

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vlastnosti permanentních magnetů

**vedoucí práce: Ing. Karel Hruška Ph.D.
autor: Martin Šerý**

2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Martin ŠERÝ**
Osobní číslo: **E11N0040P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Vlastnosti permanentních magnetů**
Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

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

1. Vytvořte přehled materiálů pro permanentní magnety a vyberte dvě skupiny vhodné pro elektrické stroje.
2. U zvolených skupin permanentních magnetů vytvořte modely metodou konečných prvků vhodné pro výpočet ztrát v těchto permanentních magnetech.
3. Určete ztráty v permanentních magnetech při zatížení reálným magnetickým polem.
4. Zhodnoťte získané výsledky.

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

1. HANSELMAN, D. C.: Brushless Permanent Magnet Motor Design
2. VIDLIČKA, M.: Permanentní magnety

Vedoucí diplomové práce: Ing. Karel Hruška, Ph.D.
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

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


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




Doc. Ing. Vlastimil Škočil, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

Anotace

Tato diplomová práce se věnuje vlastnostem permanentních magnetů. První část popisuje chování látek v magnetickém poli a především se věnuje feromagnetickým materiálům, které se využívají pro výrobu permanentních magnetů. V druhé části je vytvořen stručný přehled materiálů, které se dnes používají pro výrobu permanentních magnetů. Třetí část se věnuje návrhu a tvorbě modelů solenoidu a vybraných magnetů v programu FEMM. Poslední část je zaměřena na simulaci zatížení magnetů reálným magnetickým polem a určení ztrát, které v magnetech vznikají.

Klíčová slova

Magnet, feromagnetické látky, neodymový magnet, SmCo magnet, FEMM

Abstract (Permanent magnet properties)

This master thesis deals with permanent magnet properties. The first part describes the behaviour of materials in the magnetic field and mainly focuses on ferromagnetic materials which are used in manufacturing permanent magnets. The second part contains a brief overview of materials which are used nowadays for the production of permanent magnets. The third part is focused on designing and creation of models of solenoid and selected magnets in FEMM. The last part is concerned with the simulation of magnets under load by a real magnetic field and calculation of total eddy current losses in the magnets.

Key words

Magnet, ferromagnetic material, neodymium magnet, SmCo magnet, FEMM

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

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.

V Plzni dne 1.5.2013

Martin Šerý

.....

Obsah

OBSAH.....	6
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	8
ÚVOD.....	10
1 CHOVÁNÍ LÁTEK V MAGNETICKÉM POLI.....	11
1.1 DIAMAGNETICKÉ LÁTKY	12
1.2 PARAMAGNETICKÉ LÁTKY.....	13
1.3 FEROMAGNETICKÉ LÁTKY	14
1.3.1 Magnetizace a magnetická polarizace	16
1.3.2 Křivka prvotní magnetizace.....	18
1.3.3 Hysterezní smyčka.....	19
1.3.4 Magneticky měkké materiály.....	22
1.3.5 Magneticky tvrdé materiály.....	22
1.3.6 Magnetostrikce	23
2 PERMANENTNÍ MAGNETY	24
2.1 CHARAKTERISTICKÉ PARAMETRY MAGNETŮ	24
2.2 FERITOVÉ MAGNETY	26
2.3 ALNICO MAGNETY	28
2.4 MAGNETY ZE VZÁCNÝCH ZEMIN	30
2.4.1 SmCo magnety.....	31
2.4.2 Neodymové magnety.....	33
2.5 DEMAGNETIZAČNÍ CHARAKTERISTIKY MAGNETŮ.....	35
3 NÁVRH SOLENOIDU A VÝBĚR MAGNETŮ PRO VÝPOČET ZTRÁT.....	36
3.1 FEMM	36
3.2 NÁVRH SOLENOIDU	36
3.3 VÝBĚR MAGNETŮ PRO SIMULACI.....	39
3.3.1 Parametry zvolených magnetů	39
3.4 MODEL SOLENOIDU A MAGNETU V PROGRAMU FEMM.....	40
4 URČENÍ ZTRÁT VE VYBRANÝCH MAGNETECH.....	41
4.1 MAGNETICKÉ POLE VE VINUTÍ MOTORU	41
4.2 ZPŮSOB SIMULACE V PROGRAMU FEMM	43
4.3 ZPŮSOB URČENÍ ZTRÁT V MAGNETU	44
4.4 VÝSLEDKY Z PROGRAMU FEMM	45
4.4.1 Rozložení magnetického pole pro SmCo magnet.....	46
4.4.2 Rozložení proudové hustoty pro SmCo magnet.....	46
4.4.3 Rozložení magnetického pole pro neodymový magnet	47
4.4.4 Rozložení proudové hustoty pro neodymový magnet.....	47
4.4.5 Velikost ztrát obou permanentních magnetů	48
4.4.6 Velikost ztrát skutečného elektrického stroje	49
ZÁVĚR.....	50
POUŽITÁ LITERATURA.....	52

PŘÍLOHY	1
PŘÍLOHA A – TVORBA MODELU SOLENOIDU V PROGRAMU FEMM.....	1
PŘÍLOHA B – TVORBA MODELU PERMANENTNÍHO MAGNETU V PROGRAMU FEMM	4

Seznam symbolů a zkratk

Symbol	Jednotka	Význam
$(BH)_{MAX}$	kJ/m^3	Maximální energetický produkt
B	T	Magnetická indukce
B_0	T	Magnetická indukce vnějšího magnetického pole
B_{MAX}	T	Maximální magnetická indukce
B_R	T	Remanentní magnetická indukce
f	Hz	Frekvence
f_v	Hz	Frekvence v-té harmonické
H	A/m	Intenzita magnetického pole
H_C	A/m	Koercitivní intenzita
H_{CB}	A/m	Vnější koercitivní intenzita
H_{CJ}	A/m	Vnitřní koercitivní intenzita
H_S	A/m	Intenzita magnetického pole v oblasti nasycení
I	A	Elektrický proud
J	T	Vnitřní magnetická polarizace
J	A/m^2	Proudová hustota
J_R	T	Remanentní magnetická polarizace
J_S	T	Vnitřní magnetická polarizace v oblasti nasycení
L	m	Délka solenoidu
M	A/m	Magnetizace
m_o	A.m^2	Orbitální magnetický moment elektronu
m_s	A.m^2	Spinový magnetický moment elektronu
m_v	A.m^2	Výsledný magnetický moment atomu
N	-	Počet závitů solenoidu
n	-	Počet závitů na jednotku délky solenoidu
n	ot/min	Počet otáček
P_Z	W	Ztráty
r_1	m	Vnitřní poloměr solenoidu
r_2	m	Vnější poloměr solenoidu
t_c	°C	Curieova teplota
x_l	m	Vzdálenost konce solenoidu k bodu, kde se počítá indukce

Symbol	Jednotka	Význam
x_2	m	Vzdálenost konce solenoidu k bodu, kde se počítá indukce
γ	S/m	Konduktivita
μ	H/m	Absolutní permeabilita
μ_0	H/m	Permeabilita vakua $4\pi 10^{-7}$
μ_r	-	Relativní permeabilita
ν	-	Pořadí harmonické složky
ρ	$\Omega \cdot m$	Rezistivita
ρ	kg/m^3	Hustota
χ_m	-	Magnetická susceptibilita

Úvod

Tato diplomová práce se zabývá vlastnostmi permanentních magnetů. Prvním úkolem práce je popis chování látek v magnetickém poli a to zejména feromagnetických látek, které jsou klíčové pro tvorbu permanentních magnetů.

Druhým úkolem je vytvoření přehledu materiálů, které se v dnešní době používají pro permanentní magnety. Cílem je jednotlivé materiály porovnat hlavně z hlediska jejich magnetických, elektrických a tepelných vlastností a také jejich náchylnostem k mechanickým či chemickým vlivům. Na základě tohoto stručného přehledu budou vybrány dvě skupiny materiálů vhodné pro použití v elektrických strojích.

Třetím úkolem této práce je u zvolených skupin permanentních magnetů vytvořit jejich modely metodou konečných prvků, které budou vhodné pro výpočet ztrát v těchto permanentních magnetech. Kromě modelů magnetů bude potřeba také navrhnout a namodelovat solenoid, který bude schopen vytvářet magnetické pole o potřebné velikosti a kterým se budou modely permanentních magnetů zatěžovat. Modely magnetů budou zatěžovány reálným magnetickým polem, které bylo získáno ze statoru jednoho ze strojů s permanentními magnety navrhovaných na katedře elektromechaniky a výkonové elektroniky na elektrotechnické fakultě ZČU.

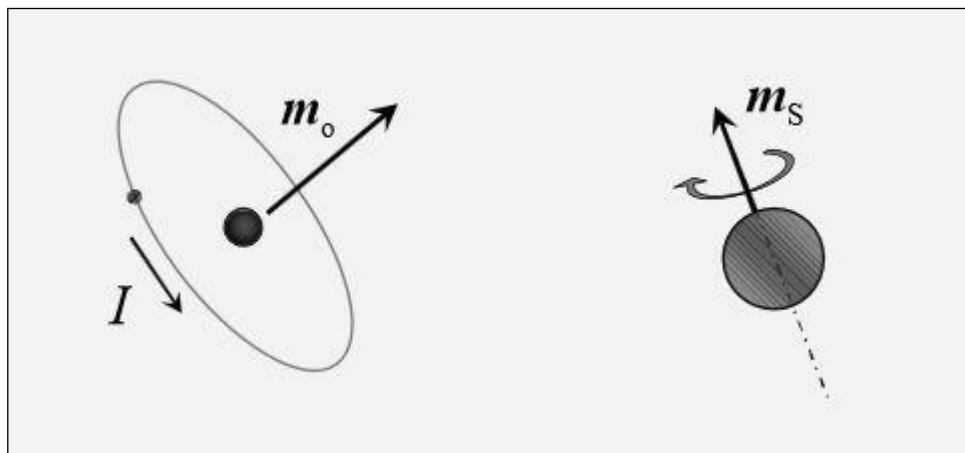
Posledním úkolem pak je provedení simulace zatížení modelů magnetů magnetickým polem pomocí programu FEMM a určení ztrát, které v magnetech při tomto zatížení vznikají. Nakonec bude provedeno posouzení vlivu vodivosti permanentního magnetu na velikost ztrát a zhodnocení všech získaných výsledků pro porovnání zvolených skupin permanentních magnetů.

1 Chování látek v magnetickém poli

Při vložení látky do magnetického pole dojde k jejich vzájemné interakci a látka se působením tohoto pole magneticky polarizuje. Tímto vnitřním magnetickým polem přispívá k původnímu a tím jej mění. Princip této magnetické polarizace je dán atomovou a molekulární strukturou látky.

Důvodem, proč mají látky magnetické vlastnosti, je orbitální a rotační pohyb elektronů. Celá situace je zobrazena na obrázku (1). Orbitální pohyb představuje elektron, který obíhá okolo jádra a tím vytváří proud I . Obíhající elektrony se chovají jako elementární proudové smyčky (elementární magnetické dipóly) a svou rotací okolo jádra vytvářejí tzv. orbitální magnetický moment m_o . Na obrázku (1) je tato situace zobrazena vlevo.

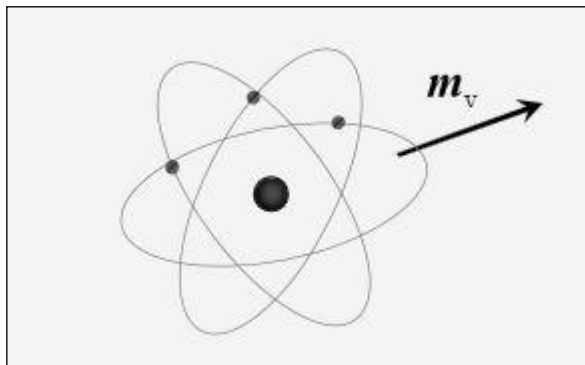
Kromě toho ještě každý elektron rotuje kolem své vlastní osy a vykonává tedy rotační neboli spinový pohyb, který vytváří tzv. spinový magnetický moment m_s . Na obrázku (1) je tato situace zobrazena vpravo. [11][12][13][14][15][16]



Obrázek 1 – Orbitální a spinový magnetický moment elektronu. Převzato z [16]

Výsledný magnetický moment m_v celého atomu je pak dán superpozicí orbitálních a spinových magnetických momentů všech jeho elektronů. Tato situace je zobrazena na obrázku (2).

Pro většinu látek platí, že se toto pole nijak navenek neprojevuje. Vnější magnetické pole působící na látku se snaží orientovat elementární magnetické dipóly do stejného směru a tím vzniká makroskopický magnetický moment. [11][12][13][14][15][16]



Obrázek 2 - Výsledný magnetický moment atomu. Převzato z [16]

Podle vlastností a chování v magnetickém poli se látky rozdělují do několika kategorií:

- Diamagnetické látky
- Paramagnetické látky
- Feromagnetické látky

1.1 Diamagnetické látky

Diamagnetické látky mají vykompenzované orbitální a spinové magnetické momenty elektronů. Navenek je tak bez přítomnosti vnějšího magnetického pole výsledný magnetický moment těchto látek roven nule. Diamagnetismus je přítomen u všech látek, ale oproti paramagnetismu a feromagnetismu je zanedbatelný. Diamagnetismus je nezávislý na teplotě.

Pokud vložíme diamagnetickou látku do magnetického pole, budou na jednotlivé rotující elektrony působit momenty sil, díky kterým začnou vykonávat precesní pohyb. Precesním pohybem se rozumí pohyb, který vykonává setrvačnick. Tento pohyb vytvoří v látce vnitřní magnetické pole, které má opačný magnetický moment než vnější magnetické pole. Pro diamagnetické látky je tak typické, že dochází k nepatrnému zeslabení původního magnetického pole a diamagnetická látka je z magnetického pole vytlačována.

Mezi hlavní zástupce diamagnetických materiálů patří například vzácné plyny, měď, olovo, rtuť, zlato a stříbro. Relativní permeabilita těchto materiálů μ_r je nepatrně menší než 1 ($\mu_r < 1$). Pro představu je v následující tabulce (1) zobrazen přehled vybraných diamagnetických látek a velikost jejich relativní permeability. [11][12][13][14][15]

Tabulka 1 - Relativní permeabilita vybraných diamagnetických látek [29]

látka	μ_r
Měď	0,99999
Voda	0,999991
Kuchyňská sůl	0,9999841
Bizmut	0,999848

1.2 Paramagnetické látky

Na rozdíl od diamagnetik, paramagnetické látky nemají zcela vykompenzované orbitální a spinové momenty elektronů. Atomy těchto látek mají vlastní nenulové magnetické momenty, ale jsou nahodile orientované, takže navenek je opět celkový magnetický moment těchto látek roven nule.

Ovšem pokud vložíme paramagnetickou látku do magnetického pole, dojde k tomu, že se magnetické momenty atomů začnou orientovat souhlasně s vnějším magnetickým polem. Díky tomu získávají paramagnetické látky svoje typické vlastnosti, nepatrně zesilují vnější magnetické pole a jsou do něj vtahovány.

Obdobně jako u diamagnetik, i zde elektrony vykonávají precesní pohyb, který vytváří magnetický moment zeslabující vnější magnetické pole, ale toto zmenšení je zde zanedbatelné. Paramagnetismus je závislý na teplotě.

Mezi zástupce paramagnetických materiálů patří například platina, hliník, vzduch, mangan a hořčík. Relativní permeabilita těchto materiálů μ_r je nepatrně větší než 1 ($\mu_r > 1$). Pro představu je v následující tabulce (2) zobrazen přehled vybraných paramagnetických látek a velikost jejich relativní permeability. [11][12][13][14][15]

Tabulka 2 - Relativní permeabilita vybraných paramagnetických látek [29]

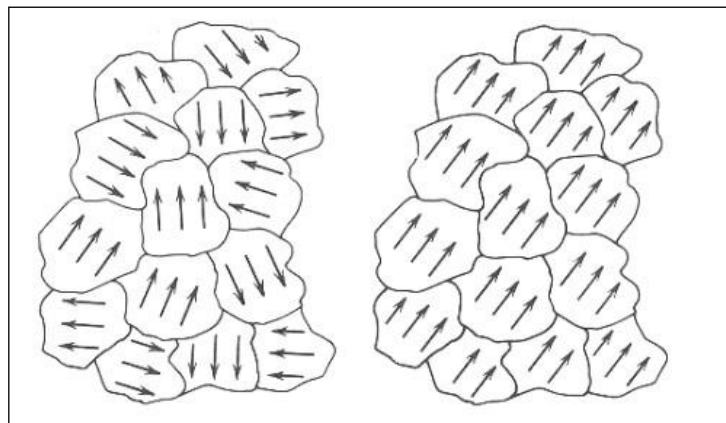
látka	μ_r
Hliník	1,000023
Platina	1,000264
Kyslík plyný	1,00000186
Kyslík kapalný	1,00362

Jak diamagnetické tak paramagnetické látky mají pouze slabé a dočasné magnetické vlastnosti a kromě vzduchu nemají v magnetických obvodech prakticky žádný význam.

1.3 Feromagnetické látky

Oproti oběma předchozím typům, feromagnetické látky mají spontánní magnetizaci i bez přítomnosti vnějšího magnetického pole a jsou velmi důležité pro stavbu magnetických obvodů. Pro atomy těchto látek platí to samé, co pro atomy paramagnetických, takže jsou si podobné. Avšak na rozdíl od diamagnetismu a paramagnetismu, což byly jevy atomů, feromagnetismus je jev způsobený uspořádáním atomů v krystalické mřížce, tudíž feromagnetismus se vyskytuje pouze u látek s krystalickou strukturou.

Feromagnetické látky se vyznačují doménovou strukturou, obsahují mikroskopické oblasti tzv. Weissovy domény (obrázek 3). Každá taková doména má objem zhruba 10^{-12} až 10^{-8} m³ a zahrnuje v sobě 10^{17} až 10^{21} atomů. Jednotlivé domény jsou navzájem odděleny přechodovou vrstvou, která se nazývá Blochova stěna. Pro každou doménu je dále specifické, že všechny atomy uvnitř domény mají magnetické momenty souhlasně orientované. [11][12][13][14][15]



Obrázek 3 - Domény feromagnetického materiálu. Převzato z [18]

Bez působení vnějšího magnetického pole jsou magnetické momenty domén orientovány chaoticky a náhodně, takže se navenek látka tváří jako nemagnetická. Pokud vložíme feromagnetický materiál do magnetického pole, začnou se jednotlivé domény srovnávat do stejného směru, jako má vnější magnetické pole až do okamžiku nasycení. V momentě nasycení jsou tedy magnetické momenty všech domén ve stejném směru, jako má vnější magnetické pole. Feromagnetická látka je vtahována do magnetického pole. Podrobnější popis se nachází v následující podkapitole.

Významnou vlastností feromagnetických materiálů je, že jejich magnetické vlastnosti, které získají při zmagnetizování, jsou trvalé. Materiál zachovává magnetické pole i poté, co vnější magnetické pole zanikne. Pokud začneme feromagnetický materiál zahřívat na určitou

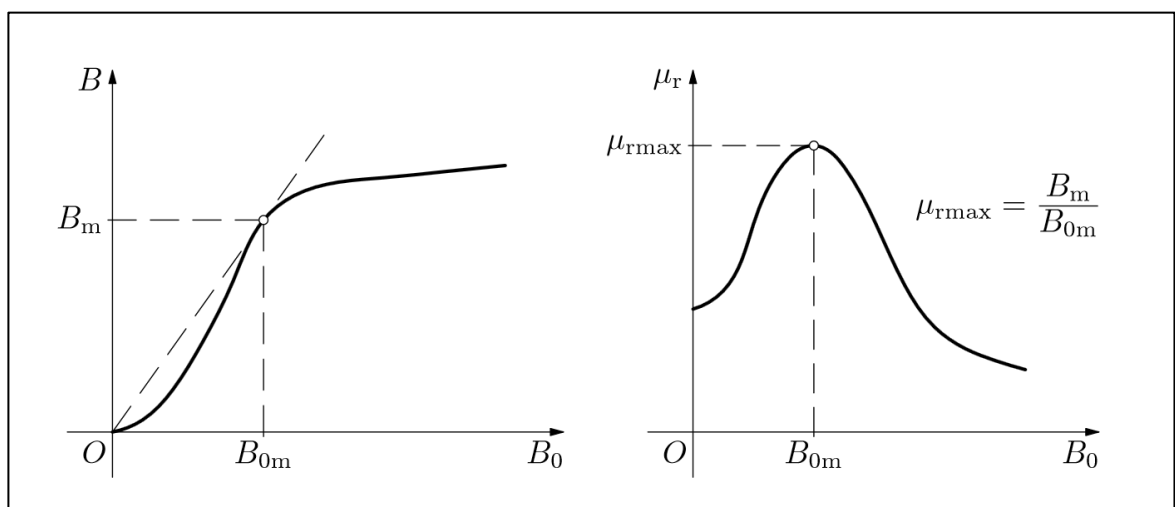
teplotu, tzv. Curieova teplota t_c , ztrácí svoje magnetické vlastnosti a mění se na paramagnetický.

Mezi zástupce feromagnetických materiálů patří železo, kobalt a nikl. Zatímco relativní permeabilita diamagnetických a paramagnetických materiálů byla konstanta velmi blízká jedničce, u feromagnetických materiálů to není tak jednoduché, protože jejich relativní permeabilita je silně nelineární a je závislá na velikosti vnějšího magnetického pole. Obecně je její velikost mnohonásobně větší než 1 ($\mu_r \gg 1$). Pro představu je v následující tabulce (3) zobrazen přehled feromagnetických látek a velikost jejich relativní permeability. [11][12][13][14][15]

Tabulka 3 - Relativní permeabilita feromagnetických látek, při nízké intenzitě vnějšího mag. pole [13]

látka	μ_r
Železo	5800
Nikl	1120
Kobalt	170

Na následujícím obrázku (4) je zobrazena typická závislost relativní permeability na velikosti vnějšího magnetického pole. Můžeme si všimnout, že relativní permeabilita v závislosti na vnějším magnetickém poli rychle roste až do okamžiku nasycení feromagnetického materiálu a od tohoto okamžiku pak opět začíná rychle klesat. Maximální velikost relativní permeability se tedy určí v bodě nasycení vztahem, který je uveden na obrázku. [13]



Obrázek 4 - Závislost relativní permeability na vnějším magnetickém poli [13]

1.3.1 Magnetizace a magnetická polarizace

Jak už bylo řečeno na začátku této kapitoly, pokud vložíme feromagnetickou látku do magnetického pole, dojde k jejich vzájemné interakci a látka se působením vnějšího magnetického pole magneticky polarizuje. Látka touto polarizací získá své vlastní vnitřní magnetické pole, které se nazývá magnetická polarizace J . Toto vnitřní magnetické pole přispívá ke vnějšímu magnetickému poli o intenzitě H a tím vzniká výsledné magnetické pole o indukci B , které je dáno vztahem: [13][20][21][22]

$$B = B_0 + J = \mu_0 H + J$$

Rovnice 1 - Velikost celkové magnetické indukce [13]

- B je výsledná magnetická indukce [T]
- B_0 je indukce vnějšího magnetického pole [T]
- H je intenzita vnějšího magnetického pole [A/m]
- J je vnitřní magnetická polarizace [T]
- μ_0 je permeabilita vakua $4\pi 10^{-7}$ [H/m]

Kromě veličiny magnetické polarizace J se také často používá veličina označovaná jako magnetizace M . Vztah mezi magnetickou polarizací a magnetizací je určen následujícím vztahem: [30]

$$J = \mu_0 M$$

Rovnice 2 - Vztah mezi magnetickou polarizací a magnetizací [30]

- M je magnetizace materiálu [A/m]

Pokud použijeme magnetizaci místo magnetické polarizace, můžeme pak vztah z rovnice (1) zapsat jako:

$$B = \mu_0 (H + M)$$

Rovnice 3 - Velikost celkové magnetické indukce [31]

Velikost magnetické polarizace je úměrná intenzitě magnetického pole a magnetické susceptibilitě:

$$J = \chi_m \mu_0 H$$

Rovnice 4 - Velikost magnetické polarizace [13]

- χ_m je magnetická susceptibilita [-]

Magnetická susceptibilita je bezrozměrná fyzikální veličina, která popisuje chování materiálu ve vnějším magnetickém poli. Její velikost se stanoví podle následujícího vztahu:

$$\chi_m = \frac{M}{H}$$

Rovnice 5 - Velikost magnetické susceptibility [31]

Po dosazení magnetické polarizace do rovnice (1) pak můžeme velikost magnetické indukce vyjádřit jako:

$$B = \mu_0 H + J = \mu_0 (1 + \chi_m) H = \mu_0 \mu_r H = \mu H$$

Rovnice 6 - Velikost celkové magnetické indukce [13]

- μ_r je relativní permeabilita materiálu [-]
- μ je absolutní permeabilita materiálu [H/m]

Vztah mezi relativní permeabilitou a magnetickou susceptibilitou materiálu je dán vztahem:

$$\mu_r = (1 + \chi_m)$$

Rovnice 7 - Vztah mezi relativní permeabilitou a magnetickou susceptibilitou [31]

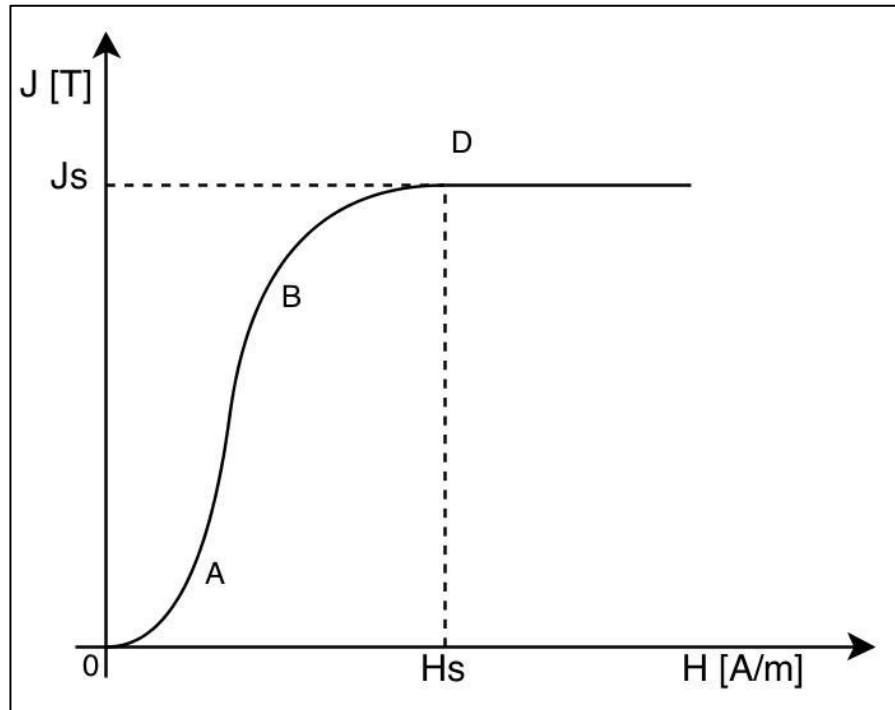
Absolutní permeabilita materiálu pak představuje součin relativní permeability materiálu a permeability vakua, jak je znázorněno na následujícím vztahu:

$$\mu = \mu_0 \mu_r$$

Rovnice 8 - Velikost absolutní permeability

1.3.2 Křivka prvotní magnetizace

Křivka prvotní magnetizace vyjadřuje závislost magnetické polarizace J na intenzitě vnějšího magnetického pole H pro feromagnetický materiál, který ještě nebyl zmagnetizován.



Obrázek 5 - Křivka prvotní magnetizace

Pokud začneme poprvé magnetizovat feromagnetický materiál, probíhá závislost podle křivky prvotní magnetizace (obrázek 5). Děj probíhá následovně:

- **Oblast 0 – A**

Jedná se o oblast vratné magnetizace. Pokud budeme zvyšovat intenzitu vnějšího magnetického pole H , bude magnetická polarizace v materiálu stoupat pomaleji, a proto zde křivka má tvar dolního kolena. Po zmizení vnějšího magnetického pole se polarizace vrátí zpět do bodu $[0,0]$.

- **Oblast A – B**

V této oblasti se při dalším zvyšování intenzity H mění křivka na prakticky lineární závislost J a H . Domény feromagnetického materiálu se postupně stáčí do směru vnějšího magnetického pole. Od této oblasti dál se už polarizace po zmizení vnějšího magnetického pole nevrací zpět do bodu $[0,0]$.

- **Oblast B – D**

V této oblasti se materiál začíná pomalu blížit stavu magnetického nasycení, což znamená, že téměř všechny domény feromagnetického materiálu se už srovnaly do směru vnějšího magnetického pole, takže se magnetická polarizace v materiálu zvyšuje opět pomaleji a křivka má tvar horního kolena.

- **Oblast D <**

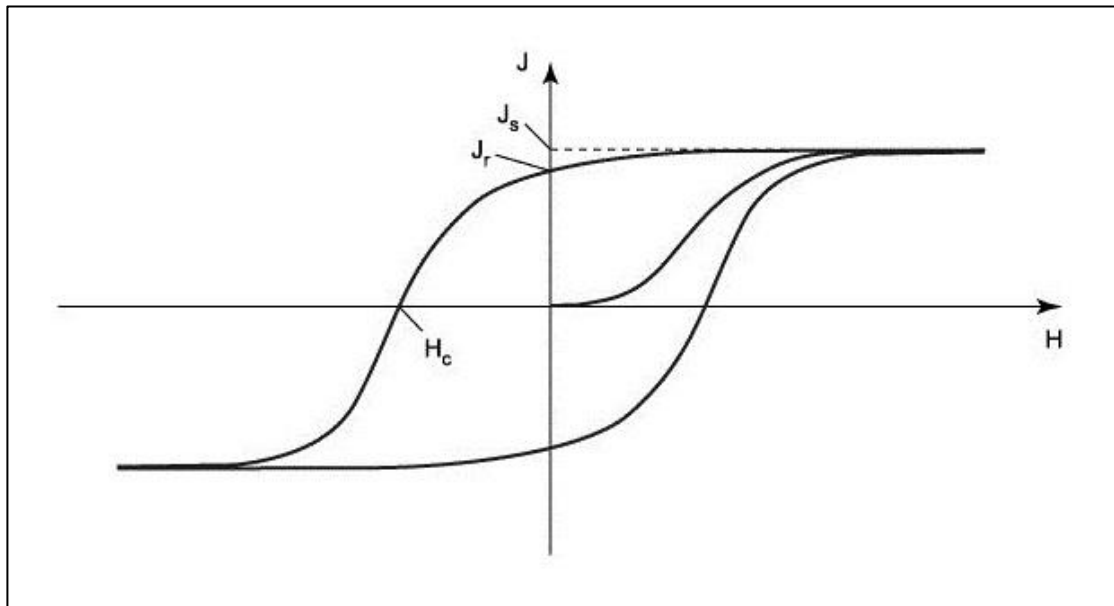
V bodě D dochází v materiálu ke stavu magnetického nasycení a všechny domény jsou ve směru vnějšího magnetického pole. Dalším zvětšováním intenzity vnějšího magnetického pole H už nelze nadále zvětšovat magnetickou polarizaci feromagnetika. [13][15][22]

1.3.3 Hysterezní smyčka

Zvláštností feromagnetických materiálů je, že pokud dosáhneme v materiálu stavu magnetického nasycení pomocí vnějšího magnetického pole o intenzitě H_S (obrázek 5), tak pokud nyní začneme tuto intenzitu opět snižovat, nebude se magnetická polarizace J snižovat podle stejné křivky, jak by se dalo očekávat. Místo toho se bude magnetická polarizace snižovat po zcela jiné křivce, kterou označujeme jako hysterezní smyčku $J(H)$ (obrázek 6).

V materiálu dochází k jevu označovaným jako magnetická hystereze. Tento jev je způsobený tím, že velikost magnetické polarizace feromagnetika není závislá pouze na intenzitě H , ale závisí i na jeho předchozím magnetickém stavu, tedy jestli byl nebo nebyl magnetizován. [13][15][22]

Jak je z obrázku (6) patrné, po zmagnetizování feromagnetického materiálu a následném snížení intenzity vnějšího magnetického pole na nulu, polarizace uvnitř materiálu neklesá na nulu, ale na hodnotu J_R , která je označována jako remanentní (zbytková) magnetická polarizace. Takto zmagnetizovaný materiál si svoje magnetické vlastnosti ponechává trvale, a to i bez přítomnosti vnějšího magnetického pole. Právě proto jsou feromagnetické materiály velice vhodné pro stavbu magnetických obvodů, pro ukládání informací nebo tvorbu permanentních magnetů.



Obrázek 6 - Hysterezní smyčka $J(H)$. Převzato z [22]

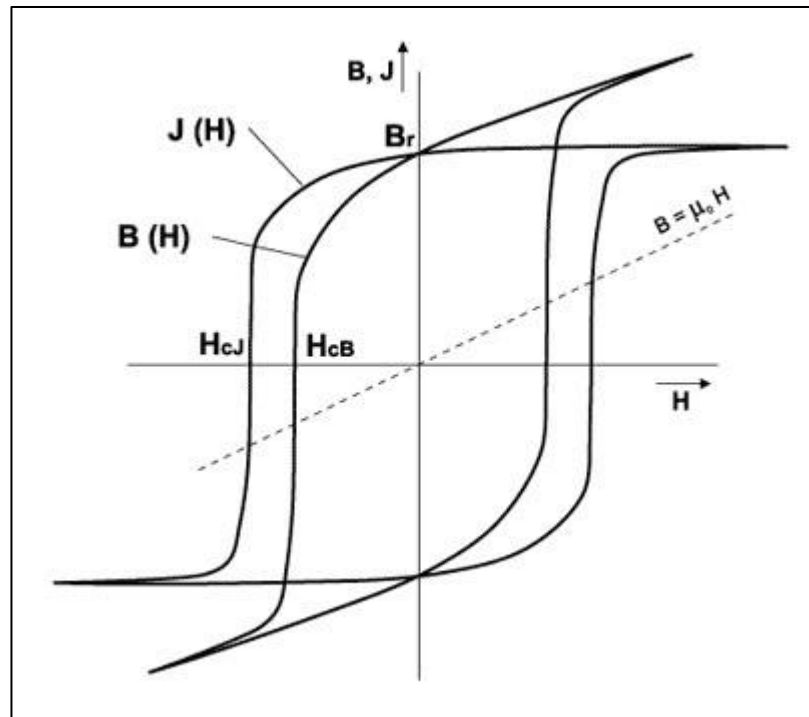
Pokud bychom chtěli snížit polarizaci v materiálu opět na nulu, musíme začít působit vnějším magnetickým polem, ale tentokrát opačného směru. Po dosažení určité intenzity H_C , která je označována jako koercitivní intenzita, klesne velikost magnetické polarizace v materiálu na nulu a ztrácí tak své magnetické vlastnosti. Jedná se tedy o velikost intenzity magnetického pole nutné k odmagnetování feromagnetického materiálu. Část hysterezní smyčky ve II. kvadrantu (J_R až H_C) se nazývá demagnetizační charakteristika.

Pokud bychom tuto intenzitu nadále zvyšovali, došlo by ke stejnému procesu jako předtím, materiál by se opět začal postupně magnetizovat ve směru tohoto vnějšího pole až do okamžiku nasycení. Tímto neustálým přemagnetováním z jednoho směru na opačný dochází k uzavření celé hysterezní smyčky. Tvar hysterezní smyčky, velikost magnetické remanence a velikost koercitivní intenzity je různý podle typu daného materiálu.

Celková plocha hysterezní smyčky je úměrná práci potřebné na přemagnetování feromagnetického materiálu neboli hysterezním ztrátám. Hysterezní ztráty tedy vznikají cyklickým magnetizováním materiálu a jsou způsobeny pochody při změnách doménové struktury v magnetickém poli a jsou přímo úměrné stupni deformace krystalické mřížky daného feromagnetika.

Podle šířky hysterezní smyčky (a tedy i velikosti H_C) se feromagnetické materiály rozdělují do dvou základních skupin – magneticky měkké a magneticky tvrdé. [13][15][22]

Kromě $J(H)$ hysterezní smyčky, která je důležitá pro hodnocení vlastností permanentních magnetů, se v praxi často pracuje s hysterezní smyčkou $B(H)$. Jak už název napovídá, neuvažuje se pouze samotná magnetická polarizace materiálu J , ale bere se v úvahu i vnější magnetické pole o intenzitě H . Podle rovnice (6) se tedy na svislou osu vynáší celková magnetická indukce B , která vzniká jako příspěvek vnějšího magnetického pole a vnitřní magnetické polarizace. [20][21][22]



Obrázek 7 - Hysterezní smyčky $J(H)$ a $B(H)$. Převzato z [20]

Na obrázku (7) jsou zobrazeny obě hysterezní smyčky $J(H)$ a $B(H)$. Jak je patrné z rovnice (1), celková magnetická indukce B je součtem vnitřní magnetické polarizace J a vnějšího magnetického pole, a proto křivka roste rychleji a má výše položená ramena.

Čárkovanou čarou je zobrazena závislost indukce na intenzitě vnějšího magnetického pole v prostředí vakua (vzduchu). Můžeme tedy pozorovat, že feromagnetický materiál vložený do magnetického pole toto pole výrazně zesiluje až do té doby, než se dosáhne saturace. Po dosažení saturace už indukce roste pouze stejným tempem jako ve vakuu a tudíž sklon hysterezní smyčky $B(H)$ za bodem saturace je rovnoběžný s křivkou pro vakuum. [22]

Na obrázku (7) si můžeme dále povšimnout, že velikost magnetické remanence B_R , je pro obě hysterezní smyčky shodná, což opět vyplývá ze vztahu (1) po dosazení $H = 0$.

Ovšem v případě koercitivní intenzity H_C , je situace rozdílná. Závislost $B(H)$ protíná osu H dříve než závislost $J(H)$ a proto tedy rozlišujeme dvě různé koercitivní intenzity. Aby se navzájem nepletly, bylo zavedeno značení H_{CJ} a H_{CB} , kde dodatečné indexy značí, k jaké křivce patří. Jejich význam je tedy následující: [20][21][22]

- H_{CJ} je velikost (vnitřní) koercitivní intenzity potřebné ke snížení magnetické polarizace feromagnetického materiálu na nulu – tedy ke skutečnému odmagnetování feromagnetika. Hodnota H_{CJ} je vždy větší než hodnota H_{CB} . [22]
- H_{CB} je velikost (vnější) koercitivní intenzity potřebné ke snížení celkové magnetické indukce feromagnetického materiálu na nulu. Hodnota H_{CB} je vždy menší než hodnota H_{CJ} . [22]

V praxi se pak často setkáváme s koercitivní intenzitou, která je značená pouze jako H_C . Vzhledem k tomu, že se často pracuje pouze s hysterezní smyčkou $B(H)$, H_C má pak stejný význam jako H_{CB} . Dalším značením, se kterým se lze v praxi setkat je H_{CI} nebo iH_C , obě představují vnitřní (intrinseckou) koercitivní intenzitu H_{CJ} .

1.3.4 Magneticky měkké materiály

Magneticky měkké materiály mají úzkou hysterezní smyčku a tím i malou velikost koercitivní intenzity ($H_C < 1000$ A/m). Z tohoto důvodu se dají velice snadno zmagnetovat a odmagnetovat. Protože se u nich při přemagnetování přeměňuje jen malá energie na teplo, používají se hlavně na magnetické obvody střídavých strojů a přístrojů (např. transformátory).

Magneticky měkkým materiálem je například čisté železo, ale protože má nízkou rezistivitu, která způsobuje ztráty vířivými proudy, a horší mechanické vlastnosti, v praxi se většinou používá s přísadami, které zlepšují jeho vlastnosti. [13][15]

1.3.5 Magneticky tvrdé materiály

Magneticky tvrdé materiály mají širokou hysterezní smyčku a velkou hodnotu koercitivní intenzity ($H_C > 1000$ A/m) z čehož plyne, že se dají obtížněji zmagnetovat a odmagnetovat. Protože mají velkou hodnotu remanentní indukce a také proto, že se nedají snadno odmagnetovat, používají se hlavně pro tvorbu permanentních magnetů nebo pro potřeby magnetického záznamu dat.

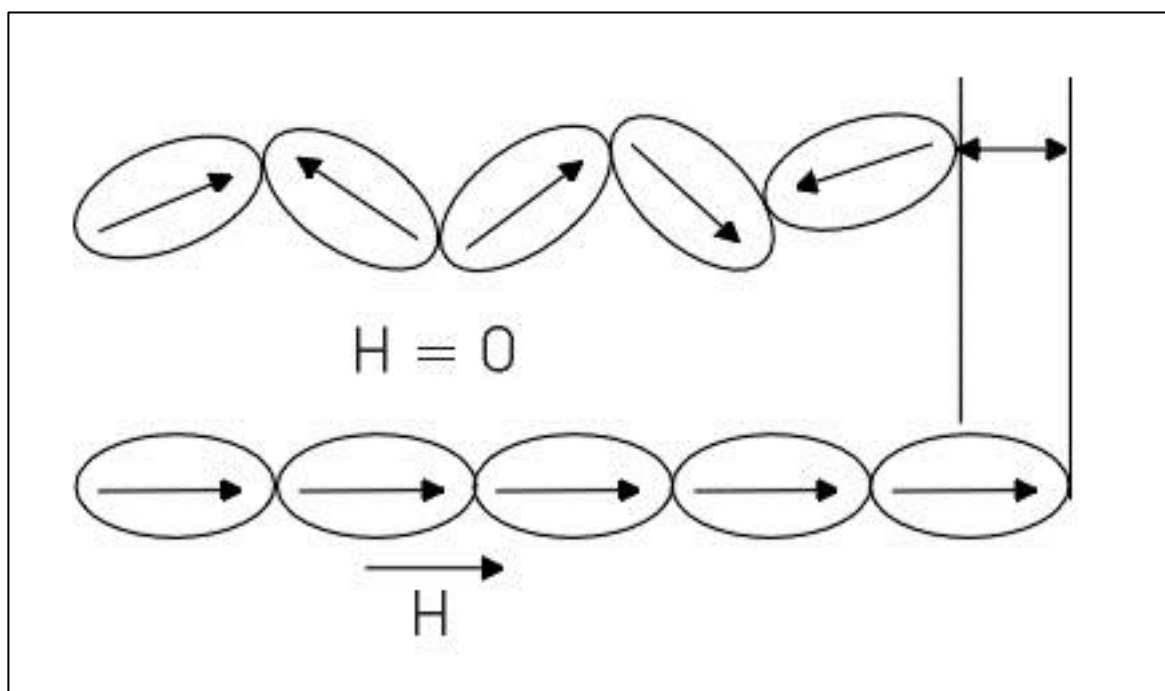
Hlavními zástupci magneticky tvrdých materiálů jsou tvrdé ferity, slitiny typu AlNiCo a materiály na bázi vzácných zemin. [13][15]

1.3.6 Magnetostrikce

Pojem magnetostrikce označuje změnu tvaru nebo rozměrů feromagnetických materiálů při změně magnetizace. Většina feromagnetických materiálů vykazuje měřitelnou hodnotu magnetostrikce.

Samotný mechanismus magnetostrikce je záležitostí atomů feromagnetického materiálu a dá se rozdělit na dvě části. Jednak je magnetostrikce způsobena posunem Blochových stěn a také je způsobena samotnou rotací domén, vlivem působení vnějšího magnetického pole. Změna orientace jednotlivých domén tedy způsobuje i změnu rozměrů feromagnetika. Změna rozměrů materiálu v jednom směru se projeví opačnou změnou v kolmém směru.

Princip magnetostrikce je schematicky naznačen na obrázku (8). [32]



Obrázek 8 - Princip magnetostrikce. Převzato z [32]

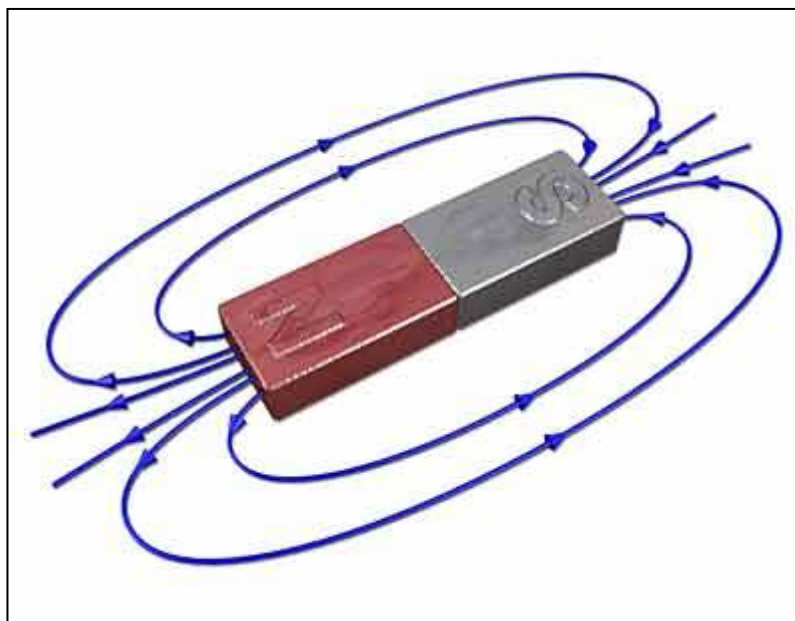
Z obrázku (8) je patrné, že při rotaci domén vlivem vnějšího magnetického pole, dojde k prodloužení feromagnetického materiálu.

2 Permanentní magnety

Magnetem se označuje materiál nebo předmět, který okolo sebe vytváří magnetické pole. Magnetické pole je pro člověka neviditelné, ale díky němu získává magnet svoji specifickou schopnost přitahovat feromagnetické látky (například železo) a také přitahovat či odpuzovat jiné magnety. V praxi se dá magnet vytvořit jako elektromagnet nebo jako permanentní magnet.

Elektromagnet je tvořen cívkou, která se chová jako magnet pouze při průchodu elektrického proudu touto cívkou. Pokud elektrický proud neprochází, cívka ztrácí svoje magnetické vlastnosti.

Permanentní magnet je předmět vyrobený z magnetického tvrdého materiálu, který byl zmagnetizován, a který je schopen trvale okolo sebe vytvářet magnetické pole bez cizí pomoci. Materiály, které se používají pro výrobu permanentních magnetů, se označují jako feromagnetické.

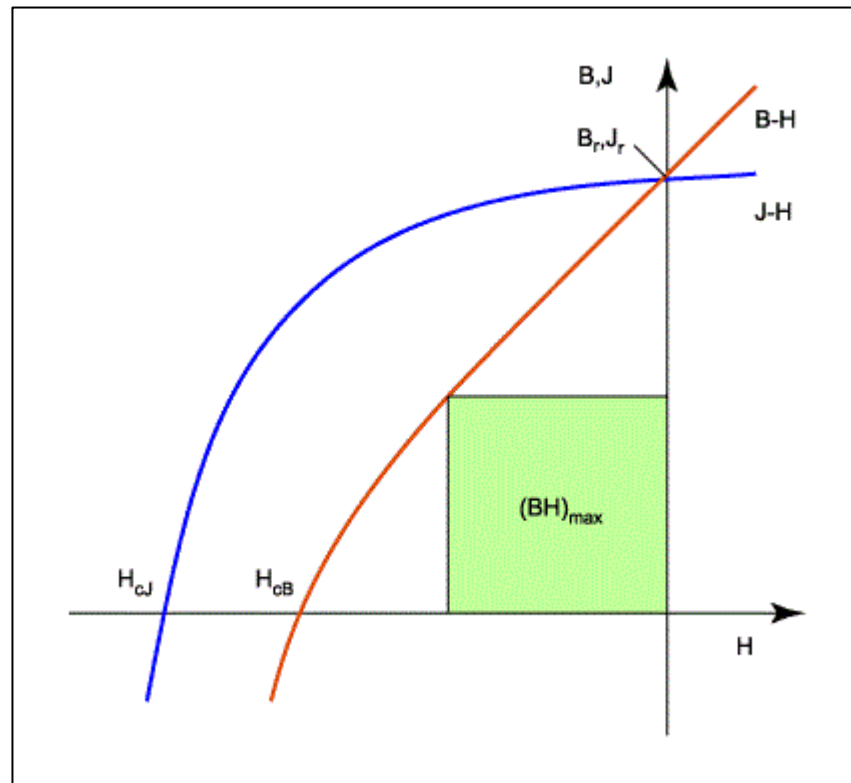


Obrázek 9 - Permanentní magnet. Převzato z [10]

2.1 Charakteristické parametry magnetů

Každý permanentní magnet je definován pomocí několika základních parametrů, které jsou získány z hysterezní smyčky (respektive demagnetizační charakteristiky) daného typu feromagnetického materiálu. Jsou to:

- B_R je remanentní indukce
- H_{CB} je vnější koercitivní intenzita
- H_{CJ} je vnitřní koercitivní intenzita
- $(BH)_{MAX}$ je maximální energetický produkt (součin)



Obrázek 10 - Demagnetizační charakteristika. Převzato z [22]

Na obrázku (10) je znázorněna typická demagnetizační charakteristika permanentního magnetu. Modrá křivka představuje závislost magnetické polarizace na intenzitě vnějšího magnetického pole J (H), zatímco červená křivka představuje závislost celkové magnetické indukce na intenzitě vnějšího magnetického pole B (H).

Koercitivní intenzita a magnetická remanence už byla podrobně popsána v první kapitole, a proto zde bude popsán pouze poslední parametr – maximální energetický produkt $(BH)_{MAX}$.

Maximální energetický produkt $(BH)_{MAX}$ je součinem magnetické indukce B a intenzity vnějšího magnetického pole H , kde obě veličiny mají maximální možnou hodnotu. Graficky je toto vyjádřeno na obrázku (10) jako největší zelený čtverec, který se dá vepsat pod křivku B (H). Tento bod představuje maximální energii, kterou je magnet schopen dodat při jeho provozu v pracovním bodě na demagnetizační charakteristice. Prakticky to znamená, že čím má magnet větší hodnotu $(BH)_{MAX}$, tím může být velikost magnetu menší. [7][20][21][22]

2.2 Feritové magnety

Feritové magnety (také označované pod pojmem keramické) jsou vytvořeny z oxidu železa a baria, nebo stroncia. Jedná se o nejrozšířenější a nejpoužívanější typ materiálu, vzhledem k jejich nízké ceně.

Feritové magnety se vyrábějí práškovou metalurgií jako anizotropní nebo izotropní. Izotropní magnety mají ve všech směrech v podstatě stejné magnetické vlastnosti. Vyrábějí se lisováním bez přítomnosti magnetického pole, přičemž nemají žádnou osu přednostní magnetizace. Naproti tomu anizotropní magnety mají dobré magnetické vlastnosti pouze v jednom směru, který se označuje jako přednostní osa magnetizace. Tato přednostní osa se vytvoří díky tomu, že je magnet lisován za přítomnosti magnetického pole. Oproti izotropním materiálům však mívají hodnotu remanentní magnetické indukce zhruba 2 krát větší.

Prášková metalurgie je metodou výroby předmětů z prášků kovů a oxidů. Jednotlivé suroviny v podobě prášku se smísí a následně se spékáním (sintrováním) ve vakuové peci spojí dohromady. Takto vytvořený magnet se svými fyzickými vlastnostmi podobá keramice, je tvrdý, ale křehký a dá se snadno rozbít. Do požadovaných tvarů se nejčastěji opracovávají broušením pomocí diamantových nástrojů.

Feritové magnety jsou odolné vůči korozi, vlivům počasí a oxidaci. Jsou odolné vůči odmagnetování a také odolají většině chemikálií a rozpouštědel. Pracovní teplota se pohybuje v rozmezí -20°C až $+250^{\circ}\text{C}$ a jsou tak vhodné pro použití v elektrických strojích.

Předností feritových magnetů je především jejich nízká cena, střední hodnota koerzivní intenzity a odolnost vůči korozi. Nevýhodou oproti ostatním materiálům je nižší maximální energetický součin a jejich křehkost. [1][3][4][5][6][7][8]

Typické vlastnosti:

- Odolnost vůči korozi
- Provozní teplota až 250°C
- Vysoká rezistivita
- Nižší maximální energetický součin
- Dostupnost v jednoduchých tvarech, kvůli obtížnému zpracování
- Křehké a choulostivé na zacházení

- Nepotřebují žádnou povrchovou úpravu

Typické oblasti použití:

- DC motory
- Magnetická rezonance
- Magnetické separátory
- Senzory v automobilovém průmyslu
- Magnety určené ke zvedání, přidržování, separování
- Reproduktory

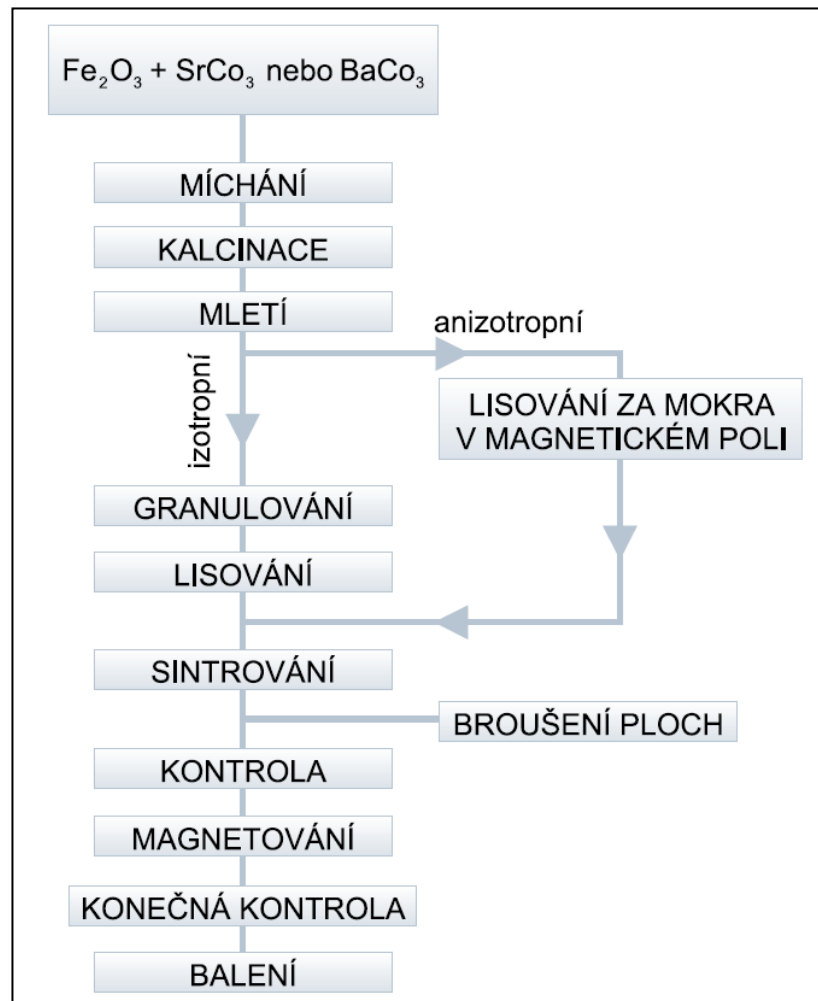
[3][4][5][9]

Tabulka 4 - Fyzikální vlastnosti feritových magnetů [9]

Teplotní koeficient remanence B_R [%/°C]	Teplotní koeficient koercivity H_{CJ} [%/°C]	Hustota ρ [g/cm ³]	Rezistivita ρ [Ω.cm]	Curie teplota t_c [°C]
-0,19	0,4	4,0 - 5,1	$10^4 - 10^8$	450

Tabulka 5 - Magnetické vlastnosti feritových magnetů [9]

Symbol materiálu	Remanence B_R		Koercivita H_{CB}		Koercivita H_{CJ}		Max. energetický součin $(BH)_{MAX}$	
	[mT]	[kG]	[kA/m]	[kOe]	[kA/m]	[kOe]	[kJ/m ³]	[MGOe]
F10T	200-235	2,00-2,35	125-160	1,57-2,01	210-280	2,64-3,52	6,5-9,5	0,82-1,19
F20	320-380	3,20-3,80	135-190	1,70-2,39	140-195	1,76-2,45	18,0-22,0	2,26-2,76
F25	360-400	3,60-4,00	135-170	1,70-2,14	140-200	1,76-2,51	22,5-28,0	2,83-3,52
F30	370-400	3,70-4,00	175-210	2,20-2,64	180-220	2,26-2,77	26,0-30,0	3,27-3,77
F30BH	380-400	3,80-4,00	230-275	2,89-3,46	235-290	2,95-3,65	27,0-32,5	3,39-4,08
F35	410-430	4,10-4,30	220-250	2,77-3,14	225-255	2,83-3,21	31,5-35,0	3,96-4,40



Obrázek 11 - Blokové schéma výroby feritových magnetů. Převzato z [1]

2.3 Alnico magnety

Alnico magnety se vyrábějí kombinací hliníku, niklu, kobaltu a dalších příměsí, které se přidávají za účelem zlepšení vlastností magnetu. Alnico magnety mají vysokou remanenci, vysokou pracovní teplotu až 500°C, jsou odolné vůči korozi, ale mají nízkou hodnotu koercitivní intenzity. Alnico materiál je tvrdý a opracovává se pouze broušením. Má vysokou odolnost vůči kyselinám a rozpouštědlům.

Alnico magnety se vyrábějí pomocí dvou základních metod – lisováním nebo spékáním. Spékané magnety nabízejí lepší mechanické vlastnosti, zatímco lisované vynikají větším maximálním energetickým součinem a mohou být vyrobeny i ve složitých tvarech.

Při výrobě lisováním se materiál roztaví a nalije do formy. Po zatuhnutí se materiál žihá a následně ochladí, někdy i v přítomnosti magnetického pole. Přítomnost magnetického pole při žihání značí výrobu anizotropního magnetu, který tak získává přednostní osu magnetizace. Pokud se materiál žihá bez magnetického pole, vyrobí se magnet izotropní, který má ve všech

směrech stejné vlastnosti. Po ochlazení se magnet zpracuje do potřebných tolerancí a následně se zmagnetizuje.

Spékané magnety se vyrábějí jako v případě feritových magnetů pomocí práškové metalurgie. Opět se mohou vyrobit ve formě izotropního nebo anizotropního magnetu.

[2][3][4][5][6]

Typické vlastnosti:

- Vysoká odolnost vůči korozi
- Vysoká pracovní teplota až 500°C
- Velice dobrá tepelná stabilita
- Vysoká remanence
- Vyšší maximální energetický součin
- Nízká hodnota koercitivní intenzity
- Vyšší cena

Typické oblasti použití:

- Přidržovací magnety
- Magnetické separátory
- Magnetická rezonance
- Elektronové trubice
- Senzory
- Bezpečnostní systémy
- Motory, generátory
- Radary
- Televize, telefony
- Reproduktory

[3][4][5]

Tabulka 6 - Fyzikální vlastnosti Alnico magnetů [2]

Teplotní koeficient remanence B_R [%/°C]	Teplotní koeficient koercivity H_{CJ} [%/°C]	Hustota ρ [g/cm ³]	Rezistivita ρ [Ω.cm]	Curie teplota t_c [°C]
-0,03	0,01 - 0,03	6,9 - 7	50 - 75.10 ⁻⁶	860

Tabulka 7 - Magnetické vlastnosti lisovaných Alnico magnetů [2]

Symbol materiálu	Remanence B_R		Koercivita H_{CB}		Koercivita H_{CJ}		Max. energetický součin $(BH)_{MAX}$	
	[mT]	[G]	[kA/m]	[Oe]	[kA/m]	[Oe]	[kJ/m ³]	[MGOe]
Alnico 1	720	7200	37	470	38	480	11,1	1,4
Alnico 2	750	7500	45	560	46	580	13,5	1,7
Alnico 3	700	7000	38	480	40	500	10,7	1,35
Alnico 5	1280	12800	51	640	51	640	43,8	5,5
Alnico 6	1050	10500	62	780	64	800	31	3,9
Alnico 8	820	8200	131	1650	148	1860	42,2	5,3
Alnico 9	1060	10600	119	1500	119	1500	71,6	9

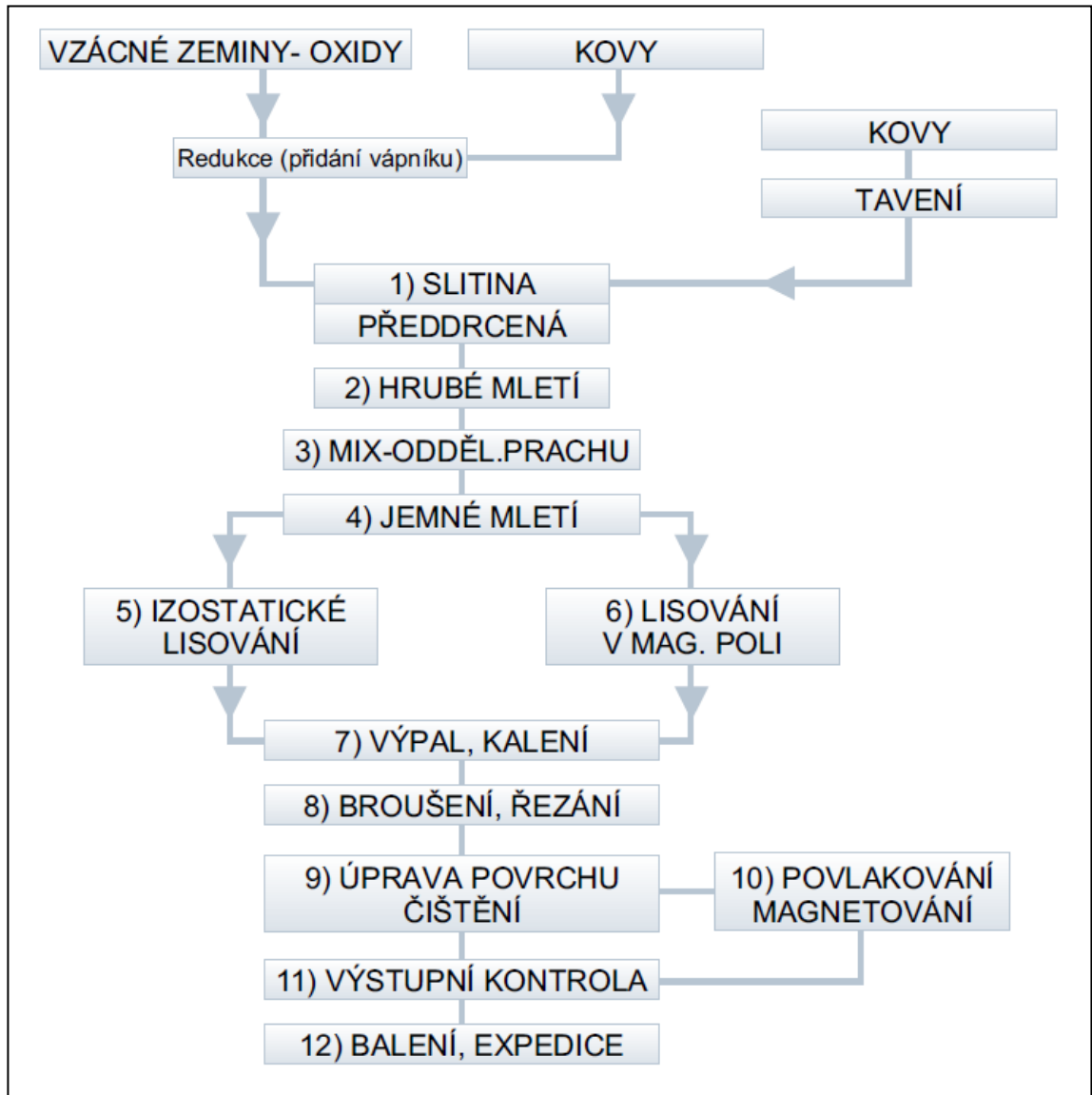
Tabulka 8 - Magnetické vlastnosti spékaných Alnico magnetů [2]

Symbol materiálu	Remanence B_R		Koercivita H_{CB}		Koercivita H_{CJ}		Max. energetický součin $(BH)_{MAX}$	
	[mT]	[G]	[kA/m]	[Oe]	[kA/m]	[Oe]	[kJ/m ³]	[MGOe]
Alnico 2	710	7100	44	550	45	570	11,9	1,5
Alnico 5	1090	10900	49	620	50	630	31	3,9
Alnico 6	940	9400	63	790	65	820	23,1	2,9
Alnico 8	740	7400	119	1500	134	1690	31,8	4

2.4 Magnety ze vzácných zemin

Magnety na bázi kovů ze vzácných zemin se vyrábí z prvků periodické tabulky, které se označují jako tzv. vzácné zeminy. Nejrozšířenější vzácné zeminy pro výrobu permanentních magnetů jsou Neodym (Nd) a Samarium (Sm). K těmto prvkům se dále přidávají přechodové kovy, nejčastěji Kobalt (Co) nebo Železo (Fe), a společně vytváří tzv. intermetalickou sloučeninu. Intermetalickou sloučeninou se rozumí sloučenina dvou nebo více kovů. V zásadě existují 3 základní typy těchto sloučenin – $SmCo_5$, Sm_2Co_{17} a $Nd_2Fe_{14}B$.

Ve srovnání s tradičními permanentními magnety poskytují tyto magnety podstatně silnější magnetické pole a mají významně vyšší hodnoty koercitivní intenzity a magnetické remanence. [1][2][5]



Obrázek 12 - Blokové schéma výroby magnetů ze vzácných zemin. Převzato z [1]

2.4.1 SmCo magnety

Samarium kobaltové magnety byly prvními na bázi kovů ze vzácných zemin, které byly zavedeny do masové výroby. Vyrábějí se práškovou metalurgií, obvykle jako anizotropní. V současnosti se vyrábějí především na bázi dvou intermetalických sloučenin - SmCo_5 a $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$. Jejich maximální energetický součin je až pětinasobně vyšší než u feritových nebo Alnico magnetů. Díky tomu se mohou tyto magnety vyrábět v menších velikostech. Jsou velmi odolné vůči demagnetizaci.

Oproti neodymovým magnetům mají menší maximální energetický součin, ale zato mají daleko lepší tepelnou stabilitu, větší rozsah pracovních teplot a výrazně větší odolnost vůči

korozí. SmCo magnety se dají použít i ve velice nízkých teplotách, takže jsou vhodné i pro kryogenní aplikace. Jejich maximální provozní teplota dosahuje až 300°C.

SmCo magnety se vzhledem k jejich tvrdosti opracovávají diamantovými nástroji. Kromě toho je tento materiál také křehký, takže při nárazech může dojít k odštípnutí povrchové vrstvy, v horším případě k jeho prasknutí. Jsou odolné vůči korozí, ale nejsou odolné vůči kyselinám a rozpouštědlům. [1][2][3][4][5][6][7][9]

Typické vlastnosti:

- Vysoký maximální energetický součin
- Vysoká hodnota koercitivní intenzity
- Vysoká remanence
- Široký rozsah provozních teplot
- Velice dobrá teplotní stabilita
- Odolnost vůči korozí
- Horší mechanické vlastnosti
- Vyšší cena

Typické oblasti použití:

- Motory, generátory
- Senzory
- Satelitní systémy
- Reprodukory
- Měřicí a kontrolní přístroje

[3][4][5]

Tabulka 9 - Magnetické vlastnosti SmCo₅ magnetů [2]

Symbol materiálu	Remanence B _R		Koercivita H _{CB}		Koercivita H _{CJ}		Max. energetický součin (BH) _{MAX}	
	[mT]	[G]	[kA/m]	[Oe]	[kA/m]	[Oe]	[kJ/m ³]	[MGOe]
S16	830	8300	37	470	600	7500	130	16
S18	870	8700	45	560	680	8500	140	18
S20	900	9000	38	480	680	8500	160	20
S22	950	9500	51	640	720	9000	180	22

Tabulka 10 - Magnetické vlastnosti $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ magnetů [2]

Symbol materiálu	Remanence B_R		Koercivita H_{CB}		Koercivita H_{CJ}		Max. energetický součin $(BH)_{MAX}$	
	[mT]	[G]	[kA/m]	[Oe]	[kA/m]	[Oe]	[kJ/m ³]	[MGOe]
S24	1000	10000	480	6000	560	7000	190	24
S26	1050	10500	720	9000	800	10000	210	26
S28	1090	10900	520	6500	560	7000	220	28
S30	1160	11600	840	10600	1910	24000	240	30

Tabulka 11 - Fyzikální vlastnosti SmCo_5 magnetů [2]

Teplotní koeficient remanence B_R [%/°C]	Hustota ρ [g/cm ³]	Rezistivita ρ [Ω.cm]	Curie teplota t_c [°C]
-0,04	8,2	$5 \cdot 10^{-6}$	750

Tabulka 12 - Fyzikální vlastnosti $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ magnetů [26]

Teplotní koeficient remanence B_R [%/°C]	Hustota ρ [g/cm ³]	Rezistivita ρ [Ω.cm]	Curie teplota t_c [°C]
-0,03	8,4	$86 \cdot 10^{-6}$	825

2.4.2 Neodymové magnety

Neodymové magnety patří mezi nejúspěšnější na trhu, díky jejich skvělým magnetickým vlastnostem. Jedná se o jeden z nejsilnějších komerčně dostupných magnetů. Opět se tedy tyto magnety hodí tam, kde je potřeba malá velikost. Podobně jako SmCo magnety se vyrábějí práškovou metalurgií, především na bázi intermetalické sloučeniny $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$, a také se obvykle vyrábějí v anizotropním provedení. Neodymy jsou tvrdé, ale křehké a dají se snadno rozbít. Nejčastěji se opracovávají za použití diamantových nástrojů.

Neodymové magnety mají podobné vlastnosti jako SmCo magnety, ale jsou náchylné korozi a nemají tak dobré tepelné vlastnosti, takže jejich magnetické vlastnosti jsou velice závislé na teplotě. Mají ovšem lepší mechanické vlastnosti a také největší maximální energetický součin ze všech ostatních běžných magnetů. Kromě toho mají také vysokou hodnotu koercivity, takže jsou velmi odolné vůči demagnetizaci.

Neodymové magnety se vyrábějí ve specifických teplotních třídách, které se liší maximální provozní teplotou. Neodymové magnety v první třídě mají stanovenou maximální provozní teplotu 80°C a každá další třída má maximální teplotu vyšší. Nejvyšší maximální provozní teplota komerčně nabízených neodymových magnetů je 230°C. Magnetické vlastnosti uvedené v tabulce (14) platí pro třídu s maximální provozní teplotou 80°C.

Nevýhodou neodymových magnetů je jejich náchylnost ke korozi. Při vysoké vlhkosti vzduchu oxidují, proto se vždy v závěrečné fázi výroby nanáší na magnet ochranná vrstva. Nejčastěji se pomocí galvanizace pokovují zinkem nebo niklem, proto získávají svůj typický lesklý vzhled. Další z možností ochrany je pak nátěr epoxidovou pryskyřicí (plastem), nebo pasivace. Pasivací se rozumí vytvoření ochranné vrstvy pomocí působení chemických látek nebo elektrochemickými metodami. [1][2][3][4][5][6][7][9]

Typické vlastnosti:

- Nejvyšší maximální energetický součín
- Velmi vysoká hodnota koercitivní intenzity
- Vysoká remanence
- Nejsou odolné vůči korozi – nutno nanést ochrannou vrstvu
- Horší mechanické vlastnosti
- Horší tepelné vlastnosti
- Vyšší cena

Typické oblasti použití:

- DC Motory
- Servopohony
- Separátory
- Reproduktory, mikrofony
- Počítače

[3][4][5]

Tabulka 13 - Fyzikální vlastnosti neodymových magnetů [9]

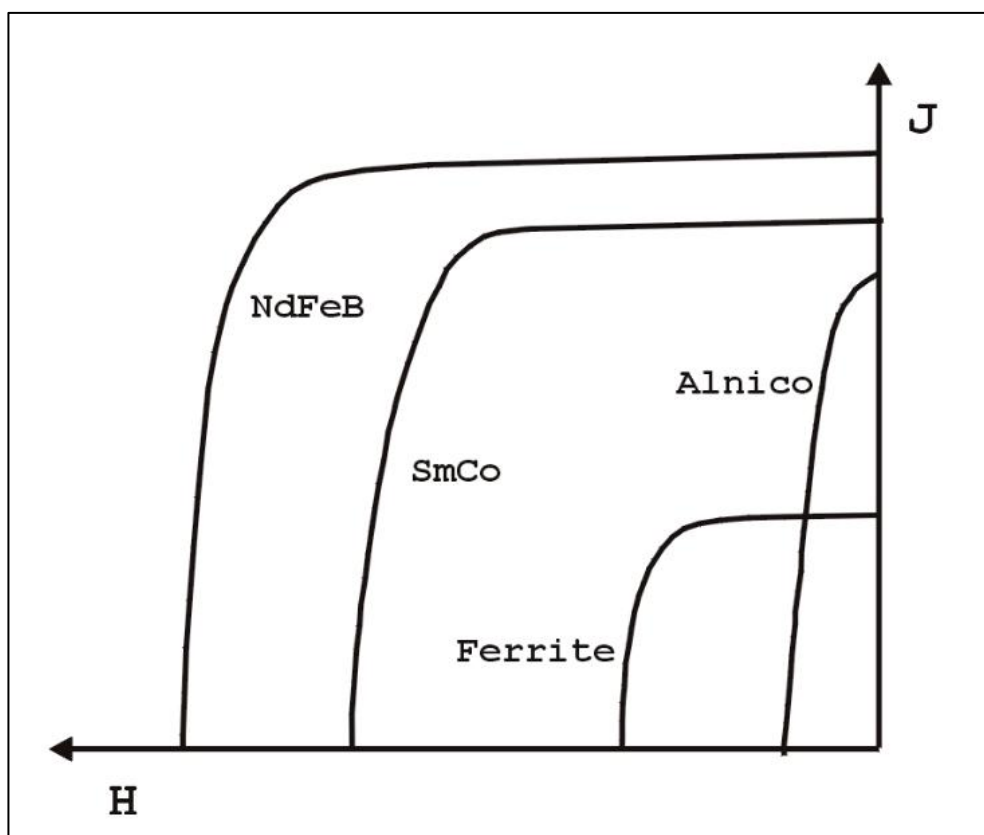
Teplotní koeficient remanence B_R [%/°C]	Teplotní koeficient koercivity H_{CJ} [%/°C]	Hustota ρ [g/cm ³]	Rezistivita ρ [Ω.cm]	Curie teplota t_c [°C]
-0,1	-0,6	7,5	$160 \cdot 10^{-6}$	310

Tabulka 14 - Magnetické vlastnosti neodymových magnetů, max. provozní teplota 80°C [4]

Symbol materiálu	Remanence B_R		Koercivita H_{CB}		Koercivita H_{CJ}		Max. energetický součin $(BH)_{MAX}$	
	[mT]	[G]	[kA/m]	[Oe]	[kA/m]	[Oe]	[kJ/m ³]	[MGOe]
N35	1170	11700	868	10900	955	12000	279	35
N38	1220	12200	899	11300	955	12000	303	38
N40	1250	12500	907	11400	955	12000	319	40
N42	1280	12800	915	11500	955	12000	335	42
N45	1320	13200	923	11600	955	12000	359	45
N48	1380	13800	923	11600	955	12000	382	48
N50	1400	14000	796	10000	876	11000	398	50

2.5 Demagnetizační charakteristiky magnetů

Na obrázku (13) je zobrazeno porovnání typických demagnetizačních charakteristik $J(H)$ pro všechny čtyři základní typy feromagnetických materiálů používaných pro tvorbu permanentních magnetů.



Obrázek 13 - Porovnání demagnetizačních charakteristik různých materiálů

3 Návrh solenoidu a výběr magnetů pro výpočet ztrát

Tato kapitola se věnuje návrhu solenoidu a výběru permanentních magnetů, které se budou zatěžovat reálným magnetickým polem pomocí programu FEMM. Cílem pak bude určení ztrát v těchto permanentních magnetech.

3.1 FEMM

FEMM je sada programů pro řešení nízkofrekvenčních elektromagnetických úloh v dvojdimenzionální planární nebo osově symetrické soustavě. V současné době umí tento program řešit lineární a nelineární magnetostatické úlohy, lineární a nelineární harmonické magnetické úlohy, lineární elektrostatické úlohy a úlohy proudění tepla v ustáleném stavu. FEMM je rozdělen do 3 základních částí: [28]

- **interactive shell (femm.exe)**

Interactive shell slouží jako základní uživatelské rozhraní, ve kterém lze kreslit geometrii úlohy, která má být řešena. Dále se zde nastavují materiálové parametry a okrajové podmínky dané úlohy.

- **triangle.exe**

Triangle.exe podle zadané geometrie provede diskretizaci celé oblasti úlohy na trojúhelníkovou síť, ve které se pak bude počítat výsledné řešení.

- **solvers**

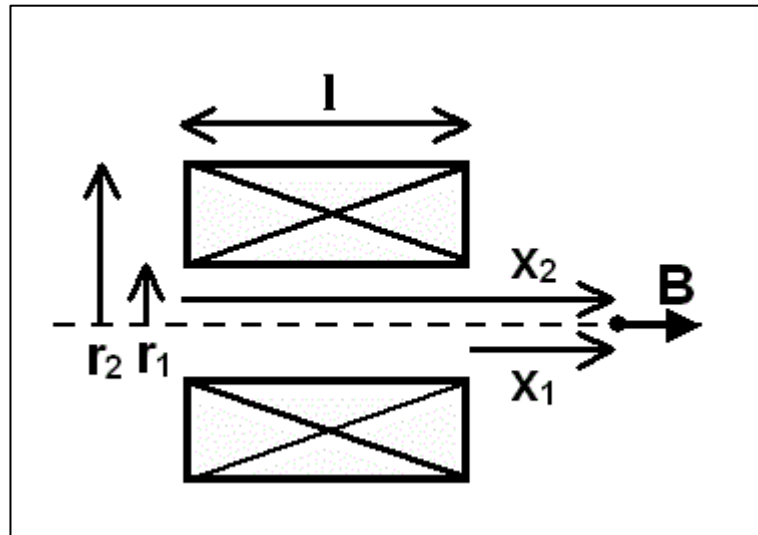
Poslední část se dělí na samotný řešič, který na základě všech zadaných parametrů vyřeší danou úlohu, a na postprocessing. Postprocessing se provádí přímo v hlavním okně aplikace femm.exe, kde se výsledky z řešiče dají zobrazit ve formě kontur a barevné škály. Program dále nabízí možnost uživateli zkontrolovat vyřešené pole na libovolných místech a také celou řadu dalších výpočetních operací na vyřešeném poli. [28]

3.2 Návrh solenoidu

Solenoid bude v programu FEMM použit pro simulaci magnetického pole, kterým se budou zatěžovat modely permanentních magnetů. Výchozím bodem pro návrh je, aby byl daný solenoid schopný vytvořit magnetické pole v oblasti uvnitř solenoidu o maximální indukci 1 T, přičemž jím bude protékat vhodně zvolený proud (např. 10 A). Výhodou pak bude snadnější nastavování požadované velikosti indukce změnou proudu. Dalším

požadavkem je, aby měl solenoid vnitřní průměr alespoň 10 cm, aby se poté do něj mohl vložit model permanentního magnetu. Výchozí hodnoty tedy jsou:

- $B_{MAX} = 1 \text{ T}$
- $I = 10 \text{ A}$
- $r_1 = 0,05 \text{ m}$



Obrázek 14 - Schéma solenoidu [27]

Na obrázku (14) je znázorněna geometrie solenoidu konečné délky. Abychom mohli vypočítat skutečnou hodnotu magnetické indukce v bodě na ose solenoidu, vyjdeme z následujícího vztahu:

$$B = \frac{\mu_0 I n}{2(r_2 - r_1)} \left[x_2 \ln \frac{\sqrt{r_2^2 + x_2^2} + r_2}{\sqrt{r_1^2 + x_2^2} + r_1} - x_1 \ln \frac{\sqrt{r_2^2 + x_1^2} + r_2}{\sqrt{r_1^2 + x_1^2} + r_1} \right]$$

Rovnice 9 - Velikost magnetické indukce v bodě na ose solenoidu [27]

- B je celková magnetická indukce [T]
- μ_0 je permeabilita vakua $4\pi 10^{-7}$ [H/m]
- I je velikost proudu ve vodiči [A]
- n je počet závitů na jednotku délky
- r_1 je vnitřní poloměr solenoidu [m]
- r_2 je vnější poloměr solenoidu [m]
- x_1 a x_2 jsou vzdálenosti konců solenoidu k bodu, kde se počítá velikost B [m]

Vzhledem k tomu, že model permanentního magnetu bude umístěn na ose přímo uprostřed solenoidu, upravíme rovnici (9) dosazením $x_1 = (-x_2)$. Vztah pro výpočet indukce uprostřed solenoidu pak přejde do následující podoby:

$$B = \frac{\mu_0 IN}{2(r_2 - r_1)} \ln \frac{\sqrt{r_2^2 + \left(\frac{l}{2}\right)^2} + r_2}{\sqrt{r_1^2 + \left(\frac{l}{2}\right)^2} + r_1}$$

Rovnice 10 - Velikost magnetické indukce v bodě uprostřed osy solenoidu [27]

- N je celkový počet závitů
- l je délka solenoidu [m]

Pomocí rovnice (10) a zadaných výchozích parametrů pak byly navrhnuty a dopočítány ostatní parametry tak, aby byl splněn výchozí požadavek. V následující rovnici je proveden výpočet magnetické indukce s již dosazenými navrhnutými parametry a můžeme vidět, že velikost indukce se shoduje s požadovanou.

$$B = \frac{4\pi 10^{-7} \cdot 10 \cdot 75580}{2(0,45 - 0,05)} \ln \frac{\sqrt{0,45^2 + \left(\frac{0,8}{2}\right)^2} + 0,45}{\sqrt{0,05^2 + \left(\frac{0,8}{2}\right)^2} + 0,05} = 1 \text{ T}$$

Výsledné parametry navrhnutého solenoidu jsou zobrazeny v následující tabulce (15):

Tabulka 15 - Parametry solenoidu

Proud	I [A]	10
Počet závitů	N [-]	75580
Vnitřní poloměr	r_1 [m]	0,05
Vnější poloměr	r_2 [m]	0,45
Délka	l [m]	0,8

3.3 Výběr magnetů pro simulaci

Z materiálů uvedených ve druhé kapitole byly vybrány dvě skupiny permanentních magnetů - samarium kobaltový (SmCo) magnet a neodymový (NdFeB) magnet. Pro oba tyto magnety se vytvořily modely metodou konečných prvků v prostředí programu FEMM, které se následně zatěžovaly magnetickým polem, které generoval navrhnutý solenoid.

3.3.1 Parametry zvolených magnetů

Parametry zvolených permanentních magnetů, pro které byly vytvořeny modely v programu FEMM, jsou zobrazeny v následující tabulce (16):

Tabulka 16 - Parametry zvolených magnetů

		Typ magnetu	
		SmCo	NdFeB
B_R	[T]	1	1,2
H_C	[kA/m]	685	900
μ_r	[-]	1,05	1,05
ρ	[Ω .cm]	$86 \cdot 10^{-6}$	$160 \cdot 10^{-6}$
γ	[MS/m]	1,162	0,625

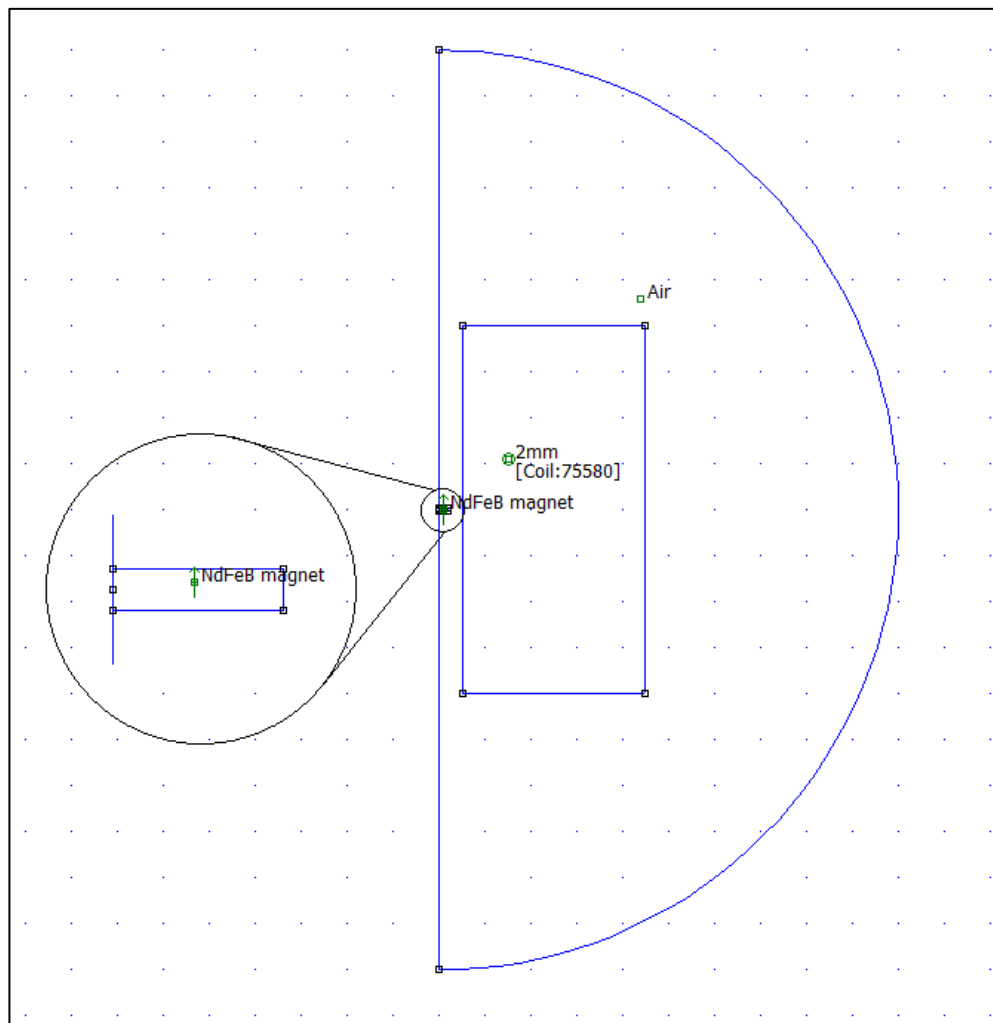
Z tabulky je patrné, že SmCo a NdFeB magnet se liší hlavně svými elektrickými vlastnostmi. Rezistivita neodymového magnetu je téměř dvojnásobná oproti SmCo magnetu.

Kromě toho má neodymový magnet také větší hodnotu koercitivní intenzity.

3.4 Model solenoidu a magnetu v programu FEMM

Na následujícím obrázku (15) je vidět hotový model solenoidu a permanentního magnetu v prostředí programu FEMM.

Model je kreslen v osově symetrických souřadnicích. Z obrázku je patrné, že permanentní magnet je umístěn na ose přímo uprostřed namodelovaného solenoidu, kde je velikost magnetické indukce homogenní. Okolo obou modelů je nakreslena hraniční oblast (vyplněná vzduchem), ve které program FEMM vyřešil danou úlohu.



Obrázek 15 - Model solenoidu a magnetu v programu FEMM

4 Určení ztrát ve vybraných magnetech

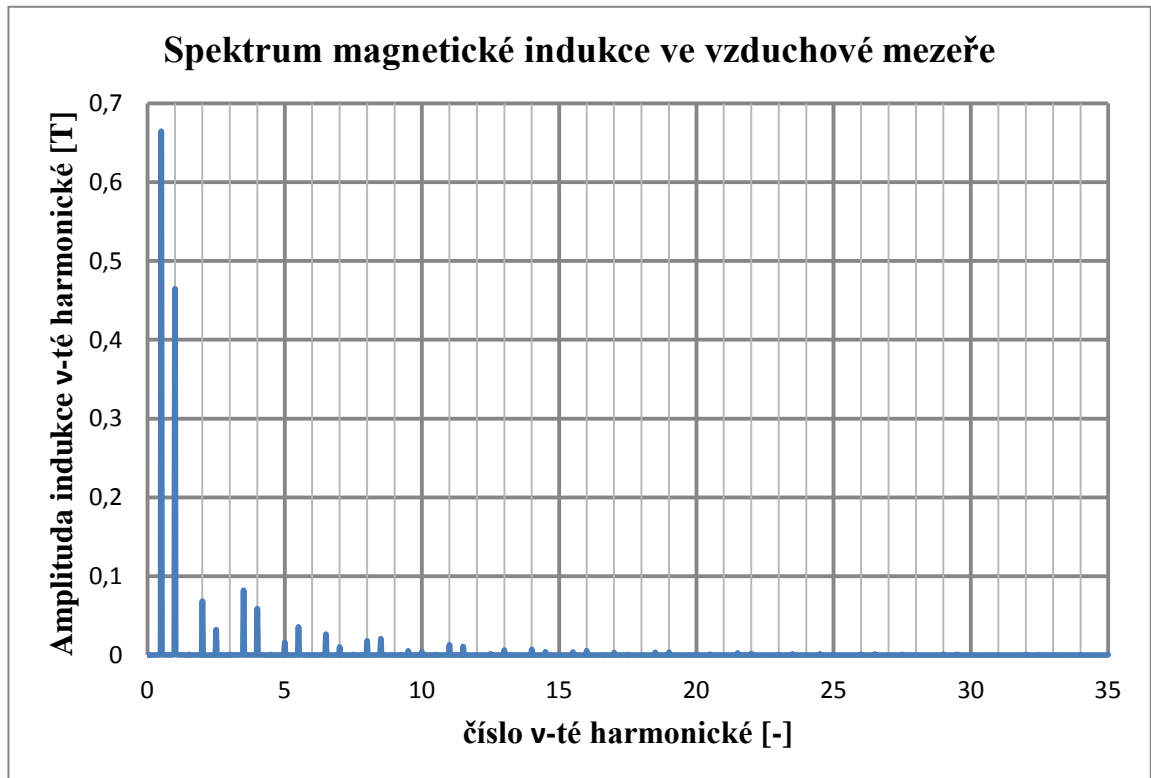
Po dokončení návrhu a tvorby modelů vybraných permanentních magnetů proběhla simulace jejich zatížení reálným magnetickým polem. Návrh modelů a parametry vybraných magnetů jsou uvedeny v předchozí kapitole.

Oba modely magnetů se zatěžovaly reálným magnetickým polem a cílem bylo určení ztrát, které v magnetech při tomto zatížení vznikají.

Reálné magnetické pole bylo získáno ze statoru jednoho ze strojů s permanentními magnety navrhovaných na katedře elektromechaniky a výkonové elektroniky na elektrotechnické fakultě ZČU a bylo dodáno vedoucím diplomové práce. Pro samotné zatížení magnetů tímto polem byl využit navrhnutý model solenoidu z předchozí kapitoly.

4.1 Magnetické pole ve vinutí motoru

Reálné magnetické pole bylo převedeno rychlou Fourierovou transformací (FFT) na spektrum jednotlivých harmonických složek. Na následujícím obrázku (16) je zobrazeno celé spektrum magnetické indukce ve statorovém vinutí stroje s permanentními magnety.



Obrázek 16 - Spektrum magnetické indukce ve vzduchové mezeře motoru

Pro samotné zatížení permanentních magnetů mají význam pouze nejvýraznější harmonické složky z celého spektra. Proto bylo vybráno pouze prvních 11 nejvýraznějších harmonických složek, které byly následně použity pro simulaci zatížení magnetů v programu FEMM. V následující tabulce (17) jsou zobrazeny vybrané harmonické složky spolu s velikostí jejich amplitudy magnetické indukce a frekvencí, kterou mají vůči magnetům na rotoru stroje.

Tabulka 17 - Vybrané harmonické složky magnetického pole

Číslo v-té harmonické [-]	Frekvence v-té harmonické [Hz]	Frekvence v-té harmonické vůči magnetu [Hz]	Amplituda indukce v-té harmonické [T]
0,5	350	350	0,664621
1	700	0	0,464726
2	1400	700	0,068318
2,5	1750	1050	0,032243
3,5	2450	1750	0,082211
4	2800	2100	0,058874
5	3500	2800	0,016318
5,5	3850	3150	0,035713
6,5	4550	3850	0,026458
7	4900	4200	0,010266
8	5600	4900	0,018031
8,5	5950	5250	0,020654
9,5	6650	5950	0,005278
10	7000	6300	0,004025
11	7700	7000	0,013044

Frekvence první základní harmonické se získala ze vztahu pro točivé pole motoru:

$$n = \frac{60 f}{p}$$

Rovnice 11 - Otáčky točivého pole motoru

- n je počet otáček [ot/min]
- f je frekvence [Hz]

- p je počet pólových dvojic motoru [-]

Otáčky motoru jsou 2100 ot/min a počet pólových dvojic je roven 20. Po dosažení do vztahu (11), vyjde frekvence první základní harmonické:

$$f = \frac{p n}{60} = \frac{20 \cdot 2100}{60} = 700 \text{ Hz}$$

První harmonická složka magnetického pole se však otáčí stejnou rychlostí jako rotor a tedy i magnety umístěné na rotoru. Frekvence první harmonické vůči magnetům je tak nulová, do magnetů první harmonická nic neindukuje. Vztah pro určení frekvencí ostatních vybraných harmonických složek vůči magnetům je následující:

$$f_v = (v - 1)f$$

- f_v je frekvence v -té harmonické složky [Hz]
- v je pořadí harmonické složky [-]
- f je frekvence základní harmonické [Hz]

4.2 Způsob simulace v programu FEMM

Po té, co byl nakreslen kompletně celý model cívky a magnetu podle třetí kapitoly, proběhla vlastní simulace pro zobrazení rozložení magnetického pole v okolí cívky a v magnetu a určení ztrát v magnetech.

Po otevření nakresleného modelu v programu FEMM, se stiskem tlačítka Run mesh generator vykreslí trojúhelníková síť problému. Poté se stiskem Run Analysis spustí analýza problému a FEMM daný problém vyřeší a vypočítá všechny hodnoty. Nakonec se stiskem tlačítka View results přepne program FEMM do zobrazovacího okna, ve kterém se dají všechny získané výsledky zobrazit.

Zobrazení rozložení magnetického pole v okolí cívky se dá vykreslit stiskem tlačítka barevné škály. Otevře se dialogové okno, ve kterém se dá v položce Plotted Value vybrat, jaká veličina se bude zobrazovat. Pro zobrazení magnetické indukce se vybere možnost |FluxDensity|(T), pro zobrazení proudové hustoty se vybere možnost |CurrentDensity|(MA/m²). Dále se pro zobrazení barevné škály musí zatrhnout položka

Show Density Plot. Pomocí položek Lower Bound a Upper Bound se dají vybrat mezní hodnoty pro zobrazení barevné škály.

Pomocí tlačítka Contour Plot Options se dají kromě barevné škály vykreslit i siločáry magnetického pole.

4.3 Způsob určení ztrát v magnetu

Určení ztrát v magnetu se provádělo zvlášť pro každou vybranou harmonickou složku magnetického pole uvedených v tabulce (17).

Způsob určení ztrát v magnetu, které způsobuje 0,5 harmonická složka, která má frekvenci 350 Hz a amplitudu magnetické indukce 0,664621 T probíhá podle následujících kroků.

Nejprve se musí v režimu kreslení problému nastavit patřičná frekvence a také potřebná velikost proudu protékajícího solenoidem tak, aby velikost indukce magnetického pole generovaného solenoidem byla stejná s amplitudou harmonické složky. Vzhledem k tomu, že indukce solenoidu je přímo úměrná protékajícímu proudu a že solenoid byl navrhnut tak, aby jeho indukce byla 1 T při proudu 10 A, dá se požadovaná velikost indukce snadno nastavit.

Stiskem tlačítka Problem se otevře dialogové okno, ve kterém se v položce Frequency(Hz) zadá frekvence harmonické složky. Pro 0,5 harmonickou složku je to 350 Hz.

V dalším kroku se stiskne tlačítko Properties|Circuits a vybere se možnost Modify Property nad vybranou položkou Coil. V položce Circuit Current se nastaví požadovaný proud. Protože 0,5 harmonická má amplitudu 0,664621 T, zadá se velikost proudu jako 6,646 A. Tím pak solenoid vytvoří magnetické pole o indukci 0,6646 T.

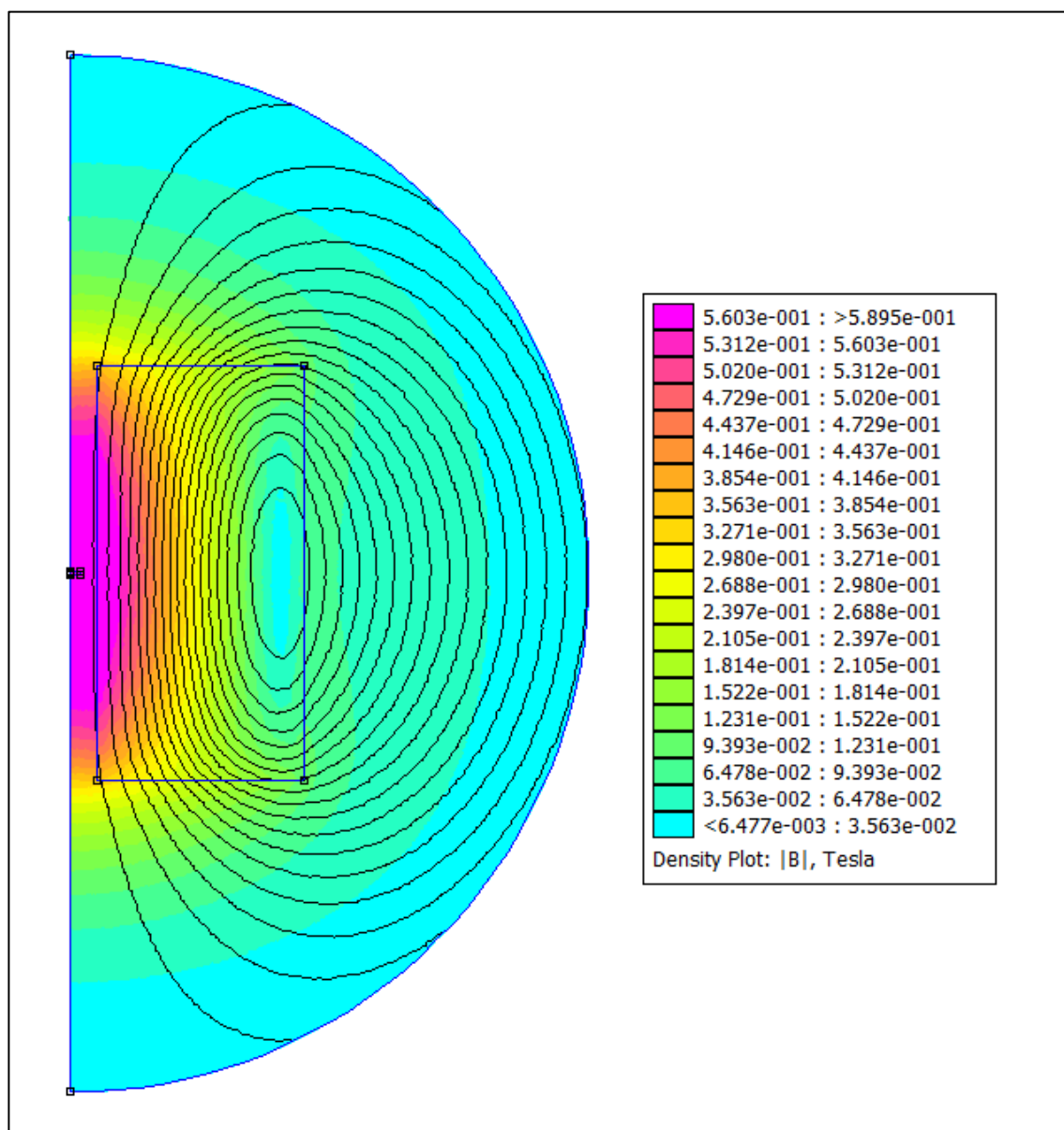
Po nastavení těchto parametrů se daný problém vyřeší a přepne se do zobrazovacího okna. Stiskne se tlačítko pro označování ploch a klikne se do prostoru magnetu. Celý obdélník magnetu se při vybrání označí zeleně. Poté se stiskne tlačítko objemových integrálů a v otevřeném dialogovém okně se vybere možnost Total Losses. Program FEMM pak provede výpočet ztrát a výsledek zobrazí v novém okně.

Stejným postupem se pak určí ztráty pro všechny ostatní vybrané harmonické složky, vždy se nejprve zadá požadovaná frekvence a proud a další postup už je shodný.

4.4 Výsledky z programu FEMM

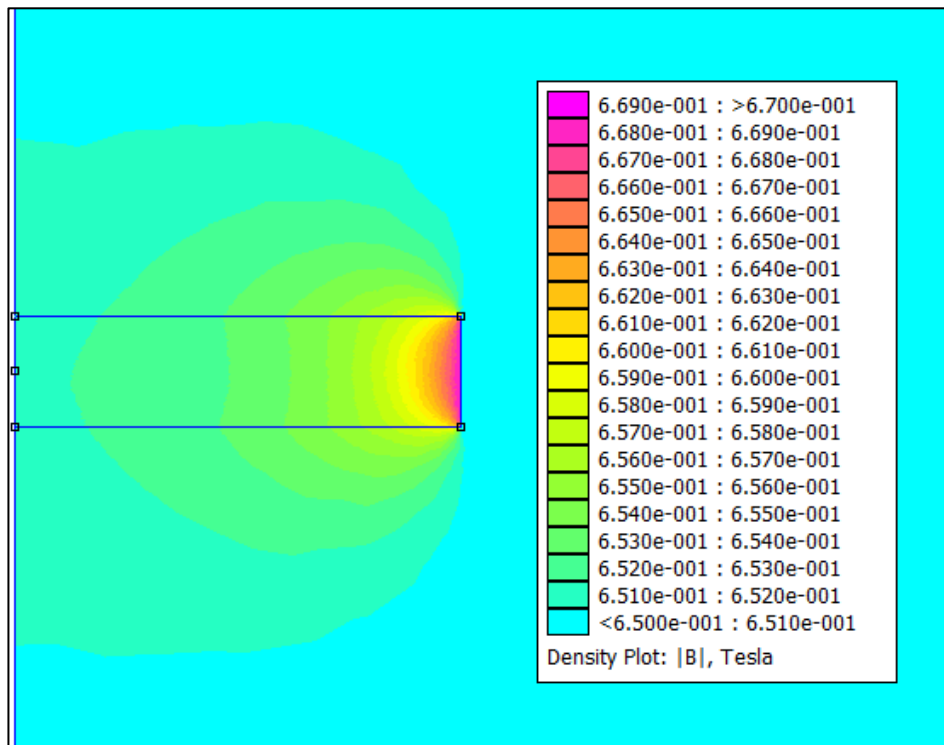
V této kapitole jsou uvedeny všechny získané výsledky po simulaci modelů v programu FEMM. Všechny obrázky rozložení magnetického pole a proudové hustoty v magnetech platí pro 0,5 harmonickou složku, která má frekvenci 350 Hz a amplitudu indukce 0,6646 T.

Na následujícím obrázku (17) je zobrazeno rozložení magnetické indukce v okolí solenoidu a magnetu pro 0,5 harmonickou složku.



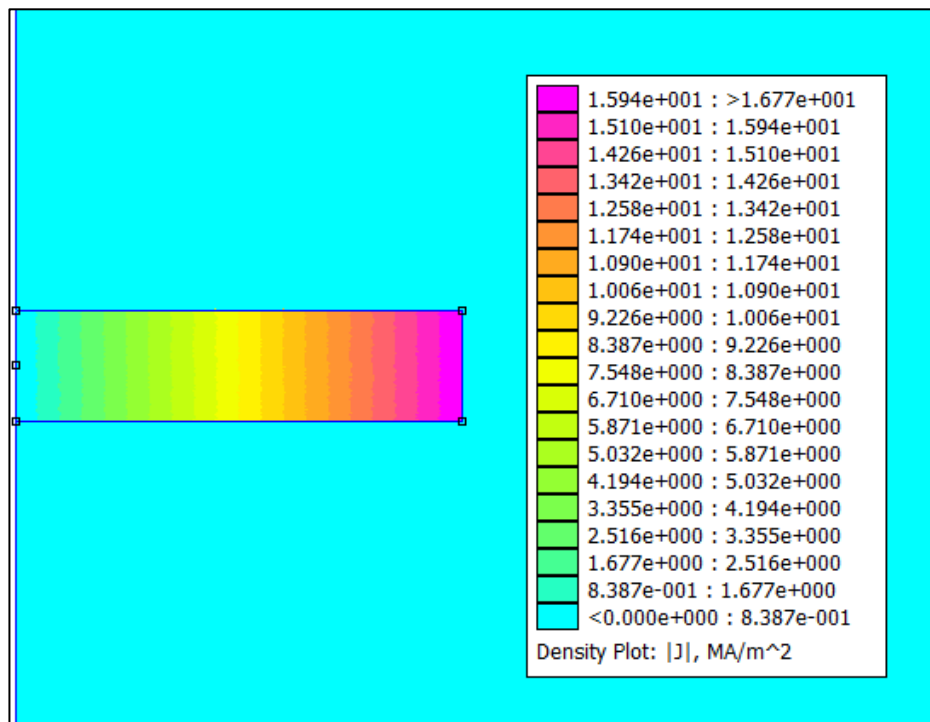
Obrázek 17 - Rozložení magnetické indukce v okolí solenoidu, 0,5 harmonická složka

4.4.1 Rozložení magnetického pole pro SmCo magnet



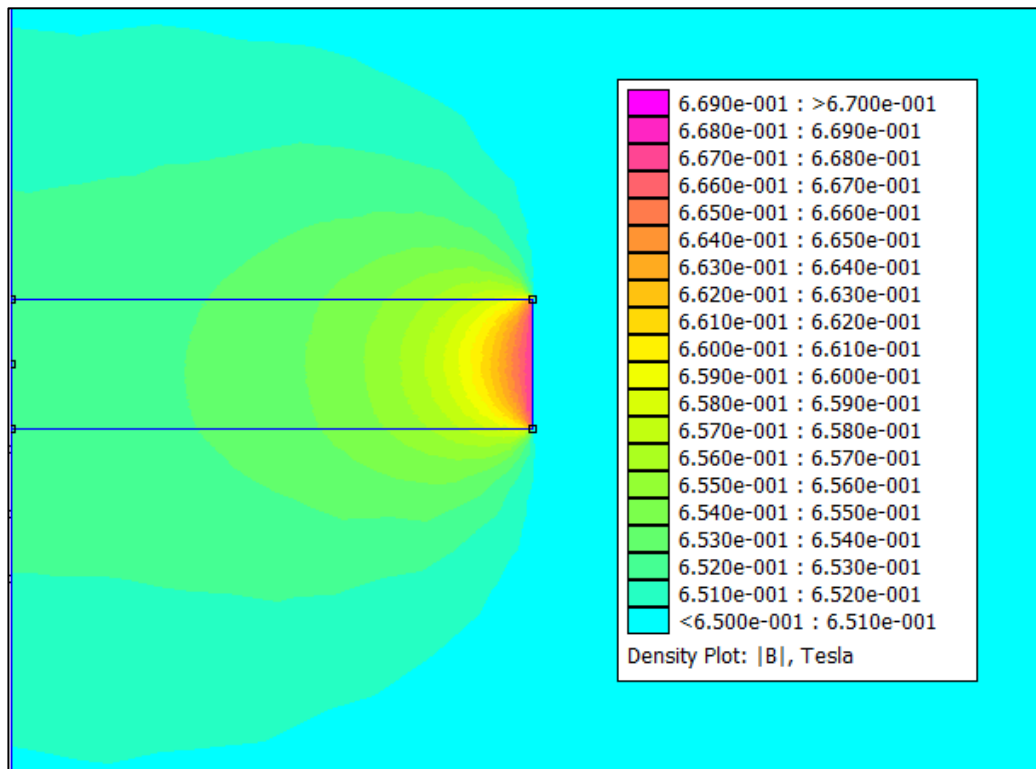
Obrázek 18 - Rozložení magnetické indukce v SmCo magnetu, 0,5 harmonická složka

4.4.2 Rozložení proudové hustoty pro SmCo magnet



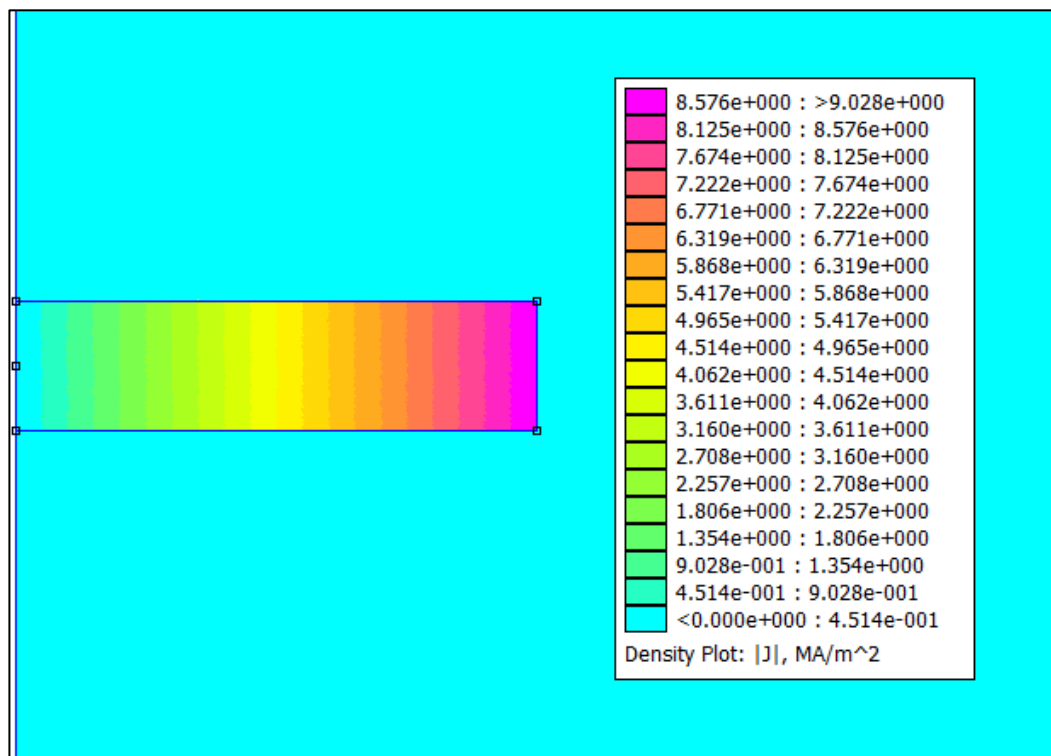
Obrázek 19 - Rozložení proudové hustoty v SmCo magnetu, 0,5 harmonická složka

4.4.3 Rozložení magnetického pole pro neodymový magnet



Obrázek 20 - Rozložení magnetické indukce v neodymovém magnetu, 0,5 harmonická složka

4.4.4 Rozložení proudové hustoty pro neodymový magnet



Obrázek 21 - Rozložení proudové hustoty v neodymovém magnetu, 0,5 harmonická složka

4.4.5 Velikost ztrát obou permanentních magnetů

V následující tabulce (18) jsou zobrazeny získané ztráty vypočítané programem FEMM pro oba modely permanentních magnetů. V tabulce jsou uvedeny ztráty, které způsobují jednotlivé harmonické složky a dále také celkové ztráty v magnetu a celkové ztráty přepočítané na jednotku objemu magnetu.

Tabulka 18 - Ztráty v permanentních magnetech

Číslo v-té harmonické [-]	Frekvence v-té harmonické vůči magnetu [Hz]	Amplituda indukce v-té harmonické [T]	Ztráty v SmCo magnetu [W]	Ztráty v NdFeB magnetu [W]
0,5	350	0,664621	377,491	203,34
1	0	0,464726	0	0
2	700	0,068318	15,8571	8,5793
2,5	1050	0,032243	7,8562	4,2814
3,5	1750	0,082211	138,121	76,9822
4	2100	0,058874	100,154	56,6541
5	2800	0,016318	13,01	7,624
5,5	3150	0,035713	76,8288	45,957
6,5	3850	0,026458	59,5164	37,2066
7	4200	0,010266	10,3554	6,6265
8	4900	0,018031	40,1698	26,9702
8,5	5250	0,020654	58,8327	40,4726
9,5	5950	0,005278	4,6024	3,3229
10	6300	0,004025	2,8314	2,0934
11	7000	0,013044	34,2525	26,5201
Celkové ztráty v magnetu [W]			939,8787	546,6303
Celkové ztráty na jednotku objemu [W/cm³]			149,5862	86,9988

Suma ztrát pro každý magnet je dána součtem ztrát všech harmonických složek. Z tabulky je patrné, že nejvýrazněji se na ztrátách podílí 0,5 harmonická složka, protože má největší amplitudu magnetické indukce. Dalšími výraznými složkami jsou 3,5 a 4 harmonická.

Objem modelu permanentního magnetu je $6,28319 \text{ cm}^3$, takže po vydělení celkových ztrát objemem byly získány celkové ztráty v magnetu přepočítané na jednotku objemu. Získaný výsledek ztrát po simulaci v programu FEMM tedy je:

- **SmCo magnet** $149,5862 \text{ W/cm}^3$
- **Neodymový magnet** $86,9988 \text{ W/cm}^3$

Díky větší rezistivitě neodymového magnetu a tedy i jeho menší elektrické vodivosti jsou jeho ztráty téměř poloviční oproti SmCo magnetu.

4.4.6 Velikost ztrát skutečného elektrického stroje

Elektrický stroj má následující parametry:

- 40 ks NdFeB permanentních magnetů
- Rozměr magnetu $5 \times 10 \times 30 \text{ mm}$
- Výkon stroje 15 kW

Velikost ztrát v NdFeB permanentních magnetech tohoto stroje je uvedena v následující tabulce.

Tabulka 19 - Velikost ztrát v magnetech skutečného stroje

Objem magnetu [cm^3]	Ztráty magnetu na jednotku objemu [W/cm^3]	Ztráty 1 ks magnetu [W]	Ztráty 40 ks magnetů [W]
1,5	86,9988	130,4982	5219,928

Z tabulky je patrné, že velikost ztrát v magnetech dosahuje hodnoty $5,22 \text{ kW}$, což je třetina výkonu motoru. Velikost ztrát v magnetech je tedy značná.

V praktické aplikaci je reálný permanentní magnet navíc ještě pokovený, a tudíž výsledné ztráty v něm budou nižší, než vychází podle tohoto výpočtu. Ovšem tenký kovový film na magnetu se pomocí programu FEMM prakticky nedá namodelovat. Navíc daná úloha by také měla být řešena jako plnohodnotné 3D, takže uvedené výsledky obsahují odchylky od skutečné hodnoty.

Závěr

V první části této diplomové práce bylo popsáno chování látek v magnetickém poli. Na základě jejich chování byly látky rozděleny na diamagnetické, paramagnetické a feromagnetické, přičemž větší pozornost byla věnována feromagnetickým materiálům, protože jsou klíčové pro tvorbu permanentních magnetů.

V další části byly popsány charakteristické parametry permanentních magnetů a také zde byl vytvořen stručný přehled dnes používaných materiálů pro jejich tvorbu. Čtyřmi základními skupinami jsou feritové, alnico, samarium kobaltové a neodymové magnety. Nejlepší magnetické vlastnosti mají magnety na bázi vzácných zemin, tedy SmCo a neodymové magnety. Oproti ostatním skupinám mají výrazně vyšší hodnoty koercitivní intenzity a magnetické remanence. Nevýhodou však bývá větší cena a větší náchylnost k teplotním vlivům. Pro použití v elektrických strojích a pro provedení simulace byly vybrány dvě skupiny permanentních magnetů - SmCo a neodymové magnety.

Následujícím úkolem pak byla tvorba modelů SmCo a neodymového magnetu metodou konečných prvků v prostředí programu FEMM. Program FEMM byl vybrán, protože se jedná o volně dostupný nástroj pro řešení magnetických úloh. Dalším úkolem byl také návrh a tvorba modelu solenoidu, který byl využit pro simulaci zatížení modelů permanentních magnetů reálným magnetickým polem. Navrhnutý solenoid je schopen vytvořit magnetické pole o indukci až 1 T, přičemž jím protéká proud o velikosti 10 A. Magnetické pole, získané ze statoru točivého stroje s permanentními magnety, bylo převedeno na spektrum rychlou Fourierovou transformací a pro simulaci zatížení byly vybrány nejvýraznější harmonické složky magnetického pole.

Hlavním úkolem diplomové práce bylo určení ztrát v modelech vybraných permanentních magnetů, při jejich zatížení reálným magnetickým polem pomocí zvoleného programu FEMM.

Získané ztráty byly z hlediska vzájemného porovnání převedeny na jednotku objemu magnetu. Ztráty v SmCo magnetu vyšly $149,6 \text{ W/cm}^3$, tedy téměř dvojnásobné oproti stejně velkému neodymovému magnetu, jehož ztráty měly hodnotu 87 W/cm^3 . Rozdíl ve ztrátách je způsoben především rozdílnou elektrickou vodivostí obou materiálů. Typická elektrická vodivost SmCo magnetu je totiž téměř dvojnásobná oproti neodymovému magnetu.

Z hlediska velikosti ztrát v magnetech je tedy podstatně výhodnější použití NdFeB magnetů.

V případě skutečného elektrického stroje, který by obsahoval 40 ks NdFeB permanentních magnetů o rozměrech 5x10x30 mm a jehož výkon je 15 kW, by se velikost ztrát pohybovala v hodnotě 5,22 kW, což je třetina výkonu daného motoru. Ve skutečnosti by ztráty byly nižší, protože reálný magnet je navíc ještě pokovený. To se v případě simulace v této práci neuvažovalo, protože namodelovat tenký kovový film v programu FEMM prakticky nelze.

Díky poměrně vysoké konduktivitě magnetů ze vzácných zemin, tak mohou být ztráty v magnetech vlivem vířivých proudů poměrně značné. Tyto ztráty mohou způsobit značný nárůst teploty, která má na magnety nepříznivý vliv. Může dojít až k částečné nevratné demagnetizaci permanentního magnetu.

Použitá literatura

- [1] SINOMAG, s.r.o. *Permanentní magnety: Co je třeba vědět o permanentních magnetech* [online]. [cit. 2012-11-03]. Dostupné z: http://www.sinomag.cz/sinomag.cz/data/sinomag/downloads/Permanentni_magnety.pdf
- [2] Standard specifications for permanent magnet materials. In: *MMPA STANDARD No. 0100-00* [online]. Chicago: Magnetic materials producers association [cit. 2012-11-03]. Dostupné z: http://www.duramag.com/pdfs/MMPA_0100-00.pdf
- [3] Permanent Magnet Materials. *MASTER MAGNETICS, INC.: The magnet source* [online]. © 1998-2012 [cit. 2012-11-03]. Dostupné z: http://www.magnetsource.com/Solutions_Pages/pmm.html
- [4] Permanent Magnet Products. *Stanford Magnets* [online]. © 1980-2012 [cit. 2012-11-03]. Dostupné z: <http://www.stanfordmagnets.com/magnet.html>
- [5] MAGCRAFT ®. *Permanent Magnet Selection and Design Handbook* [online]. Vienna (Virginia), 2007 [cit. 2012-11-03]. Dostupné z: <http://www.rare-earth-magnets.com/Permanent-Magnet-Selection-and-Design-Handbook.pdf>
- [6] SELOS ®. *Magnetické materiály* [online]. 2007 [cit. 2012-11-03]. Dostupné z: http://www.selos.cz/files/docs/magnety_download/dokument_23.pdf
- [7] Magnets. *MAGNETS UK* [online]. [cit. 2012-11-03]. Dostupné z: <http://e-magnetsuk.com/magnets/>
- [8] Magnet materials. *Dura Magnetics, Inc.* [online]. © 2011 [cit. 2012-11-03]. Dostupné z: <http://www.duramag.com/magnet-materials.html>
- [9] Sortiment. *Enes* [online]. © 2005 [cit. 2012-11-17]. Dostupné z: <http://www.magnety-magnety.com/>
- [10] Magnet minute. *MAGNET LAB* [online]. © 1995–2013 [cit. 2013-03-08]. Dostupné z: <http://www.magnet.fsu.edu/education/tutorials/magnetminute/permanent.html>
- [11] TUČEK, Jiří. Úvod do magnetismu, magnetické vlastnosti materiálů a magnetické jevy v nanosvětě. [online]. [cit. 2013-03-08]. Dostupné z: <http://nanosystemy.upol.cz/upload/10/tucek-uvod.pdf>
- [12] Magnetické pole v látce, Maxwellovy rovnice. [online]. [cit. 2013-03-08]. Dostupné z: http://fyzika.feec.vutbr.cz/~petsad/download/prednasky/22_magnetismus.pdf
- [13] VYBÍRAL, Bohumil. Magnetické pole v látce. [online]. [cit. 2013-03-08]. Dostupné z: <http://fyzikalniolympiada.cz/texty/magvll.pdf>
- [14] HARRIS, I.R. a A.J. WILLIAMS. Magnetické materiály. [online]. [cit. 2013-03-08]. Dostupné z: <http://www.eolss.net/Sample-Chapters/C05/E6-36-02-01.pdf>
- [15] REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. Magnetické vlastnosti látek. *Encyklopedie fyziky* [online]. © 2006 - 2013 [cit. 2013-03-08]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/295-magneticke-vlastnosti-latek>
- [16] ŽELEZNÝ, Pavel. Látky v magnetickém poli. [online]. [cit. 2013-03-10]. Dostupné z: <http://82.114.195.35:90/Vyuka/%C5%BD%20Pavel/Fyzika/3Rocnik/Elektrina%20a%20magnetismus/14-Stationarni%20magneticke%20pole/11-Latky%20v%20magnetickem%20poli.pdf>
- [17] Měření měrných ztrát feromagnetických materiálů. *HellWEB* [online]. © 2003 [cit. 2013-03-10]. Dostupné z: <http://hellweb.loose.cz/index.php?page=school&subpage=elm&id=15>
- [18] Magnetické vlastnosti. *Optika-obrazové přílohy* [online]. [cit. 2013-03-13]. Dostupné z: http://www.sci.muni.cz/mineralogie/kap_4_8_magnet/obrazek48_1.htm

- [19] Základní pojmy magnetismu. *SELOS* [online]. © 2013 [cit. 2013-03-13]. Dostupné z: <http://www.magnety.sk/cz/poradna/2983/>
- [20] Magnetismus: Základní pojmy. *ELIDIS s.r.o.* [online]. © 2012 [cit. 2013-03-15]. Dostupné z: <http://www.elidis.cz/33-trvale-magnety.html>
- [21] Pojmy v magnetismu: Základní pojmy. *ABC Magnet* [online]. © 2012 [cit. 2013-03-15]. Dostupné z: <http://www.abcmagnet.cz/pojmy-v-magnetismu.php>
- [22] Rare Earth Magnet Basics. *Shin-Etsu Rare Earth Magnets* [online]. © 2007 [cit. 2013-03-15]. Dostupné z: <http://www.shinetsu-rare-earth-magnet.jp/e/design/index.html>
- [23] MAGNET DESIGN DATA. [online]. [cit. 2013-03-15]. Dostupné z: http://www.tdk.co.jp/magnet_e/e371.pdf
- [24] Ferrite Magnet. *SsangYong Materials* [online]. © 2012 [cit. 2013-03-19]. Dostupné z: http://www.ssym.com/Site/Product/Ferrite_TechInfo.asp?strCode=5
- [25] Magnet guide & tutorial. *Alliance LLC* [online]. © 2009 [cit. 2013-03-19]. Dostupné z: http://www.allianceorg.com/pdfs/Magnet_Tutorial_v85_1.pdf
- [26] Magnet Materials Properties. MAGNET SALES & MANUFACTURING COMPANY, Inc. *Magnet Sales* [online]. © 2000 [cit. 2013-03-23]. Dostupné z: <http://www.magnetsales.com/Design/Matlprop.htm>
- [27] Axial field of a finite solenoid. DENNISON, Eric. *MAGNET FORMULAS* [online]. © 2005 [cit. 2013-03-24]. Dostupné z: <http://www.netdenizen.com/emagnet/solenoids/solenoidonaxis.htm>
- [28] MEEKER, David. *Finite Element Method Magnetics: HomePage* [online]. 24.06.2011 [cit. 2013-03-24]. Dostupné z: <http://www.femm.info/wiki/HomePage>
- [29] Relativní permeabilita. BUREŠ, Jiří. *ConVERTER* [online]. © 2002 [cit. 2013-03-30]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/tabulky/relativni-permeabilita.htm>
- [30] Magnetizace (veličina). In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2013-03-31]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Magnetizace_%28veli%C4%8Dina%29
- [31] Magnetická susceptibilita. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2013-03-31]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Magnetick%C3%A1_susceptibilita
- [32] Magnetostriction and Magnetostrictive Materials. *Active Materials Laboratory* [online]. © 2013 [cit. 2013-04-17]. Dostupné z: <http://aml.seas.ucla.edu/research/areas/magnetostrictive/mag-composites/Magnetostriction%20and%20Magnetostrictive%20Materials.htm>

Přílohy

Příloha A – Tvorba modelu solenoidu v programu FEMM

Po spuštění programu FEMM se v hlavním menu nejprve vybere možnost File|New|Magnetics problem a následně se otevře nové prázdné okno, ve kterém se může začít tvořit geometrie problému.

Nastavení definice problému

Ještě než se začne kreslit samotná geometrie, nejprve je potřeba nastavit definici řešeného problému. Po stisknutí tlačítka Problem se zobrazí dialogové okno, ve kterém se nastaví položka Problem Type na Axisymmetric. Tím se nastaví, že geometrie problému se bude kreslit v osově symetrických souřadnicích. Položka Length type se přepne na Centimeters, aby se rozměry daly zadávat v centimetrech.

Kresba hranic

Nejprve se nakreslí hranice, které nám vymezi oblast, ve které bude program FEMM počítat řešení problému. V našem případě se bude kreslit koule, která bude mít poloměr 100 cm. Nejprve se stiskne tlačítka Operate on nodes a ve vzdálenostech 100 cm od středu se na ose vytvoří 2 body.

Poté se stiskem tlačítka Operate on segments přepne na kreslení čar a propojí se oba nakreslené body.

Nakonec se stiskem tlačítka Operate on arc segments přepne na kreslení oblouků a nakreslí se polovina kružnice, která začíná a končí v již nakreslených bodech.

Kresba solenoidu

Poté, co byly nakresleny hranice problému, nakreslí se již samotný solenoid. Solenoid se nakreslí v osově symetrických souřadnicích, což znamená, že ve vzdálenosti 5 cm od osy se nakreslí obdélník, který bude představovat průřez solenoidem. Rotací tohoto obdélníku okolo osy pak vzniká celý solenoid.

Nejprve se nakreslí 4 body v patřičných vzdálenostech a následně se propojí, čímž se vytvoří celý obdélník. První dva body jsou vzdálené 5 cm od osy a druhé dva jsou vzdálené 45 cm. Nakreslený obdélník má výšku 80 cm a šířku 40 cm.

Definice materiálů

Dalším krokem po nakreslení celé geometrie problému je nastavení typu materiálu daných oblastí.

Nejprve se stiskne tlačítko *Operate on block labels* a uvnitř nakresleného obdélníku se vytvoří jeden definiční bod a poté se vytvoří jeden ve vzduchu mimo obdélník. Program FEMM využívá těchto definičních bodů pro nastavení materiálových a jiných parametrů pro celou ohraničenou oblast, ve které se bod vyskytuje.

Nyní se stiskne tlačítko *Properties|Materials Library* a ze seznamu materiálů po levé straně se myší přesune *Air* na pravou stranu. Dále se přesune ze složky *Copper Metric Magnet Wire* položka *2mm*.

V dalším kroku se stiskne tlačítko *Properties|Circuits* a vybere se možnost *Add Property*. V otevřeném okně se do položky *Name* napíše požadované jméno (například *Coil*) a v položce *Circuit Current* se nastaví požadovaný proud, v našem případě *10 A*.

Nyní už jen stačí přiřadit nastavené materiály k nakresleným definičním bodům. Pravým kliknutím na definiční bod umístěný mimo obdélník a následným stisknutím mezerníku se otevře dialogové okno, ve kterém se vybere ze seznamu *Block Type* položka *Air*. Zruší se zatržení *Let Triangle choose Mesh Size* a do položky *Mesh size* zapíšeme číslo *1*. Tímto se ručně nastavuje hustota sítě, kterou následně program FEMM vytváří pro řešení problému. Čím hustší síť je, tím se vypočítá přesnější řešení.

Stejný postup se opakuje i pro definiční bod umístěný uvnitř obdélníku, ale ze seznamu *Block Type* se vybere položka *2mm*. *Mesh size* se nastaví na hodnotu *2* a dále se ze seznamu *In Circuit* vybere námi již vytvořená položka *Coil*. Poté se aktivuje položka *Number of Turns* do které se zapíše požadovaný počet závitů solenoidu, v našem případě *75580*.

Nastavení okrajových podmínek

Pro nastavení okrajové podmínky problému se stiskne tlačítko *Properties|Boundary* v hlavním menu a v otevřeném dialogovém okně se vybere možnost *Add Property*. V položce *Name* se zadá jméno okrajové podmínky a v položce *BC Type* se ze seznamu vybere možnost *Mixed*. Takto vytvořená podmínka bude tzv. asymptotická okrajová podmínka, která aproximuje impedanci neohrazeného otevřeného prostoru. Díky tomu se dá modelovat tok, který solenoid vytváří v neohrazeném prostoru, i když se modeluje pouze malá ohraničená oblast.

Po té, co se zvolí možnost Mixed, se musí zadat dva koeficienty v nyní přístupných položkách c0 coefficient a c1 coefficient. Koeficient c1 se volí nulový a koeficient c0 se volí 7957747.15482.

Jakmile je podmínka vytvořená, přepne se tlačítkem Operate on arc segments na kreslení oblouků a pravým tlačítkem myši se označí nakreslený oblouk. Následným stiskem mezerníku se otevře dialogové okno, ve kterém se u položky Boundary cond vybere naše vytvořená podmínka. Okrajová podmínka pro osu se nemusí zadávat, protože ji program FEMM v případě osově symetrického problému automaticky sám doplní. Tímto je celý model solenoidu připravený k simulaci.

Příloha B – Tvorba modelu permanentního magnetu v programu FEMM

Kresba modelu permanentního magnetu v programu FEMM probíhá stejným způsobem jako v případě kresby solenoidu. Opět se nejprve nakreslí 4 body, které se následně propojí, až se nakreslí celý obdélník permanentního magnetu. Rozměry modelu magnetu byly stanoveny tak, že délka činí 2 cm a výška 0,5 cm.

Definice materiálů

Definice materiálu permanentního magnetu opět probíhá podobným způsobem jako v případě solenoidu v kapitole 3.3.4. Nejprve se stiskne tlačítko Operate on block labels a uvnitř nakresleného obdélníku permanentního magnetu se vytvoří definiční bod.

V dalším kroku se stiskne tlačítko Properties|Materials|Add Property a otevře se dialogové okno, ve kterém se zadají parametry zvoleného permanentního magnetu. Nejprve se vytvoří SmCo magnet, a proto se do položky Name zadá název SmCo. V položce B-H Curve se vybere Linear B-H Relationship a u položky Relative μ_r se zadá 1,05. Poslední dva parametry, které se musí zadat, jsou koercitivní intenzita magnetu a jeho elektrická vodivost.

V položce Coercivity se tedy zadá hodnota koercitivní intenzity (685000 pro SmCo magnet) a v položce Electrical Conductivity se zadá hodnota elektrické vodivosti materiálu (1,162 pro SmCo magnet). Tím je definice materiálových parametrů pro SmCo magnet hotová a stejným způsobem se vytvoří i definice neodymového magnetu.

Nyní už jen opět stačí přiřadit nastavené materiály k nakreslenému definičnímu bodu uvnitř magnetu. Pravým kliknutím na definiční bod umístěný uvnitř obdélníku a následným stisknutím mezerníku se otevře dialogové okno, ve kterém se vybere ze seznamu typ magnetu, který se bude simulovat.