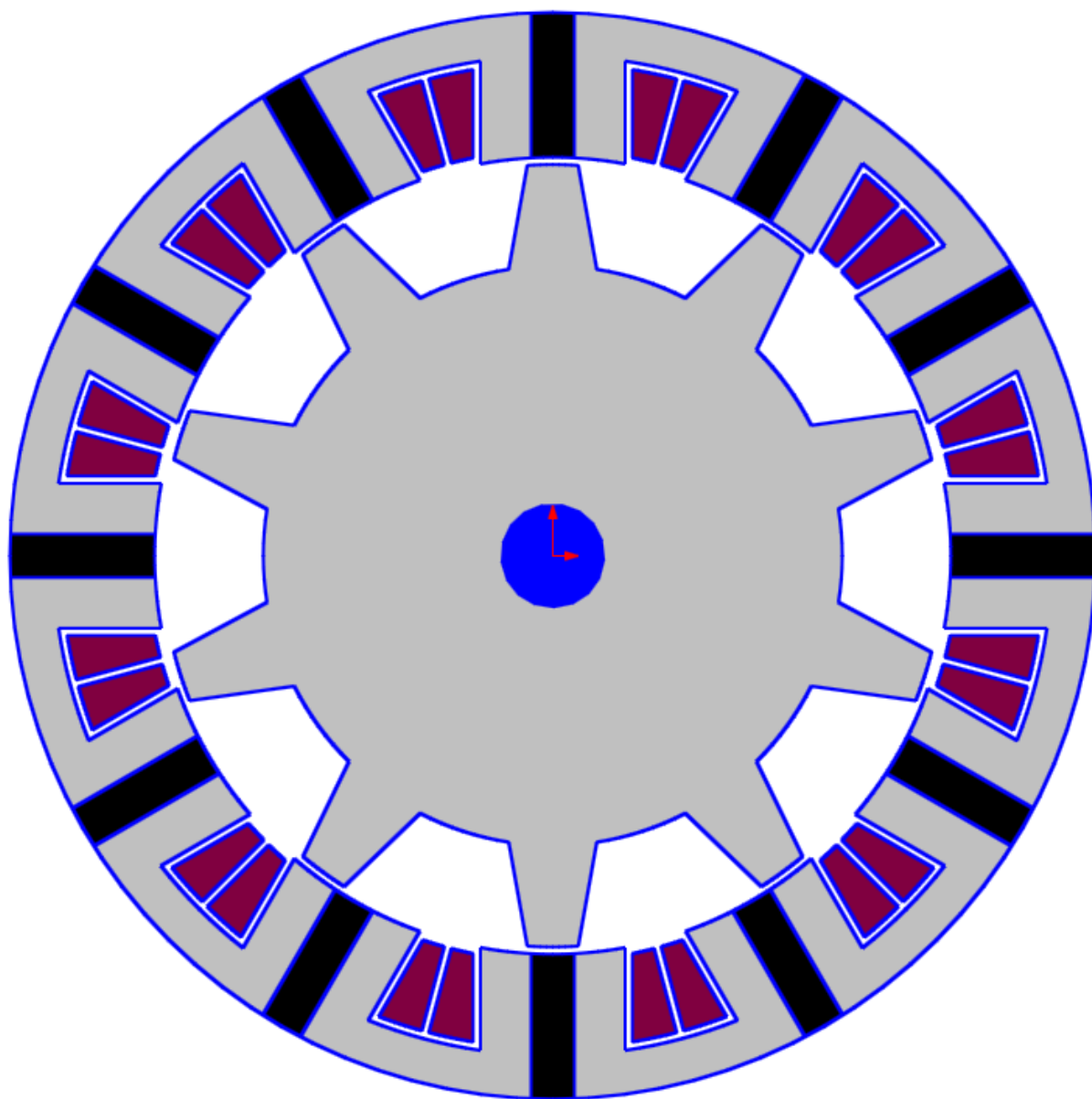
for n=(start+1),substeps do

  mi_selectgroup(1)
  mi_move_rotate(0,0,dAlfa)
  mi_saveas(format("FSPM_revisited_%1$d.fem",n))
  mi_analyse()
  mi_loadsolution()
  mo_seteditmode("contour")
  mo_selectpoint(-54.5,-0.01)
  mo_selectpoint(54.5,-0.01)
  mo_selectpoint(54.5,0.01)
  mo_selectpoint(-54.5,0.01)
  MDC,DM,TV,FV =mo_lineintegral(4)
  write(vystup, MDC, "\n")
  mo_close()

end
closefile(vystup) --- uzavreni vystupniho souboru
```

Příloha D - Rozložení stroje FSPM 12/14



Příloha E - Rozložení stroje FSPM 12/10

Příloha F – 3D model FSPM 12/10

