

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Permanentní magnety ze vzácných zemin

vedoucí práce: Ing. Karel Hruška, Ph.D.

autor práce: Jan Toufar

2013

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2012/2013

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

Jméno a příjmení: **Jan TOUFAR**
Osobní číslo: **E10B0261P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Název tématu: **Permanentní magnety ze vzácných zemin**
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Zásady pro vypracování:

1. Vytvořte přehled permanentních magnetů ze vzácných zemin.
2. Popište chování permanentních magnetů z hlediska návrhu magnetického obvodu.
3. Popište tepelné závislosti permanentních magnetů v magnetickém obvodu.
4. Vytvořte srovnávací modely metodou konečných prvků pro analýzu tepelných vlastností permanentních magnetů.



Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

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

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

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2012**

Termín odevzdání bakalářské práce: **7. června 2013**


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




Prof. Ing. Václav Kás, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni. Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce. Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

V Plzni dne 6.6. 2013

Jan Toufar

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce, Ing. Karlu Hruškovi, za odborné vedení bakalářské práce, cenné připomínky a trpělivost před termínem odevzdání.

Anotace

Tato bakalářská práce má za úkol objasnit použití permanentních magnetů ze vzácných zemin v magnetickém obvodu s ohledem na jejich chování a to zejména na jejich tepelnou závislost. První kapitola seznamuje se základními vlastnostmi těchto magnetů, které přiblíží důvod k jejich používání. Dále jsou uvedeny možnosti aplikace v elektrických strojích, což je demonstrováno na jednoduchém magnetickém obvodu. V závěru se práce zabývá jejich teplotní závislostí i za pomoci použití MKP.

Klíčová slova

Permanentní magnet, vzácné zeminy, samarium, neodym, magnetický obvod, elektrický stroj, teplotní závislost, FEMM.

Annotation

The main task of this bachelor thesis is to clarify usage of the rare earth permanent magnets in the magnetic circuit in reference to their behaviour and especially on temperature dependence. First chapter acquaints with basic properties of these magnets which approach the reason for their usage. The possibilities of application in the electric machines are stated next which is demonstrated on a simple magnetic circuit. At the end the work deals with their temperature dependence using FEA method.

Key words

Permanent magnet, rare earth, samarium, neodymium, magnetic circuit, electric machine, temperature dependence, FEMM

Obsah

Seznam symbolů, zkratk a obrázků	10
Úvod	13
1. Základní přehled permanentních magnetů ze vzácných zemin	14
1.1. Těžba a výskyt vzácných zemin	14
1.1.1. Minerály	14
1.2. Výroba, separace prvků a nečistot	15
1.2.1. Oddělení vzácných zemin z minerálu	15
1.2.2. Získání čistého prvku	15
1.2.3. Prášková metalurgie	16
1.2.4. Ostatní způsoby výroby	16
1.3. Permanentní magnety vzácných zemin	17
1.3.1. Obecné vlastnosti	17
1.3.2. Porovnání s PM bez vzácných zemin	17
1.3.3. Neodymové PM	18
1.3.3.1. Struktura	18
1.3.3.2. Vlastnosti NdFeb PM	18
1.3.4. Samariové PM	19
1.3.4.1. SmCo_5	19
1.3.4.2. $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$	19
1.4. Povrchová úprava	20
1.4.1. Důvody pro povrchovou úpravu	20
1.4.2. Možnosti povrchové úpravy	21
2. Chování permanentních magnetů při návrhu magnetického obvodu	22
2.1. Výroba magnetického obvodu z permanentních magnetů	22
2.2. Hysterezní smyčka permanentních magnetů	22
2.3. Chování obvodu při mezních hodnotách permeability	23
2.4. Vliv anisotropie permanentního magnetu na obvod	24
2.4.1. Anizotropie	24
2.5. Hustota energie permanentního magnetu	25
2.6. Model magnetického obvodu s permanentním magnetem	25
2.6.1. Stanovení koeficientu permeability	26
2.6.2. Magnetický obvod	26

3. Permanentní magnety v elektrických strojích	28
3.1. Komutátorové stejnosměrné motory s PM	29
3.1.1. Konstrukční provedení	30
3.1.1.1. Konvenční drážkové provedení motorů	30
3.1.1.2. Motory s bezdrážkovými rotory	30
3.1.1.3. Válcové motory	31
3.1.1.4. Diskové motory	31
3.2. Bezkartáčové motory s permanentními magnety	32
3.2.1. Konstrukční provedení	32
3.2.1.1. Stavba rotoru	32
3.2.1.2. Stavba statoru	34
3.3. Krokové motory s PM	35
4. Teplotní závislost permanentních magnetů v magnetickém obvodu	36
4.1. Stanovení teplotního koeficientu	36
4.2. Charakteristiky teplotních koeficientů základních parametrů PM	37
4.3. Způsob zlepšení tepelné závislosti teplotního koeficientu	38
4.4. Teplotní závislost rezistivity PM ze vzácných zemin	39
4.5. Demagnetizace zapříčiněná vlivem teploty	41
4.6. Řešení magnetického obvodu pomocí MKP	41
4.6.1. Model teplotní závislosti SmCo Vacomax 240 HR	43
4.6.2. Model teplotní závislosti SmCo Vacomax 200 HR	45
4.6.3. Model teplotní závislosti NdFeB Vacodym 633 HR	47
4.6.4. Grafické porovnání modelovaných PM	49
Závěr	50
Použitá literatura	51

Seznam použitých symbolů

B	[T]	magnetická indukce
B_r	[T]	remanentní indukce
B_δ	[T]	magnetická indukce ve vzduchové mezeře
H	[A/m]	intenzita magnetického pole
H_c	[A/m]	koercivita
H_{ic}	[A/m]	vnitřní koercivita
α_{Br}	[%/°C]	teplotní koeficient remanentní indukce
α_{iHc}	[%/°C]	teplotní koeficient vnitřní koercivity
$\alpha_{BH_{max}}$	[%/°C]	teplotní koeficient max. energetického součinu
BH_{max}	[J/m ³]	maximální energetický součin
Φ	[Wb]	magnetický tok
Φ_g	[Wb]	magnetický tok ve vzduchové mezeře
C_ϕ	[-]	koncentrační faktor magnetického toku
μ_r	[-]	relativní permeabilita
μ_0	[-]	permeabilita vakua
U_m	[A]	magnetické napětí
ρ_m	[$\Omega \cdot m$]	rezistivita magnetu
$I_{vířivý}$	[A]	vířivé proudy
P_v	[W]	ztráty vířivými proudy
R_{mg}	[1/H]	reluktance
Λ_{mg}	[H]	permeance
T_c	[°C]	Curieho teplota
T_{max}	[°C]	maximální pracovní teplota
ϑ_m	[°C]	teplota magnetu
J	[kg·m ²]	moment setrvačnosti
P_c	[-]	koeficient permeance
S_m	[m ²]	plocha magnetu
S_g	[m ²]	plocha vzduchové mezery
l_m	[m]	délka magnetu
g	[m]	délka vzduchové mezery
V_m	[m ³]	objem magnetu
V_g	[m ³]	objem vzduchové mezery

Akronymy

PM	permanentní magnet
NdFeB	neodym – železo – bor (anglická zkratka NIB)
SmCo	samarium – kobalt
AlNiCo	hliník – nikl – kobalt
SRM	spínané reluktanční motory
IEC	mezinárodní elektrotechnická komise
MKP	metoda konečných prvků
Tb	terbium
Dy	dysprosium
Ho	holmium
Er	erbium
Tm	thulium
Yb	ytterbium
Lu	lutecium
Gd	gadolinium

Seznam obrázků

- Obr. 1.1 Technologie výroby PM ze vzácných zemin.
- Obr. 1.2 Krystalická mikrostruktura NdFeB.
- Obr. 1.3 Krystalická mikrostruktura SmCo₅.
- Obr. 1.4 Krystalická mikrostruktura Sm₂Co₁₇.
- Obr. 1.5 Pokles hmotnosti PM v závislosti na čase.
- Obr. 2.1 Hysterezní smyčka PM.
- Obr. 2.2 Operační bod v hysterezní smyčce.
- Obr. 2.3 Graf pro určení koeficientu permeance PM.
- Obr. 2.4 Magnetický obvod.
- Obr. 2.5 Elementární magnetický obvod.
- Obr. 3.1 Porovnání rozměrů motoru s elektromagnety a PM.
- Obr. 3.2 Aplikace PM ze vzácných zemin.
- Obr. 3.2 Momentová charakteristika stejnosměrného motoru s PM.
- Obr. 3.3 Drážkový rotor.
- Obr. 3.4 Bezdrážkový „hladký“ rotor.

- Obr. 3.5 Varianta rotoru 1.
- Obr. 3.6 Varianta rotoru 2.
- Obr. 3.7 Varianta rotoru 3.
- Obr. 3.8 Varianta rotoru 4.
- Obr. 4.1 Poloha demagnetizační křivky při změně teploty.
- Obr. 4.2 Závislost teplotního koeficientu na teplotě PM.
- Obr. 4.3 Závislost teplotního koeficientu koercivity na teplotě PM.
- Obr. 4.4 Závislost teplotního koeficientu maximálního energetického součinu na teplotě PM.
- Obr. 4.5 Závislost teplotního koeficientu na teplotě, při změně směsi PM.
- Obr. 4.6 Koloběh tepla z vířivých proudů.
- Obr. 4.7 Závislost rezistivity na teplotě při axiálním magnetování.
- Obr. 4.8 Zobrazení demagnetizace PM.
- Obr. 4.9 Výkres magnetického obvodu.
- Obr. 4.10 Rozložení magnetické indukce magnetu Vacomax 240 HR při 20 °C.
- Obr. 4.11 Rozložení magnetické indukce magnetu Vacomax 240 HR při 150 °C.
- Obr. 4.12 Magnetická indukce na úsečce \underline{x} ve vzduchové mezeře magnetu Vacomax 240 HR.
- Obr. 4.13 Rozložení magnetické indukce magnetu Vacomax 200 HR při 20 °C.
- Obr. 4.14 Rozložení magnetické indukce magnetu Vacomax 200 HR při 150 °C.
- Obr. 4.15 Magnetická indukce na úsečce \underline{x} ve vzduchové mezeře magnetu Vacomax 200 HR.
- Obr. 4.16 Rozložení magnetické indukce magnetu Vacodym 633 HR při 20 °C.
- Obr. 4.17 Rozložení magnetické indukce magnetu Vacodym 633 HR při 110 °C.
- Obr. 4.18 Magnetická indukce na úsečce \underline{x} ve vzduchové mezeře magnetu Vacodym 633 HR.
- Obr. 4.19 Porovnání teplotních závislostí magnetické indukce samotných PM.
- Obr. 4.20 Porovnání teplotních závislostí vnitřní koercivity samotných PM.
- Obr. 4.21 Porovnání magnetických indukcí v bodě \underline{A} vzduchové mezery obvodu.

Úvod

Bakalářskou práci na téma permanentní magnety ze vzácných zemin jsem si vybral z důvodu vize velkého využití v budoucnu. Již v dnešní době je využití poměrně veliké, což se snažím dokázat v této práci, kde zmiňuji možné obvody a aplikace pro jejich využití. Avšak existuje ještě spousta pasáží, ve kterých se jejich schopností může více využít. Jelikož nic na světě není dokonalé, tak i tyto permanentní magnety se dají neustále vylepšovat hledáním nových slitin a chemických variací, které by přispěli ke zlepšení magnetických parametrů.

V dnešní době se aktuality o tomto tématu řeší hlavně kvůli těžbě vzácných zemin. Země, které mají přístup k těmto nerostům, mohou mít zároveň značný pokrok v řešení jejich problematiky a tím i ve zdokonalení a následném použití v průmyslu. Další řešenou otázkou v používání těchto permanentních magnetů jsou závislosti na okolním prostředí. Prvním takovým problémem je nestálost neodymových magnetů ve vlhkém a teplém prostředí. Tento jev je řešen vrstvením ochranných prostředků na tyto citlivé materiály i za cenu zhoršení jiných vlastností. Druhá potíž je teplotní závislost, která omezuje prostor většího využití. Na takové chování žádné ochranné vrstvy neexistují. Řešení změnou chemického složení je nepatrné a v praxi kvůli zhoršení magnetických parametrů téměř nepoužívané. Ovlivnění průběhu ohřevu zlepšováním ventilace je v dnešní době více využíváno. V popředí je možnost návrhu stroje, kde by nedocházelo k ohřívání na kritickou hodnotu teploty. K tomu slouží spousta výpočetních softwarů na základě metody konečných prvků.

Výše uvedená teplotní závislost a její dopad na permanentní magnet je cílem této bakalářské práce i za pomoci metody konečných prvků v programu FEMM. Výpočet teplotní závislosti je demonstrován na jednoduchém magnetickém obvodu s měřenými magnetickými parametry uvnitř vzduchové mezery, která má představovat zjednodušenou vzduchovou mezeru mezi statorem a rotorem elektrického motoru.

1. Základní přehled permanentních magnetů ze vzácných zemin

Vzácné zeminy, tzv. lanthanoidy tvoří patnáct chemických prvků, řadících se mezi kovy, které jsou svými fyzikálními vlastnostmi a chemickým chováním, sobě velmi blízké. Chemická reaktivita lanthanoidů postupně klesá se zvyšujícím se atomovým číslem, některé jsou na vzduchu stálé a část se pokrývá vrstvou oxidů a hydroxidů. Využití lanthanoidů, kromě dvou níže uvedených, samaria a neodymu, je ve velké škále průmyslu. Výroba televizních CRT obrazovek, funkce LED - diod za použití europia, terbia a yttria v luminoforech. Jsou důležitými prvky pro výrobu materiálů laseru. V jaderné energetice pro výrobu moderátorových tyčí k regulaci jaderných reaktorů, dále ve sklářském průmyslu a v petrochemii. V metalurgii pomáhají k odkysličování roztavených kovů, díky své vysoké afinitě, což má za následek zlepšení mechanických vlastností konstrukčních prvků. [3]

1.1. Těžba a výskyt

Využití kovů vzácných zemin v poslední době exponenciálně narostlo a stále roste, neboť „*technika jde vpřed*“ a to zejména v elektronice, kde je nezbytné využití těchto nerostů. Stoupá-li poptávka po těchto zařízeních, musí stoupat i dodávka, kterou v dnešní době obstarává z 97 % Čína. Světové zásoby činí okolo 110 milionů tun směsných oxidů vzácných zemin a roční spotřeba se pohybuje okolo 130 000 tun. Mezi další vývozce patří USA, Skandinávské země, Indie, Austrálie a JAR. [8]

Výskyt je sice vzácný, ale hojnější oproti prvkům jako je zlato, stříbro nebo uran, neodym dokonce více než olovo. Pod slovem vzácný je spíše ukryta ekonomická využitelnost ložisek, díky nízké koncentraci v nalezištích a nepříznivým dopadům, jejich těžby a následné úpravy na okolní životní prostředí. [3]

1.1.1. Minerály

Veškeré lanthanoidy se vyskytují pouze ve formě sloučenin, jedná se o směsné minerály, které obsahují více prvků této skupiny. Takových minerálů je známo více než sto, ale průmyslový význam mají pouze dva: monazit a bastnezit. Hlavní část v minerálech tvoří prvky cer, lanthan, praseodym a neodym, zpracování monazitu vyžaduje určitá bezpečnostní opatření oproti bastnezitu, neboť ruda je kontaminovaná a od silně radioaktivního radia. Neodym je jeden z mála lanthanoidů, který vytváří vlastní minerály: wakefieldit NdVO_4 , churchit $\text{Nd}(\text{PO}_4) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ aj.

Největší obsah neodymu má minerál hydroxylní karbonát $\text{Nd}(\text{CO}_3)(\text{OH})$ a to až 65% Nd. U samaria nejsou známe případy samostatných minerálů, kromě monazitu SmPO_4 . [3]

1.2. Výroba, separace prvků a nečistot

Získávání lanthanoidů z rud minerálů je obdobný pro všechny prvky této skupiny, včetně neodymu a samaria. Získává se působením kyselin, nebo alkalických látek. Postup se volí podle zpracované rudy a požadovaném stupni separace jednotlivých látek. V těchto rozkladech se využívá rozdílů v rozpustnosti podvojných síranů lehčích a těžších lanthanoidů a nízké rozpustnosti hydratovaného oxidu thoričitého, výsledný roztok obsahující lehčí lanthanoidy se získá loužením vodou. [3]

1.2.1. Oddělení vzácných zemin z minerálů

Separace jednotlivých prvků se provádí extrakcí, kde jsou lanthanoidy extrahovány inertním rozpouštědlem (n-tributylfosfát zředěný petrolejem), s rostoucí atomovou hmotností klesá v organické fázi rozpustnost lanthanoidů. Druhá možnost separace je použití měničů iontů, kde protéká vodný roztok tzv. eluant (kyselá sůl) skrz tzv. kolonami (válcové nádoby) a odvádí reakční produkty, posléze se v eluantu objeví lanthanoidy v pořadí své atomové hmotnosti. Separace měničem iontů je složitější, ale vhodnější pro získání menších množství vysoce čistých produktů. [3]

1.2.2. Získání čistého prvku

Z odseparovaných prvků získáváme čistý kov pomocí dvou způsobů. Samarium získáváme elektrolýzou roztavených solí, kde se tavenina SmCl_3 elektrolyzuje v ocelových vanách, vyložených grafitem sloužících jako katoda. Anodou jsou grafitové tyče. [3]

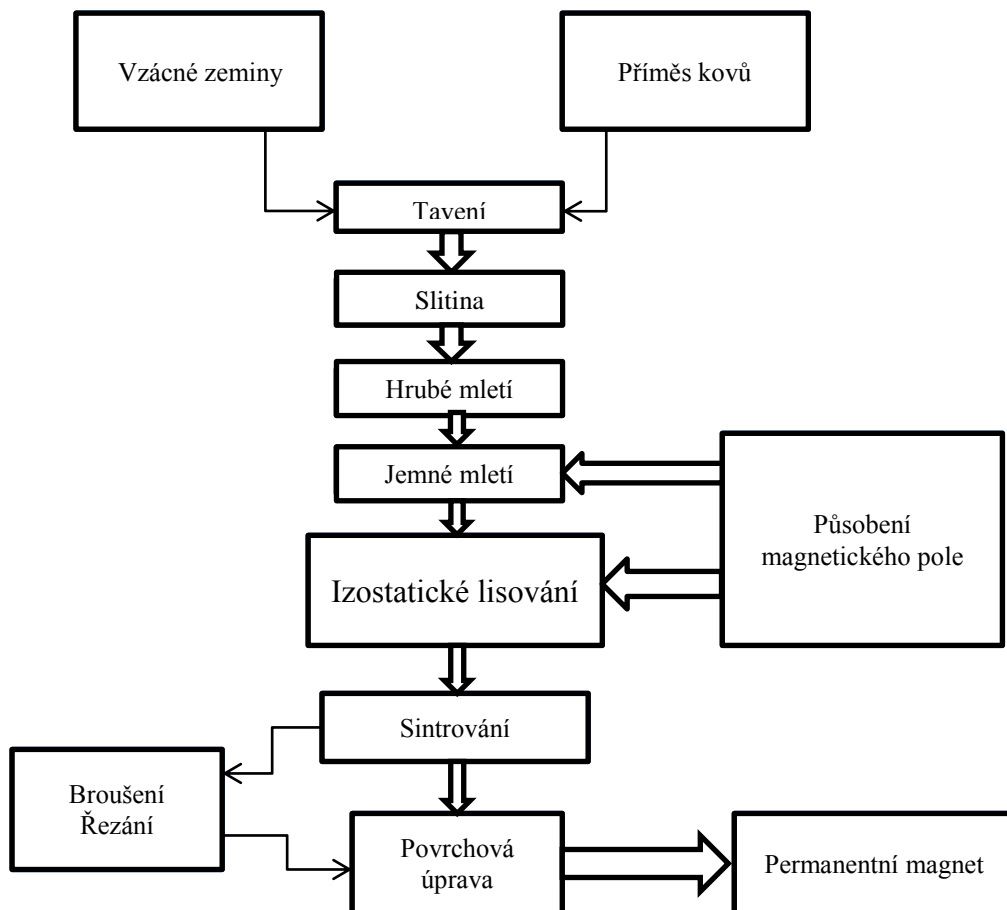
Metalotermická redukce, používaná pro výrobu čistého neodymu, při které se redukují halogenidy kovovým vápníkem. NdCl_3 , 2NdF_3 aj. se zahřívají spolu s Ca v argonové atmosféře na teplotu $1074\text{ }^\circ\text{C}$ (teplota tání + $50\text{ }^\circ\text{C}$), po ukončení reakce a vychladnutí se oddělí struska od kovu. Vápník z kovu oddělíme oddestilováním z taveniny ve vakuu. [3]

1.2.3. Prášková metalurgie

Výroba PM vzácných zemin se provádí následujícími klíčovými postupy tzv. práškové metalurgie:

- I. Vytvoření slitiny - tavením vzniklá směs dvou a více kovů, oxidů kovů
- II. Mletí - odlitek slitiny se drtí v dusíkové atmosféře na velikost mikronů
- III. Lisování - před a během lisovacího procesu působí silné magnetické pole
 - izostatické lisování- tlak se přenáší, při zvýšené teplotě, v tekutině
- IV. Spékání - splynutí práškových částic za teploty nižší než teplota tání
- V. Povrchová úprava (*kapitola 1.5.*) [2]

Obr. 1.1 Technologie výroby PM ze vzácných zemin. [2]



1.2.4. Ostatní způsoby výroby

Existují i jiné metody, jako je lepení kompresí pomocí nosného plastového materiálu, ty jsou používány pro složitější tvary, u kterých není třeba konečné obrábění. Mají nižší energetické schopnosti než u slinutých materiálů. Lepené NdFeB materiály jsou izotropní, tzn., mohou být přitahovány v libovolném směru. Metoda vstřikováním NdFeB prášku se využívá pro extrémně složité tvary. [2]

1.3. Permanentní magnety vzácných zemin

Existují tři materiálové typy magnetických materiálů ze vzácných zemin (Nd, Sm) a přechodového kovu (Co, Fe), které mají intermetalické fáze SmCo_5 , $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ a $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$. Samotné lanthanoidy (Sm, Nd) jsou feromagnetické, ale Curieova teplota je nižší než pokojová teplota, přidáním prvku jako je Co, Fe (které mají vysokou Curieho teplotu $\sim 1130^\circ\text{C}$, 768°C) se nedostatek vykompenzuje [3].

1.3.1. Obecné vlastnosti

Pokud nejsou PM vyformovány již při lisování do forem z kaučuku, provádí se dodatečné opracování. Kvůli vysoké tvrdosti je opracování nutné diamantovým nářadím, popřípadě vodním paprskem. Ovšem opracování takových materiálů není jednoduché z důvodu jejich křehkosti a štěpení. Hustota se pohybuje v mezích od cca $7,5 \text{ g/cm}^3$ pro NdFeB a $8,5 \text{ g/cm}^3$ pro SmCo . Při izostatickém lisování působí magnetické pole v příčném poli (H- materiál), nebo v poli axiálním (W- materiál), tyto způsoby se odráží na vlastnostech PM. Jelikož jsou materiály vzácných zemin kovy, vykazují stejné vlastnosti a také na ně nepříznivě působí kyselé prostředí. Jednou z velkých nevýhod je jejich oxidace ve vlhké atmosféře u SmCo velmi málo, v případě NdFeB se rozpouštějí rychleji a proto jejich povrch je nutno upravovat. Teplotní závislost je jedním z negativ při jejich používání a to především na jejich magnetických vlastnostech, takové ztráty jsou reverzibilní. Při přemagnetování, za působení vyšších teplot protipólem (působení vnějšího pole) vůči jejich struktuře, jsou ireverzibilní ztráty. [2]

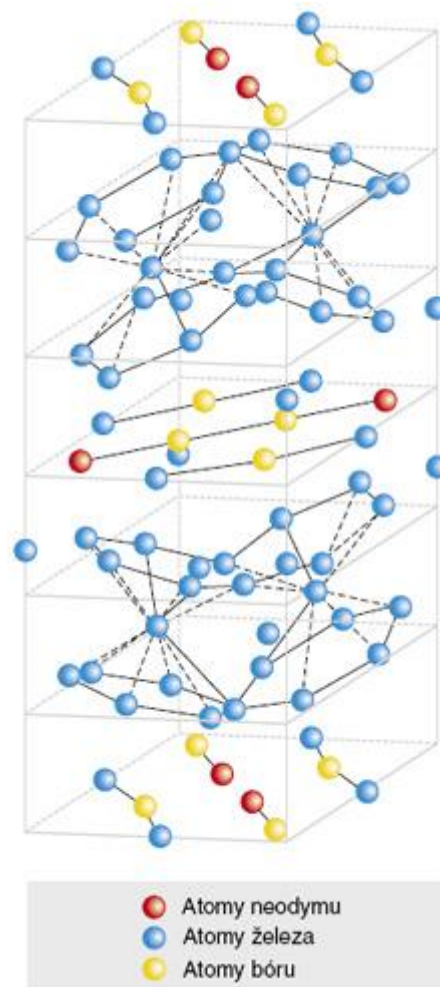
1.3.2. Porovnání s permanentními magnety bez vzácných zemin

Tyto permanentní magnety jsou oproti obyčejným magnetům výrazně silnější, tzn., mají vyšší hodnoty koerzivní síly H_c a remanenci B_r . Uplatnění takových magnetů je v miniaturizaci, neboť feritový, nebo AlNiCo magnet musí být několikrát objemnější, aby dosáhl stejné energie jako PM ze vzácných zemin. Na druhou stranu cena „obyčejných“ magnetů je až 10x nižší (předpoklad stejných přídržných sil).

1.3.3. Neodymové permanentní magnety

1.3.3.1. Struktura

Někdy označovány jako NIB (neodymium-iron- boron). Struktura slitiny se skládá z dvou atomů prvku vzácných zemin, 14 atomů železa a jednoho atomu boru. Na obr. 1.2 jsou vidět čtyři podjednotky tvořící jednotkovou buňku o 68 atomech. Navrhování a vytváření vhodné mikrostruktury je klíč ke špičkové výrobě NdFeB magnetů. Vylepšení může být dosaženo zvýšením feromagnetického pevného materiálu, který v $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ tvoří přibližně 90 % z magnetu, což snižuje koercivitu. Zbytek tvoří zpracováním vzniklý O_2 a také volné částice Fe. Tetragonální krystalová struktura $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ má mimořádně vysokou jednoosou magnetokrystalickou anizotropii, čímž má sloučenina vysokou koercivitu, ta znamená vysokou odolnost proti působení demagnetizačního pole, čehož se dá využít ve mnoha elektromechanických aplikacích.



[2]

Obr. 1.2 Krystalická mikrostruktura NdFeB. [2]

1.3.3.2. Vlastnosti

Neodymové magnety jsou silnějšími a cenově dostupnějšími PM ze vzácných zemin. Jsou používány spíše v aplikacích, kde hmotnost je sekundární problém a cena je hlavním problémem. Nejlepší magnetické vlastnosti má při pokojových teplotách, to výrazně omezuje možnost použití. Materiál je náchylný na korozi, která se překonává povlaky pro různé aplikace. Jeho vývoj a výzkum jsou stále velmi aktivní ve snaze o dosažení teoreticky maximálního energetického součinu okolo 530 kJ/m^3 a zlepšení teplotní stability. Optimální teplota pro NdFeB magnety je okolo $150 \text{ }^\circ\text{C}$ a může být zvýšena i na $180 \text{ }^\circ\text{C}$. Správnými přísadami obsahujícími prvky jako jsou Dy, Tb, Al, Cu, Co a Nb je možné dosáhnout koercivity až 3000 kA/m při pokojové teplotě. Kobaltem, který má $T_c = 1130 \text{ }^\circ\text{C}$, lze navýšit Curieho teplotu NdFeB magnetů až k $400 \text{ }^\circ\text{C}$, pak ovšem remanence s koercivitou razantně ztratí.

[2][9]

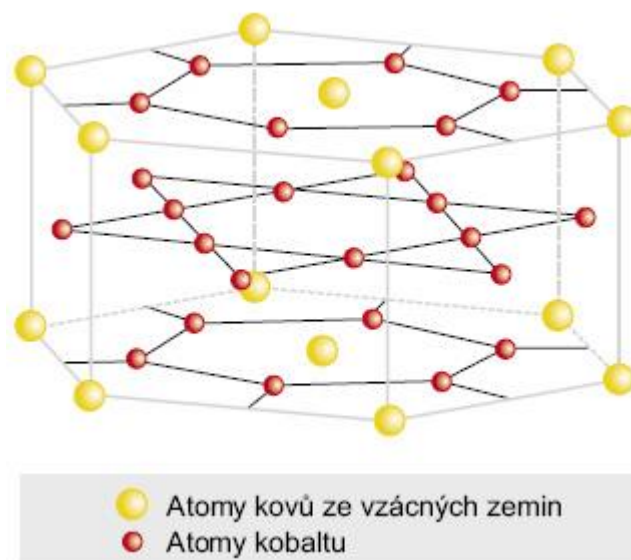
1.3.4. Samariové permanentní magnety

Tyto magnety byly objeveny začátkem roku 1970. Z hlediska síly jsou tyto magnety řazeny na druhé místo za neodymové, ale mají vyšší teplotní možnosti a vyšší koercivitu. Oproti NdFeB magnetům jsou více náchylné na popraskání a odštípnutí. Na druhou stranu jsou poměrně odolné proti vlhkosti, působení koncentrovaných kyselin a solným roztokům. Jejich cena je vyšší než u NdFeB magnetů. [2]

Použitelné jsou ve dvou variantách a to SmCo_5 obr. 1.3 a $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ obr. 1.4.

1.3.4.1. Permanentní magnety SmCo_5

Mají jeden atom samaria a pět atomů kobaltu, v hmotnosti to je 36 % samaria. Jejich maximální energetický součin se pohybuje v mezích 128 - 200 kJ/m^3 . V přítomnosti mírně silného magnetického pole se snaží tyto magnety (nemagnetické) přizpůsobit orientaci vyzařovaného pole. To může být problém při postprocesním upravování jako je povlakování, nebo pokovování. Výhodou této série je jednodušší kalibrovatelnost na konkrétní magnetické pole oproti řadě 2:17. SmCo_5 magnety mají velmi vysokou koercivitu, tzn. těžko je demagnetizovat. [2]



Obr. 1.3 Krystalická struktura SmCo_5 . [2]

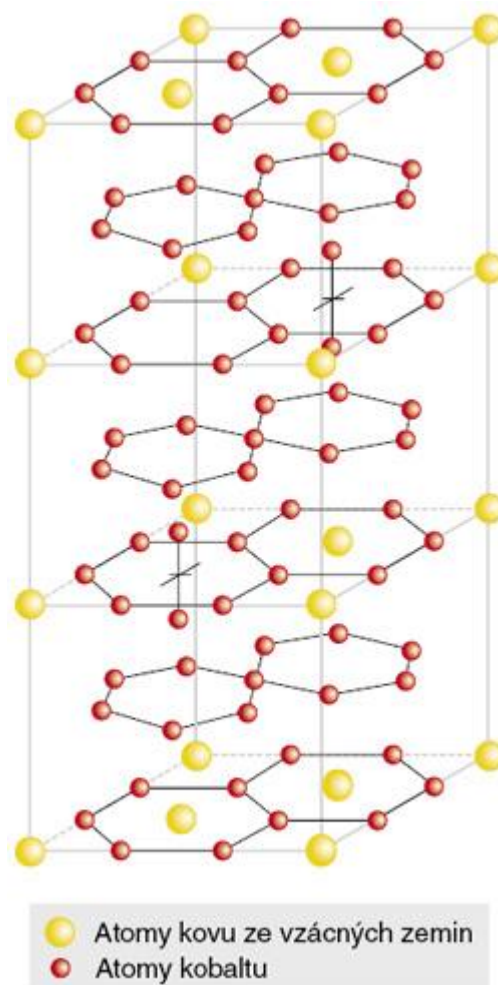
1.3.4.2. Permanentní magnety $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$

Jsou nejstarší slitiny PM vzácných zemin, skládají se ze dvou atomů samaria a 17 atomů přechodného kovu. Přechodný kov je bohatý na kobalt, ale obsahuje i další prvky jako je železo, měď, zirkonium a hafnium. Hmotnostně obsahuje slitina 25 % samaria. Maximální energetický součin této slitiny je okolo 160 - 260 kJ/m^3 a má nejlepší teplotní koeficient cca $-0,03 \text{ %/}^\circ\text{C}$. Nečistoty uvnitř magnetů brání pohybu stěn domén a tím brání přepólování. Pokud požadujeme větší koercivitu,

zvýšíme nečistoty při výrobním procesu. Samariové magnety vynikají svojí vysokou Curieho teplotou použitelnou v často přetěžovaných elektrických strojích, avšak jeho použití omezuje vysoká křehkost. Při pokojové teplotě se může rovnat jeho energetický výkon NIB magnetům. Přesto zůstává využití SmCo zejména ve speciálních aplikacích o vysokých provozních teplotách, kde vyšší cena nehraje roli. [2][9]

Tab. 1.1. Srovnání fyzikálních vlastností PM ze vzácných zemin, proměnné hodnoty jsou závislé na složení přechodných kovů [9]

Vlastnosti	Neodymové PM	Samariové PM
B_r [T]	1,17-1,38	0,85-1,08
H_c [KA/m]	850-2000	500-1600
T_c [°C]	200-320	600-800
ρ [g/cm ³]	7,3-7,5	8,2-8,4
T_{Br} [%/°C]	-0,12	-0,04
T_{Hc} [%/°C]	-0,55	-0,2
μ_r [-]	1,05	1,05



Obr. 1.4 Krystalická struktura Sm_2Co_{17} . [2]

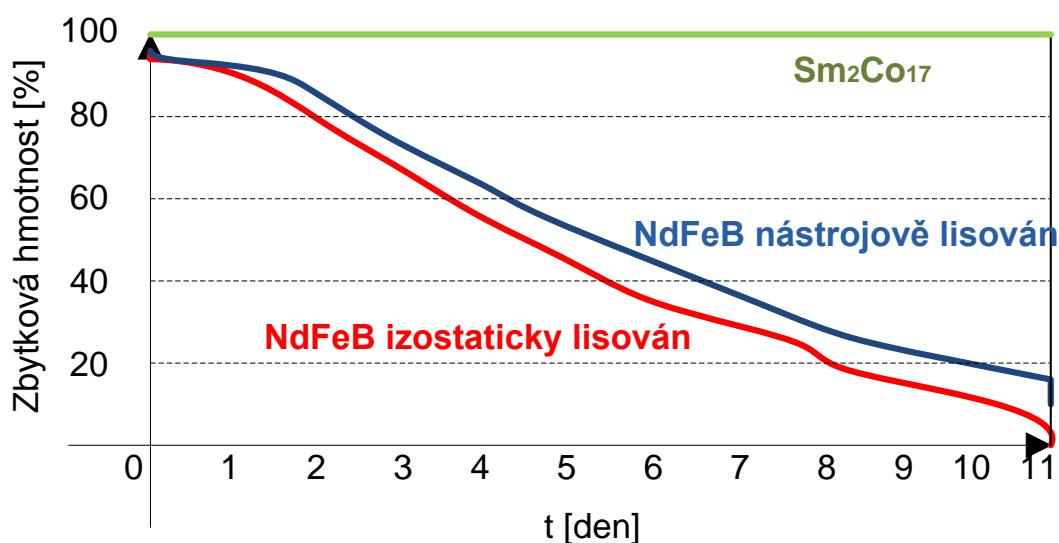
1.4. Povrchová úprava

Jak je známo vzácné zeminy jsou kovy a k těm patří i podobné chemické vlastnosti. Kyselá prostředí vedou k rozpuštění (často průmyslové prostředí), na druhou stranu jsou do určité míry rezistentní v alkalických médiích. V atmosféře má vliv na jejich oxidaci vlhkost u SmCo nepatrně, ale NdFeB magnety se rozpouštějí a proto je nutná jejich povrchová úprava. Výrazná náchylnost vyzývá k používání ochranných nátěrů. [2]

1.4.1. Důvody pro povrchovou úpravu

Reakce materiálu korozi u NdFeB magnetů má příčinu v materiálové struktuře z magnetických zrn, zrnité mezní fáze a z volného neodymu. Příčiny nízké odolnosti proti korozi: nedostatek pasivace, mechanické ničení v důsledku hydridace, ztráta

koherence a rychlé zpráškování magnetu. To má za následek i snížení magnetických schopností. Může docházet i k mechanickým problémům při použití NdFeB magnetů, neboť při korozi vznikají částice prachu, který může mít neblahý vliv na komutátor, ložiska a zanášení ventilátorových lopatek stroje. Na obr. 1.5 je vidět vliv vlhkosti na magnety, měřeno v prostředí při teplotě 130 °C a tlaku 300 kPa v nasycené vodní páře. Konvenční NdFeB je speciálně vyráběn, aby bylo omezeno co nejvíce chyb ve struktuře, za pomoci nástrojového lisování a přísad. V grafu je vidět lineární pokles hmotnosti během 11 dní na téměř nic. [2]



Obr. 1.5 Pokles hmotnosti PM v závislosti na čase. [2]

1.4.2. Možnosti povrchové úpravy

Nejčastějším způsobem je nanášení ochranného povlaku ve formách jiných kovů, tzv. pokovování, jako jsou zinek, nikl, stříbro a zlato. Na aplikování povlaků je mnoho technik, počínaje od malování štětcem, máčení, stříkání, elektrostatického lakování, galvanizace a pasivace. Povlakování zvyšuje životnost snížením korozního opotřebení. Kvůli ochranné vrstvě je potřeba větší vzduchová mezera, tak vzniká větší rozptylový tok a vyšší ztráty v magnetickém obvodu. Ochranný kov zase tvoří spojení pro indukční čáry magnetu a dochází tím k magnetickému zkratu. [2]

Další možností úpravy je povlakování plastem, které se provádí při pokojové teplotě, aniž by došlo k poškození PM. Plast vytváří těsný a uzavřený povlak schopný odolávat teplotám až 110 °C, v uzavřené atmosféře bez kyslíku i 220 °C. [2]

2. Chování PM z hlediska návrhu magnetického obvodu

Existuje mnoho rozdílných typů permanentních magnetů, které mohou posloužit jako ekvivalentní zdroj v magnetickém obvodu. Mezi nejpoužívanější bych řadil NdFeB, používané ve vysoko výkonných aplikacích. Jejich používání je dáno zejména nižší cenovou náročností při konstrukci stroje, oproti permanentním magnetům SmCo.

2.1. Výroba magnetického obvodu z permanentních magnetů

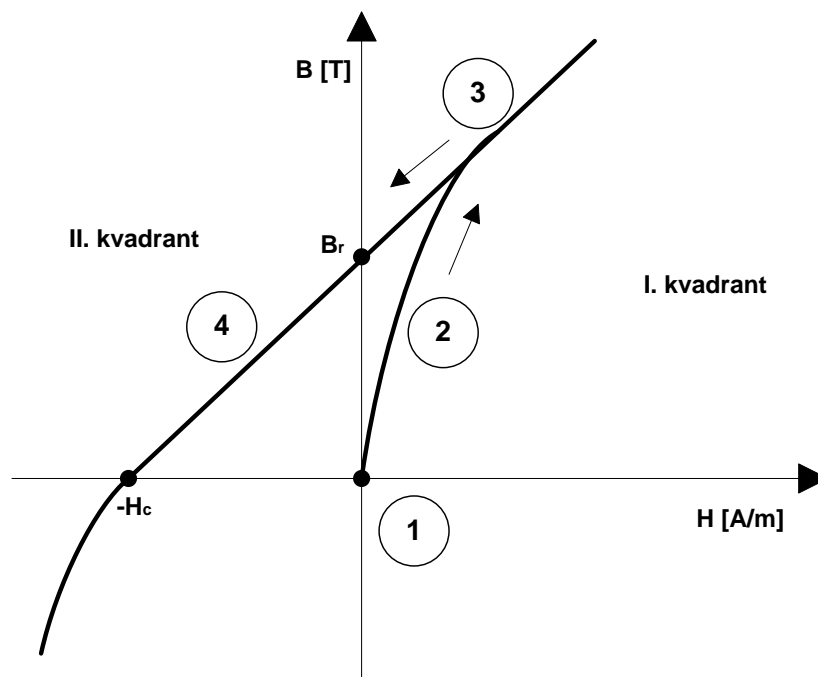
Tyto magnety je možné upravovat do konečného tvaru ve stroji lepením, nebo při výrobě slinováním do požadovaných forem. Pro lepení se využívá suspenze práškového magnetického materiálu v nevodivé a nemagnetické pryskyřici. Z hlediska možnosti sériové výroby tvarů magnetů je lepení levnější variantou. Avšak v objemu lepeného materiálu bude výše zmíněná pryskyřice. Její objem bude nemagnetickou částí lepeného magnetického obvodu a to se projeví na velikosti síly lepeného komplexu. Slinované magnety se používají v aplikacích, kde potřebují mít vyšší sílu při stejném objemu než u lepených magnetů, tzn. pro výkonnější aplikace při zachování nízkého objemu. U permanentních magnetů z NdFeB se většinou volí lepení, pro magnety SmCo je to slinování pro dražší aplikace. Bylo by možné opracovávat materiál do magnetického obvodu i řezáním laserem, vodním paprskem, nebo diamantovým kotoučem. Ale je to obtížnější (kvůli křehkosti materiálu), a co se týče strojního vybavení i finančně náročnější řešení. Opracování na konkrétní tvar je zbytečné, pokud se může magnet vytvarovat již při výrobě (sintrováním). [1]

2.2. Hysterezní smyčka permanentních magnetů

Permanентní magnet lze nejlépe charakterizovat jeho hysterezní smyčkou, kde jsou znázorněny jeho nejdůležitější hodnoty:

- B_r [T] - remanentní indukce (zbytková indukce při $H=0$),
- H_c [A/m] - koercitivní síla (intenzita potřebná k demagnetizaci),
- BH_{max} [J/m^3]- maximální energetický součin.

PM jsou stejně jako feromagnetické materiály nazývány tvrdé magnetické materiály, známe širokou hysterezní smyčkou. Demagnetizační křivka je lineární pro teplotu 20 °C, při vyšších teplotách začíná být nelineární.



Obr 2.1 Hysterezní smyčka PM. [6]

- (1) Stav před výrobou, na PM nepůsobí žádná intenzita magnetického pole tím je i indukce nulová.
- (2) Během výroby se působí na magnetický materiál určitou intenzitou magnetického pole až do úrovně nasycení.
- (3) Ze stavu nasycení snižujeme intenzitu na $H=0$, magnet udrží zbytkovou indukci B_r
- (4) Zvyšováním intenzity pole působící proti intenzitě PM až k hodnotě H_c , dosáhneme odmagnetování magnetu. Sklon křivky ve druhém kvadrantu udává relativní permeabilita μ_r . [6]

2.3. Chování obvodu při mezních hodnotách permeability

Jeden z aspektů, kterým je dána pracovní poloha na hysterezní smyčce, je magnetický obvod a jeho permeabilita. Pokud by PM byl uzavřen ve feromagnetiku o nekonečné permeabilitě, v obvodu by nastala maximální možná indukce, která je dána remanencí PM, tzn. $B = B_r$, obvodem by protékal magnetický tok Φ_r . Intenzita magnetického pole, při dosažení za μ_r nekonečno do rovnice (2.1), bude nulová.

$$H = \frac{B_r}{\mu_r \cdot \mu_0} \quad (2.1)$$

V druhém případě, pokud bychom vytvořili obvod s PM a feromagnetikem o nulové permeabilitě. Magnetický odpor obvodu by byl maximální (nekonečný), tím by nemohl protékat žádný magnetický tok ϕ a z rovnice (2.2) by vycházela nulová magnetická indukce.

$$\phi = \int B \, dS \rightarrow \textit{konstantní průřez} \rightarrow \phi = B \cdot S \rightarrow B = \frac{\phi}{S} \quad (2.2)$$

Intenzita magnetického pole by v obvodu byla rovna koercitivní síle permanentního magnetu. Pro hodnoty v mezních hodnotách $\mu_r (0;\infty)$ bude pracovní bod ležet v druhém kvadrantu hysterezní smyčky. Existuje koeficient permeability P_c udávající polohu pracovního bodu ve druhém kvadrantu hysterezní smyčky. Jedná se o přímku z počátku os, pohybující se po křivce demagnetizační charakteristiky druhého kvadrantu. Říká se jí pracovní přímka. Jestliže se P_c pohybuje v horní oblasti (blíže k ose indukce), je $P_c > 1$. Pro hodnoty $P_c < 1$ se přímka pohybuje v oblasti osy intenzity. Koeficient permeability je důležitý při výběru materiálu pro zajištění optimálních B, H parametrů. Pro samotný PM se počítá podle rozměrů magnetu, bez přítomnosti jiných trvalých magnetů, nebo feromagnetik. Pro motory se pracovní bod pohybuje o $P_c = 4$ i více. Pokud vinutím prochází elektrický proud, vytváří vinutí magnetické pole, které pozměňuje velikost intenzity v operačním bodě. Změna intenzity vytváří tenké hysterezní smyčky Obr. 2.2 v okolí pracovního bodu, ty následují demagnetizační charakteristiku. [1]

2.4. Vliv anisotropie permanentního magnetu na obvod

Kromě hysterezní charakteristiky materiálu, vykazuje permanentní magnet výrazné anizotropní chování. PM vzácných zemin mají krystalické struktury s velmi vysokou magnetickou anizotropií. Krystalové struktury se tedy dají snadno přitahovat v jednom směru, ale brání se magnetizování v jiném směru.

2.4.1. Anizotropie

Vyjadřuje rozdílné chování magnetických vlastností v různých směrech. Anizotropní permanentní magnety se vyrábí izostatickým lisováním působením velkého magnetického pole. Energie, kterou materiál získá, není ve všech směrech stejná. Tento výlisek pak lze snáze zmagnetovat ve směru osy magnetizace. Materiál takto vyrobený může mít až 2x vyšší remanentní indukci než izotropní magnet. [2]

Současný technologický standard ve výrobě PM umožňuje vyrábět takové magnety, které mají téměř dokonalou orientaci. Takže není možnost tímto způsobem získat nějaké výrazné zlepšení B_r . Permanentní magnet připojený na feromagnetický obvod vytváří stejnosměrný magnetický tok ϕ . Pokud tok poteče jedním směrem, mohou zvolit anizotropní feromagnetický materiál. [1]

2.5. Hustota energie permanentního magnetu

Je parametr udávající sílu „výkonnost“ permanentního magnetu, znázorněný součinem magnetické indukce a intenzity magnetického pole. Tento součin je roven ploše obdélníka pod demagnetizační křivkou s bodem v místě operačního bodu. Slouží jako měřítko pro maximální množství energie, získané z magnetu na jednotku objemu. Je to první specifikace při výběru materiálu PM. Při použití v motorech se nikdy PM neprovozují při BH_{max} , neboť s rostoucí teplotou se snižuje demagnetizační charakteristika a chceme předejít demagnetizaci vlivem reakce kotvy. [1]

2.6. Model magnetického obvodu s permanentním magnetem

Při řešení platí analogie Ohmova zákona, tzn. elektrický proud je magnetický tok a elektrické napětí je magnetické napětí U_m . Elektrický odpor je nahrazen magnetickým R_{mg} viz (2.3)

$$\phi = \frac{U_m}{R_{mg}} = \Lambda_{mg} \cdot U_m \quad (2.3)$$

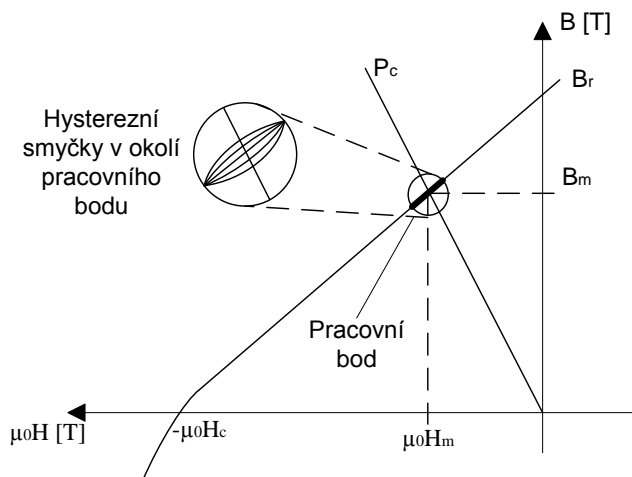
Permanentní magnet lze považovat za magnetický zdroj „baterii“ a feromagnetické materiály (permalloy, železo) jako téměř ideální vodič v elektrickém obvodu – měď. Vše není analogické a na rozdíl od elektrického proudu může magnetický tok naplnit prostor ve vzduchové mezeře. Obecně se magnetická vodivost určí z rovnice (2.4)

$$\Lambda_{mg} = \frac{\mu \cdot S}{l} = \frac{1}{R_{mg}} \quad (2.4)$$

Plocha materiálu je značena S , střední délka obvodu l .

$$U_m = N \cdot I = H \cdot l \quad (2.5)$$

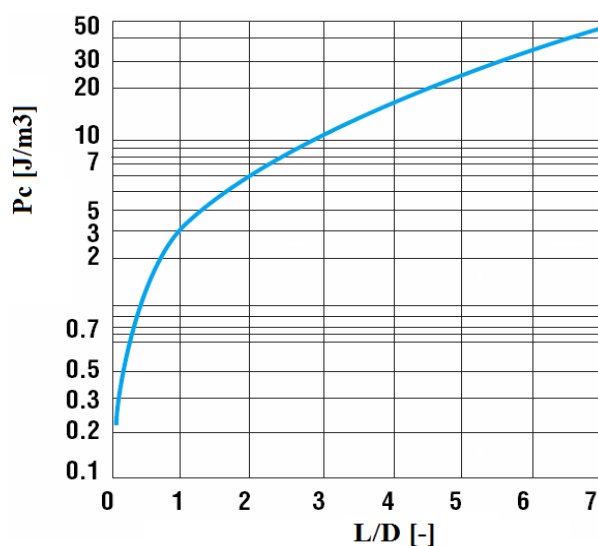
Rovnice pro magnetické napětí (2.5) v případě permanentního magnetu je H intenzita v pracovním bodě H_m a l je délka magnetu ve směru osy magnetizace. [1]



Obr 2.2 Operační bod v hysterezní smyčce. [1]

2.6.1. Stanovení koeficientu permeability

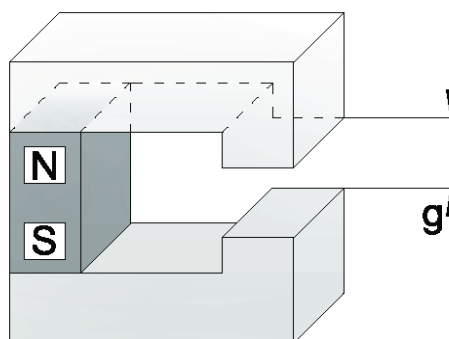
Tento koeficient je závislý na tvaru magnetu. Pro axiálně magnetizovaný válcový magnet se vychází z poměru mezi délkou a průměrem magnetu Obr 2.2. Obdobná tabulka existuje pro obdélníkové magnety, kde je poměr délky a výšky magnetu. Zobrazovaný koeficient je pouze pro samostatný PM, pokud bychom ho měli v magnetickém obvodu, pracovní bod se mění v závislosti na parametrech obvodu (rozměry, permeabilita). [7]



Obr 2.3 Graf pro určení koeficientu permeance válcového PM. [7]

- L - délka válcového magnetu
- D - průměr válcového magnetu

2.6.2. Magnetický obvod



Obr 2.4 Magnetický obvod.

Pro zadaný obvod se zjišťuje pracovní (operační) bod na charakteristice PM. Abychom jej zjistili, musí se nejdříve určit koeficient permeance, podle něhož pak určíme pracovní body H_m a B_m . Vychází se ze základní rovnice (2.6).

$$B_m = B_r + \mu_r \mu_0 H_m \quad (2.6)$$

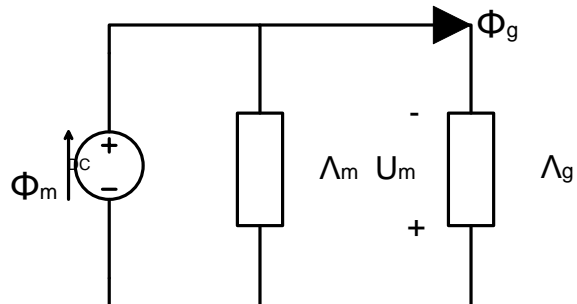
- Obvod řešený pro permeabilitu feromagnetika o nekonečné hodnotě:

Pokud má feromagnetický obvod $\mu_r \rightarrow \infty$, je jeho magnetická vodivost $\Lambda_{mg} \rightarrow \infty$ a jeho magnetický odpor $R_{mg} \rightarrow 0$. Tím je obvod zjednodušen a počítá se pouze se vzduchovou mezerou a vlastní vodivostí magnetu (2.7).

$$\Lambda_{mg} = \frac{\mu_r \mu_0 S_m}{l_m} \quad (2.7)$$

Důvod počítání s permeancí je v paralelní kombinaci obvodu, kde se permeance jednoduše sčítají. Pro vzduchovou mezeru se nepočítá s rozptylovým tokem, kvůli zjednodušení výpočtu. Hodnota v rovnici (2.8), (2.9) C_ϕ je koncentrační faktor toku znázorňující poměr plochy PM a vzduchové mezery. Pokud by se zohledňoval rozptylový tok ve vzduchové mezeře, koncentrační faktor by měl hodnotu nižší jak jedna.

Rovnice (2.10) určuje konečnou hodnotu pracovního bodu obvodu obr 2.5. Z této rovnice vyplývá závislost pracovních hodnot obvodu na rozměrech vzduchové mezery a PM. Při zanedbání rozptylového toku ve vzduchové mezeře je koncentrační faktor roven jedné a z poměru objemů se stane poměr délky magnetu a vzduchové mezery (2.9). [1]



Obr. 2.5 Elementární magnetický obvod s $\mu_{Fe} \rightarrow \infty$.

$$B_g = B_m \frac{S_m}{S_g} = B_m C_\phi \quad (2.8)$$

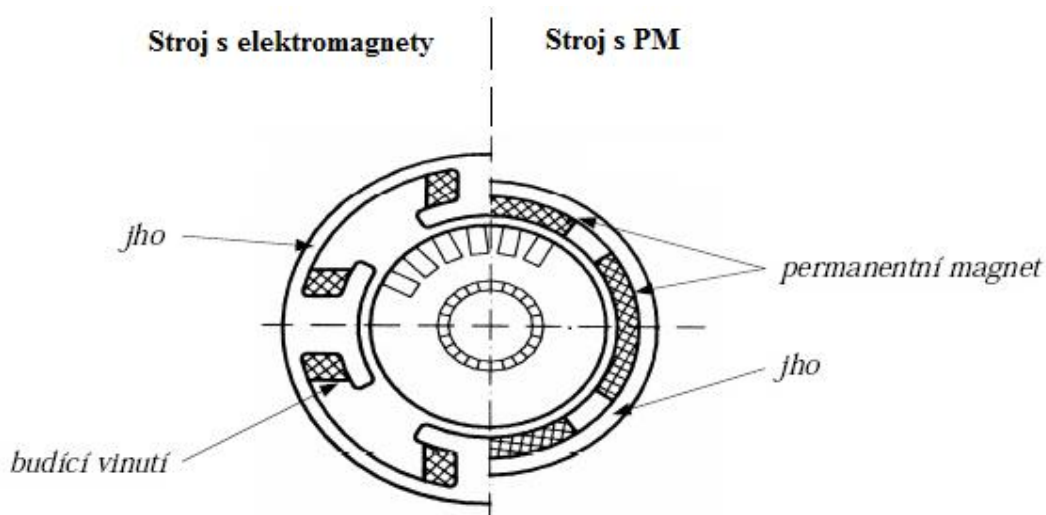
$$P_c = \frac{-B_m}{\mu_0 H_m} = \frac{l_m S_g}{g \cdot S_m} = \frac{l_m}{g} \cdot C_\phi^{-1} \quad (2.9)$$

$$P_c = \frac{V_m}{V_g} \cdot \frac{1}{C_\phi^2} \quad (2.10)$$

3. Permanentní magnety v elektrických strojích

První buzení stejnosměrného motoru s komutátorem pomocí Alnico PM se osvědčilo v roce 1932, v té době se jednalo o velmi nízké výkony a bylo vyrobeno pouze několik málo strojů. Avšak byl to začátek éry, která umožnila snadnější možnost konstrukce, bez použití elektromagnetu. S postupem času se místo Alnico začali používat feritové magnety, které vnesly rozsáhlou možnost použití v dopravě, domácích a průmyslových zařízeních.

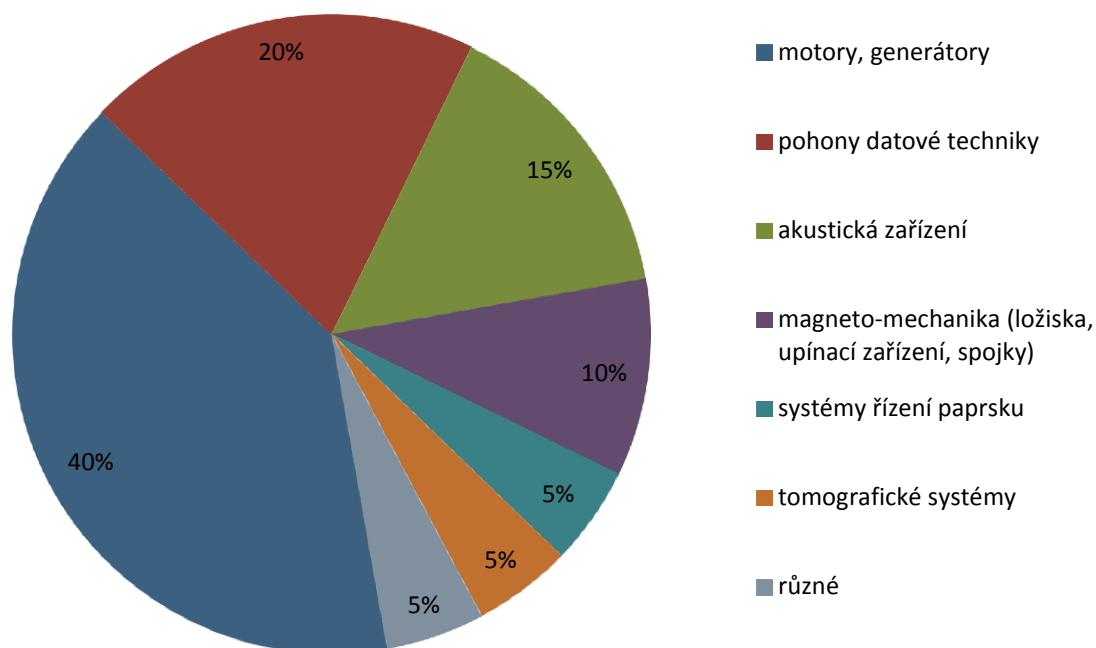
Permanentní magnety v elektrických strojích omezily používání elektromagnetů, tím se zlepšily mnohé vlastnosti, ať už z hlediska konstrukce stroje, nebo jeho spolehlivosti. Bez budícího vinutí zanikla možnost zničení vinutí vlivem opotřebení, nadproudu, či nedokonalostí výroby (u strojů vyšších výkonů je náročné navinout cívku na elektromagnet). Při použití PM odpadají problémy s řízením budícího proudu a tepelnými ztrátami ve vinutí. Dalším aspektem bylo snížení výrobního materiálu a to jak vinutí (měď, hliník), tak jádra (ocel, železo). Snížení množství potřebného materiálu vedlo k poklesu konstrukčních rozměrů a k celkové miniaturizaci stroje. Ruku v ruce se zmenšením rozměrů šlo i snížení hmotnosti. Tím jsme se dostali k dobrému poměru výkon (točivý moment) / hmotnost stroje, který je, mimo výše zmíněné důvody, hlavní prioritou při návrhu stroje. [4]



Obr. 3.1. Porovnání rozměrů motoru s elektromagnety a PM. [4]

Využití PM ve strojích bych rozdělil do tří základních sekcí a to:

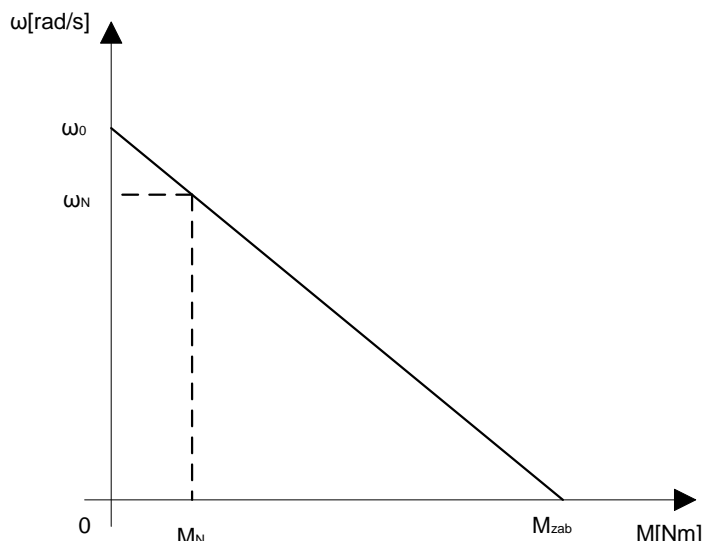
- Stejnosměrné motory s komutátorem
- Bezkartáčové motory (stejnosměrné a střídavé synchronní)
- Krokové motory



Obr. 3.2. Aplikace PM ze vzácných zemin (údaj z roku 2002). [5]

3.1. Komutátorové stejnosměrné motory s PM

Je druh otáčivých strojů, pro často se měnící požadavek na rychlost otáček a jsou preferované pro pohony s častou regulací (změnou požadované rychlosti) od obsluhy. Ovládání stejnosměrného pohonu je poměrně jednoduché a splňuje mnohé požadavky ve spoustě aplikací. Svým řízením jsou velice blízké stejnosměrným strojům s cizím buzením elektromagnetu, při konstantním budícím proudu. Vyrábějí se od jednotek wattů až do desítek kW, záleží na volbě materiálu PM. Ve vysokých výkonech už se hledí na rychle rostoucí cenu stroje, v některých případech i na problémy s odbuzováním. Využití PM ze vzácných zemin je spíše v malých motorkách, což je neekonomičtější. Nízké výkony nacházejí uplatnění mimo jiné v domácí elektronice, kde nahrazují jednofázové střídavé motorčky, za pomoci polovodičových usměrňovačů. Z konstrukčního hlediska jsou stejné jako stejnosměrné motory s elektromagnety. Momentová charakteristika takovýchto motorů je lineární jako na obr. 3.3, při rozběhu může být moment 6-7x větší než jmenovitý moment a tím i stejně násobný jmenovitý proud, který způsobí značné jouleovy ztráty. Takové oteplení může mít špatný vliv na PM a kartáče musí být konstruovány na takto vysoký proud, bez většího jiskření (opalování). [5]



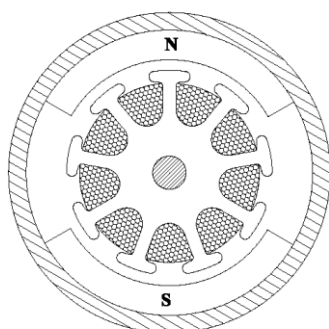
Obr. 3.3 Momentová charakteristika stejnosměrného motoru s PM. [5]

Možnosti provedení konstrukce stroje:

- Konvenční drážkový rotor
- Bezdrážkový rotor
- Válcový motor s pohyblivou cívkou
- Diskový motor s pohyblivou cívkou

3.1.1. Konstrukční provedení

3.1.1.1. Konvenční drážkové provedení motorů

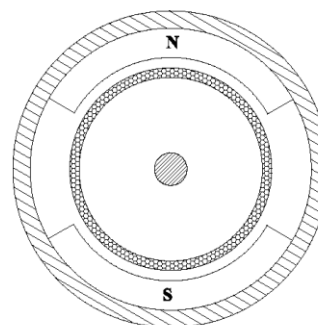


Obr. 3.4 Drážkový rotor. [5]

Jádro kotvy tvoří plechy z křemíkové, nebo uhlíkové oceli s vinutím v drážkách, vodiče jsou v drážkách vyztuženy epoxidovou pryskyřicí. Tím má drážkový rotor vyšší životnost a spolehlivost než bezdrážkový rotor. Vyšší počet drážek zajistí zlepšení průběhu točivého momentu a sníží elektromagnetický hluk. [5]

3.1.1.2. Motory s bezdrážkovými rotory

Jsou motory s velice hladkým průběhem momentu, kde je vinutí zařazeno na válcovém jádře bez drážky. Magnetický tok je v porovnání s drážkovým rotorem snížen, neboť je větší mezera mezi jádrem



Obr. 3.5 Bezdrážkový „hladký“ rotor. [5]

rotoru a pólovými nástavci. Proto je potřeba většího množství magnetů k zajištění dostatečného magnetického toku. Provedení s takovým rotorem se neřadí mezi motory s vysokým výkonem ($\sim 500\text{W}$), kvůli odstředivé síle působící na vinutí. Odstředivá síla je závislá na poloměru rotoru a hlavně mocnině úhlové frekvence. Využití nachází všude tam, kde je žádaná přesnost, spolehlivost a nízká setrvačnost, tj. průmyslová automatizace, robotika, automobilový průmysl. Předním světovým výrobcem těchto „ironless“ rotorů je německá společnost Maxon, která se zabývá vývojem již přes 50 let. [5]

3.1.1.3. Válcové motory

- Válcový rotor s vnějším polem

Je typ motoru s velmi krátkou dobou rozběhu rotoru (soustrojí), dokonce až v hodnotách $t_m < 1\text{ms}$. Takových hodnot se dosáhne díky velkému poměru Φ_g/J , kde Φ_g je magnetický tok ve vzduchové mezeře a označení J je moment setrvačnosti. Zdrojem magnetického toku u těchto motorů je většinou Alnico PM, nebo magnet ze vzácných zemin. Aby se zabránilo demagnetizaci Alnico magnetů, používají se široké magnety s podélným magnetizováním, proto lepší konstrukce je se statorem z permanentních magnetů vzácných zemin. [5]

- Válcový rotor s vnitřním polem

Známé jako bezjádrové motory jsou často používané pro aplikace o výkonech nižších jak 10 W , výjimečně až 200 W . Doba rozběhu soustrojí není už tak nízká jako u výše zmíněného, neboť malá velikost PM uvnitř cívky rotoru vytváří malý magnetický tok Φ_g . [5]

3.1.1.4. Diskové motory

- ploché s vinutým rotorem

Měděné vinutí je lisováno s pryskyřicí, komutátor je stejný jako u konvenčních typů. Tyto motory nalézají uplatnění v chladicích ventilátorech.

- s tištěným vinutím rotoru

Vinutí jsou lisována z plechů mědi a následně pájena a formována do vlnového vinutí. V těchto motorech jsou používány hlavně Alnico a feritové magnety.

- trojvinut'ové

Tři jednotlivé cívky na rotoru, každá má své jádro. Dvou nebo čtyřpólový stator z permanentních magnetů. Připojení cívek je rozdílné podle typu vinutí (většinou vlnové vinutí). Nejčastější užití v oblasti mikropohonů. [5]

3.2. Bezkartáčové motory s permanentními magnety

Jejich hlavní předností je vinutí pouze na statické části, a tudíž se neřeší problém s elektrickými kontakty na otáčivé části. Synchronní motory jsou napájeny sinusovým průběhem napětí a vytváří magnetické točivé pole. Pro konstantní napětově frekvenční ovládání není potřeba polohové čidlo na rotoru. Bezkartáčové stejnosměrné stroje využívají přímou zpětnou vazbu z úhlové polohy rotoru. Komutátory jsou zde nahrazeny elektronickými střídači a polohovými čidly.

3.2.1. Konstrukční provedení

Stator se skládá z vícefázového (většinou třífázového) vinutí v drážkách a permanentní magnety na rotoru slouží jako budící systém.

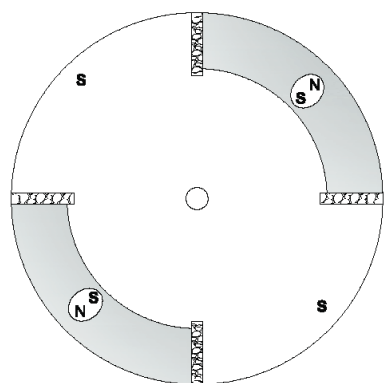
3.2.1.1. Stavba rotoru

Účelem rotoru je vytvořit magnetické pole o indukci B pro zákon síly (3.1). Poloha a tvar magnetů na rotoru má i významný podíl na hladkém průběhu momentu. Vzájemným působením mezi PM rotoru a drážkami statoru vzniká reluktanční moment. Ten je závislý na poloze, počtu pólů na rotoru a počtu zubů na statoru. Nejčastější projevení reluktančního momentu je při nízkých otáčkách, při vysokých otáčkách filtruje moment setrvačnosti reluktanční moment. Omezení tohoto momentu je možné

- zkosením zubů statoru, či magnetů rotoru,
- použitím otvorů na pólech,
- modulovaným průběhem proudu.

Existují i poměry mezi obloukem pólu a roztečí pólu, které minimalizují účinek reluktančního momentu. [1]

$$F = B \cdot l \cdot i \quad (3.1)$$

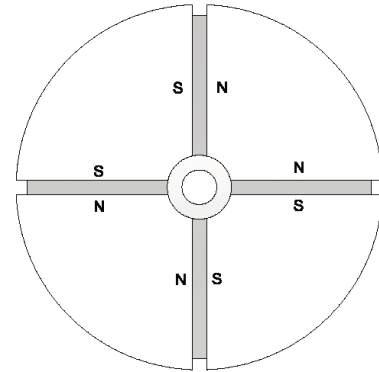


Obr. 3.6 Varianta rotoru 1. [1]

Nejčastějším parametrem výběru varianty rotoru je cena za permanentní magnet a jeho následné zpracování. Proto je obvykle vybírána cenově nižší relace, což vede i k nižšímu využití výkonu. Varianta na obr. 3.6, kde je každý druhý magnet nahrazen železným jádrem rotoru. Tok z jižního magnetického pólu k povrchu rotoru oddělí severní magnetické póly. Indukce ve vzduchové mezeře je závislá na poloze rotoru, neboť je rozdílná permeabilita železa a PM magnetu. Kvůli

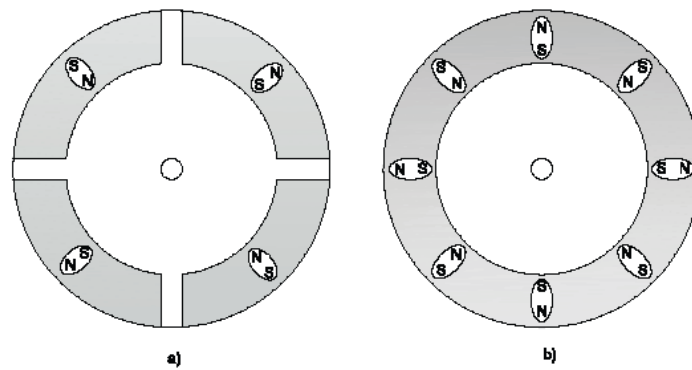
rozdílné reluktanci, může vznikat reluktanční moment. Vzhledem k polovičnímu počtu magnetů se jedná spíše o levnější variantu pro méně výkonné stroje. [1]

Na obr. 3.7 je provedení s PM kolmo ke vzduchové mezeře, čímž magnetický tok prochází do vzduchové mezery skrze elektrotechnickou ocel. Hlavním důvodem této konstrukce je vyšší hustota magnetického toku (siločar) v místech drážek rotoru. Využívá se v případech použití levnějších feritových magnetů, při zachování vyššího výkonu. Indukce ve vzduchové mezeře se již nemění tak razantně v závislosti na poloze rotoru jako v první variantě. [1]

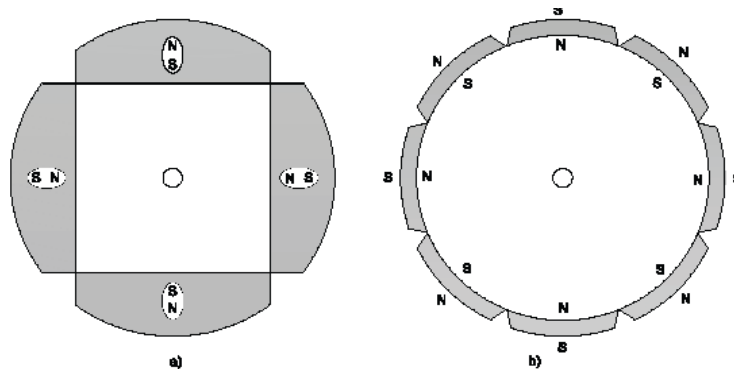


Obr. 3.7 Varianta rotoru 2. [1]

Elektrotechnická ocel umístěná v mezerách mezi magnety na obr. 3.8 a) zvyšuje reluktanční moment přispívající do výkonu motoru. Na obr. 3.8 b) je varianta bez mezer, magnet je skládán a lepen do jednoho kusu. Jedná se o levnou variantu o nižších výkonech kvůli lepení magnetů.



Obr. 3.8 Varianty rotoru 3. [1]



Obr. 3.9 Varianty rotoru 4. [1]

Poslední dvě varianty obr. 3.9 tzv. „arc“ doslova obloukový tvar magnetů. Mají vhodný poměr mezi délkou oblouku a roztečí pólu, tím výrazně snižují reluktanční moment.

3.2.1.2. Stavba statoru

Cílem statoru je, aby magnetický tok vedl skrze mezeru okolo vinutí, kterým by protékal proud i potřebný pro vznik momentu (3.1). Na statorech u bezkartáčových motorů se kromě některých speciálních variant permanentní magnety nevyskytují a proto bych jen zkrátka zmínil tři nejčastější varianty. [1]

- Stator s vyniklými póly a zubovým vinutím

Výhodou této konstrukce je jádrové vinutí, kde není vyvedené čelo vinutí a stroj tak může více využít vinutí, kromě toho je stroj kratší. Na rozdíl od vinutí v drážkách jsou menší interakce mezi fázemi.

- Stator s vinutím bez drážek

U tohoto typu nevzniká reluktanční moment, neboť nejsou drážky. V této konstrukci je více prostoru pro vinutí, ale elektrické (proudové) namáhání by nemělo být zvýšeno nad určitou hranici. Průchodem proudu vzniká teplo, které by se odvádělo pouze axiálně vzduchovou mezerou. To by mohlo mít za následek ohřívání PM a jejich nevratné zničení. Další komplikací je vysoký magnetický odpor mezi PM na rotoru a železem statoru, důsledkem velké vzduchové mezery, proto musí být PM vyšší. [1]

- Stator s vinutím v polouzavřených drážkách

Nejběžnější z variant využívaný i u asynchronních strojů. Drážky snižují rozdíl reluktance (permeance) ve vzduchové mezeře při chodu, tím se sníží reluktanční moment.

Používání bezkartáčových PM motorů za pomoci vzácných zemin, zlepšilo výkon ve jmenovitých otáčkách, ale také poměr výkon (krouticí moment) / hmotnost a dynamický výkon. Díky polovodičům se stalo ovládání těchto motorů snadné a cenově působivé s možností regulace otáček ve velkém rozsahu při zachování dobré účinnosti.

3.3. Krokové motory s PM

Tyto motory konvertují elektrické impulsy do oddělených úhlových posunů, tzv. kroků. Kromě speciálních úprav je časté uložení řídicího vinutí na statoru, kvůli případným ztrátám na komutátoru. Stator i rotor motoru mají vyniklé póly, neboť moment působí v místě největší magnetické vodivosti. Vstupní signál je přiveden do požadované polohy hřídele, bez potřeby čidla, nebo zpětné vazby. Tím nacházejí uplatnění v aplikacích pro řízení polohy a rychlosti, bez potřeby finančně náročných zpětnovazebních smyček. Konstrukčně s tímto motorem je shodný spínaný reluktanční motor, avšak rozdíl je ve způsobu jejich řízení. Reluktanční motor má plynulý chod, kdežto krokový motor tzv. krokuje.

Krokové motory se dělí na motory:

- s aktivním rotorem,
- s pasivním rotorem (SRM),
- hybridní motory.

U motorů s proměnou reluktancí jsou zdrojem magnetického toku proudu ve vinutí. Rotor může být tvořen magneticky měkkým materiálem, nebo PM (rozdělení na pasivní a aktivní krokové motory).

Hybridní motory jsou buzeny PM a budícími cívkami. Tyto motory mají oproti SRM jemnější krok a díky PM drží i při vypnutém proudu. Rotor tohoto stroje se skládá ze dvou kusů měkké oceli do tvaru hvězdy. Válcový, axiálně magnetizovaný PM se umístí mezi kusy oceli, protilehlé části jsou zároveň protilehlé póly. V dnešní době se stávají dosti populární v průmyslových aplikacích: obráběcí zařízení, polohovací 3D aparatury aj.

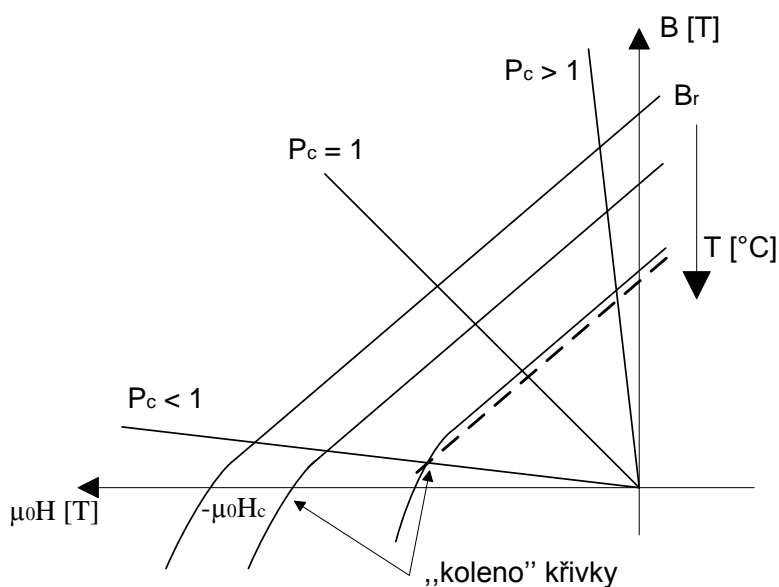
Krokové motory na rozdíl od ostatních vynikají zejména těmito vlastnostmi:

- rychlost otáček závislá na vstupních impulsech,
- vynikající reakce na řídicí signál – zrychlení, zpomalení,
- vysoký moment v nízkých otáčkách,
- možnost velmi malých kroků (závisí na konstrukci – počtu vrstev),
- dlouhá životnost.

Na druhou stranu je jejich účinnost nižší než u bezkartáčových motorů s PM. A mohou mít tendenci vychylovat se ze synchronismu, nebo mechanicky rezonovat. Jsou používány pro motory nízkých výkonů (jednotky kW), kde není takové tepelné namáhání, které by omezovalo používání PM ze vzácných zemin. Naopak se tím mohou získat menší rozměry.

4. Tepelná závislost PM v magnetickém obvodu

Magneticky tvrdé materiály jako jsou PM z neodymu, či samaria mají rovné demagnetizační křivky ve druhém kvadrantu hysterezní smyčky a to při pokojové teplotě obr. 4.1. Sklon přímky je roven relativní permeabilitě, která se pro tyto PM pohybuje v mezích 1,0 - 1,4. Při vyšších teplotách klesá demagnetizační přímka k nulovému bodu. Tuto událost popisují teplotní koeficienty B_r a H_c . Pokles demagnetizační křivky snižuje magnetický tok v magnetickém obvodu s PM. Charakteristiku je možné vrátit zpět do původní fáze za předpokladu snížení teploty na pokojovou. Posuv křivky při zvyšování teploty může přesunout „koleno“ křivky ze třetího do druhého kvadrantu charakteristiky. Při pracovním bodě v této anomálii křivky může natrvalo dojít ke ztrátě magnetizace v důsledku zkratu, nebo přetížení stroje. Což by mělo za následek snížení síly magnetu, blíže v kap. 4.5. Tomu se dá předejít vhodnou volbou pracovního bodu na charakteristice. Volbou pracovního bodu $P_c > 1$, se dostaneme do horní části charakteristiky, kde demagnetizace nehrozí. [1]



Obr. 4.1 Poloha demagnetizační křivky při změně teploty.[1]

4.1. Stanovení teplotního koeficientu

Pro pokročilé energetické systémy jsou potřebné PM se zvýšenou vysokoteplotní odolností. To vyžaduje vývoj nových vysokoteplotních PM, ale taky lepší a přesnější popis teplotních charakteristik. Základem charakteristiky je teplotní koeficient, který můžeme odvodit ze změny některého z magnetických parametrů v nějakém teplotním rozmezí (4.1).

$$\alpha_x = \frac{Q_{T_2} - Q_{T_1}}{Q_{T_1} \cdot (T_2 - T_1)} \cdot 100 \text{ [%/}^\circ\text{C]} \quad (4.1)$$

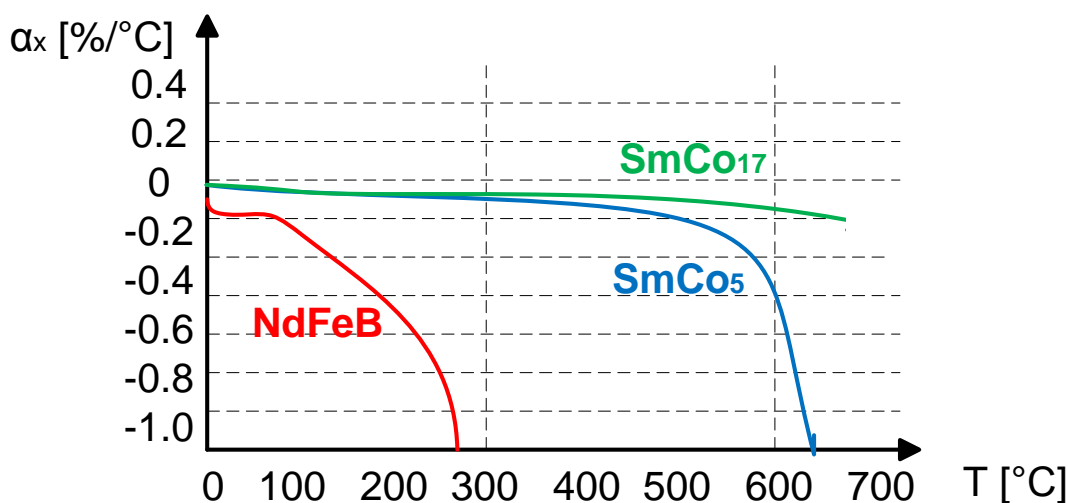
U této rovnice nemůžeme říci, že se jedná o přesnou hodnotu teplotního koeficientu, zvláště pak pro velké rozdíly teplot ΔT_{12} . Jiný způsob vyjádření teplotního koeficientu může být za pomoci derivace (4.2).

$$\alpha_T = \frac{dQ}{dT} \cdot \frac{1}{Q} \cdot 100 \text{ [%/}^\circ\text{C]} \quad (4.2)$$

Podíl těchto rozdílů můžeme vyjádřit pomocí sumy jednotlivých úseků (4.3).

$$\frac{dQ}{dT} = \sum_{i=1}^n i a_i \cdot T^{i-1} \quad (4.3)$$

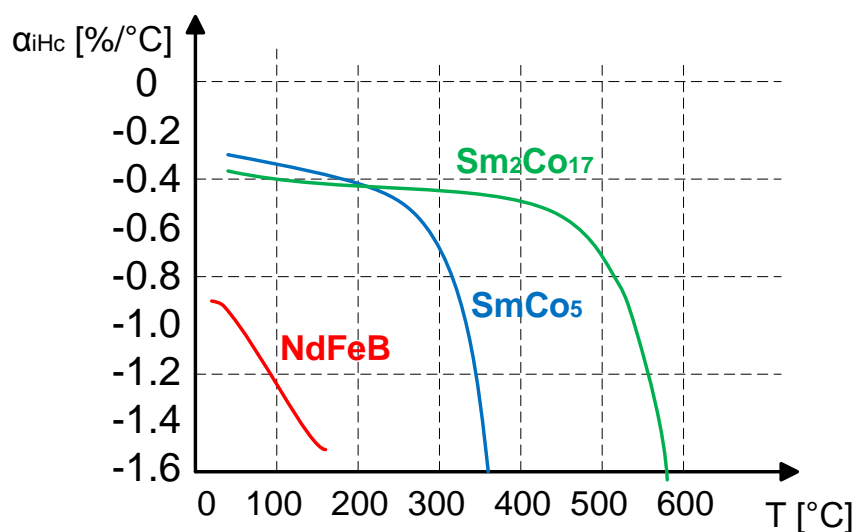
Kde i , je n -tý prvek v podílu diferencí a konstanta a je teplotní koeficient v n -tem úseku derivace. Tím můžeme jít hlouběji do tvaru charakteristiky a podrobněji jí rozebrat. Závislost teploty na teplotním koeficientu znázorňuje graf na obr. 4.2, při konvenční výrobě (magnetizace při ~ 800 kA/m). [10]



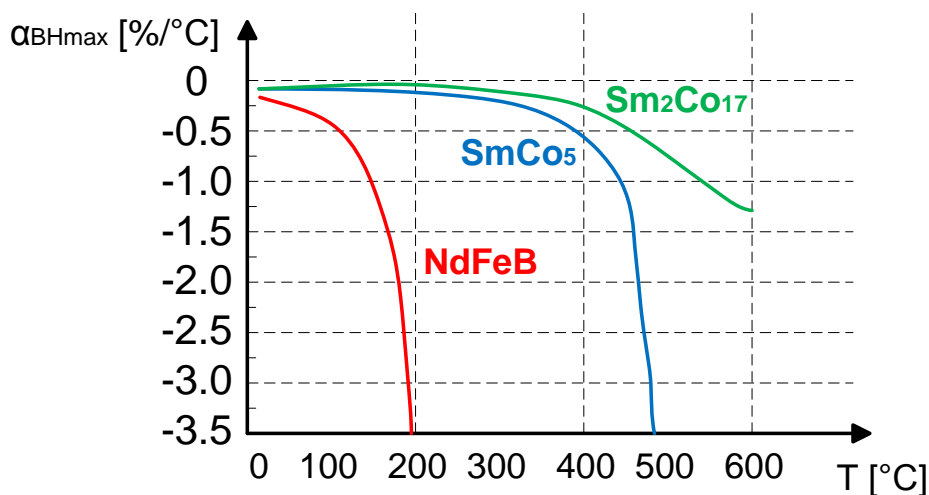
Obr. 4.2 Závislost teplotního koeficientu na teplotě PM. [10]

4.2. Charakteristiky teplotních koeficientů základních parametrů PM

Na obr. 4.2 můžeme vidět nestabilní závislost magnetů NdFeB, oproti SmCo magnetům. Důvodem plošší charakteristiky SmCo₁₇ je vyšší Curieho teplota. Na grafu nejsou vyznačeny, ale existují permanentní magnety s lanthanoidem gadolinium (Gd₂Co₁₇ a GdCo₅), u kterých je teplotní koeficient až do $\sim 350^\circ\text{C}$ kladný (kap. 4.3). Teplotní koeficienty se rozdílně mění pro jednotlivé parametry permanentních magnetů, viz obr. 4.3 a obr. 4.4. Teplotní koeficient α_{H_c} definuje tepelnou závislost vnitřní koercivity magnetického pole, to je taková intenzita mag. pole, při které je celková polarizace nulová (vektory polarizace domén se vzájemně ruší). [10]



Obr. 4.3 Závislost teplotního koeficientu koercivity na teplotě PM. [10]

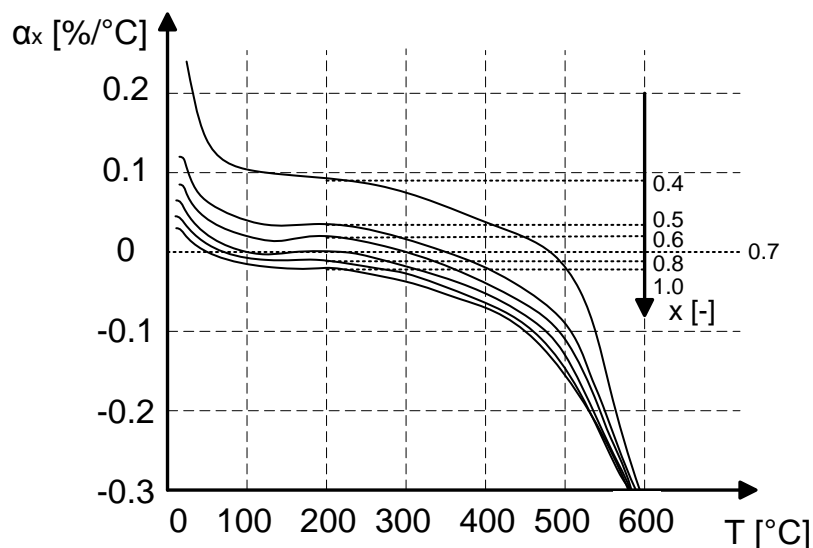


Obr. 4.4 Závislost teplotního koeficientu max. energetického součinu na teplotě PM. [10]

4.3. Způsob zlepšení tepelné závislosti teplotního koeficientu

V aplikacích, kde je požadován vysoký rozsah pracovních teplot (až 500 °C), nemusí ani SmCo magnety vyhovovat svojí teplotní závislostí. Proto je možné provést kompenzaci pomocí tzv. těžkých vzácných zemin (Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu) a to zejména příměsí Gadolinia. Teplotní koeficient směsi SmCo_5 a GdCo_5 závisí na jejich poměru. V závislosti na změně poměru Sm a Gd, tj. hodnota x ve vzorci (4.4), můžeme na obr. 4.5 vidět závislost teplotního koeficientu na teplotě. [10]





Obr. 4.5 Závislost teplotního koeficientu na teplotě, při změně směsi PM. [10]

4.4. Teplotní závislost rezistivity PM ze vzácných zemin

Rezistivita permanentního magnetu je důležitou složkou při navrhování magnetického obvodu, neboť její velikost je závislá, na teple vznikajícím z vířivých proudů. Přesná znalost rezistivity je důležitá u motorů (magnetických obvodů), pracujících v širokém rozmezí teplot. Předpokladem zjednodušených výpočtů je konstantní odpor v celém rozsahu teplot a jeho izotropní charakteristika. Takové hodnoty rezistivity, konduktivity PM jsou uváděny v jejich výrobních materiálech, nebo jsou dány normami IEC. [11]

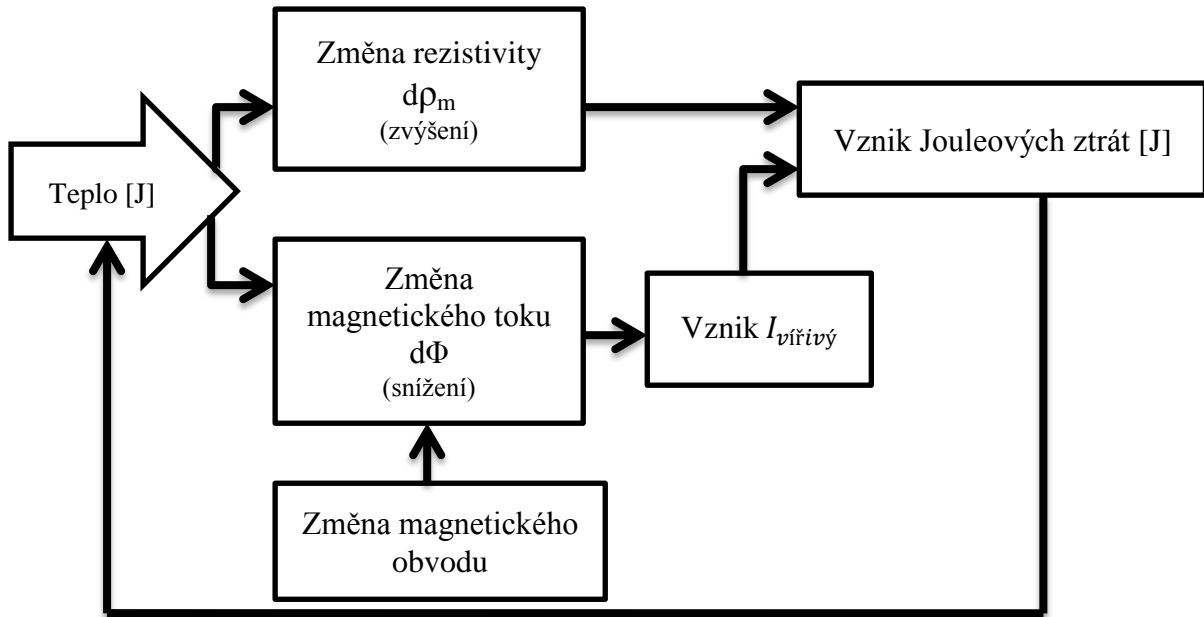
Změna magnetického indukčního toku permanentního magnetu, dána vlivem zvýšení teploty, nebo změnou magnetického obvodu, může v objemu PM vyvolat elektrický proud (vířivý proud), který by společně s rezistivitou vytvářel Jouleovo teplo (4.5)

$$P_v = \rho_m \frac{l_m}{s_m} \cdot I_{\text{vířivý}}^2 \quad (4.5)$$

Teplo vznikající v PM následkem teplotní závislosti magnetického toku obvodem (B_r , H_c , BH_{max}) by zvyšovalo ρ_m a tím by vznikalo další teplo. Závislost rezistivity na teplotě se dá vyjádřit vzorcem (4.6) pro Sm-Co PM a (4.7) pro axiálně magnetizovaný NdFeB PM, u kterých teplotní charakteristika není tolik lineární. Hodnoty a , b , c jsou konstanty získané z měření závislosti rezistivity, pro pracovní rozsah teplot -50 °C až 150°C. [11]

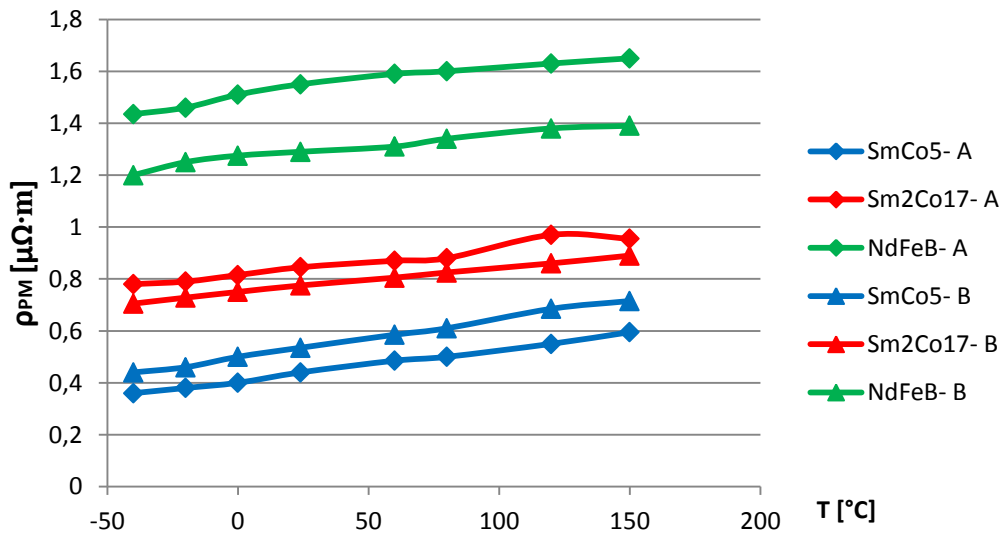
$$\rho_m = b \cdot T + a \quad (4.6)$$

$$\rho_m = c \cdot T^2 + b \cdot T + a \quad (4.7)$$



Obr. 4.6 Koloběh tepla z vířivých proudů.

PM ze vzácných zemin, mají převážně anizotropní chování, rozdíl rezistivity mezi příčně a osově orientovaným PM se liší v průměru o 20 %. Na obr. 4.7 je zobrazena tepelná závislost rezistivity pro A – axiálně magnetované PM, B- příčně magnetované PM.

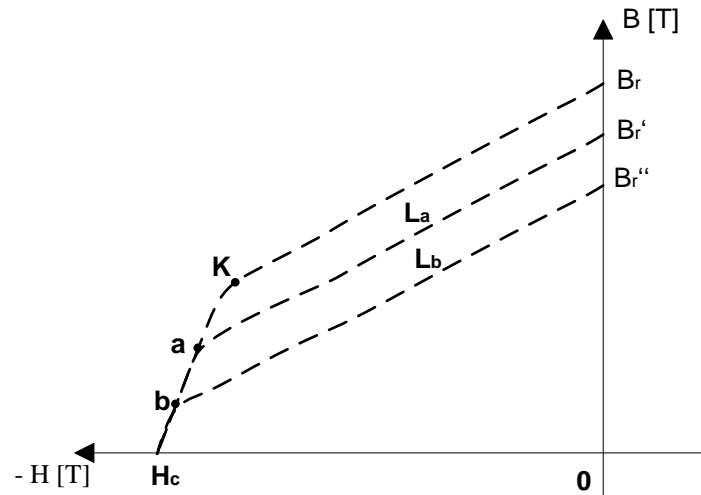


Obr. 4.7 Závislost rezistivity na teplotě při axiálním magnetizování. [11]

Do slitiny NdFeB magnetů se v některých případech přidává dysprosium, kvůli zvýšení vnitřní koercivity a snížení remanence. Tímto se změní chemické složení, ale rezistivita zůstává konstantní, což je znázorněno na měření v [11], pro množství 1- 9 % Dy v obsahu.

4.5. Demagnetizace zapříčiněná vlivem teploty

Působením vnějšího demagnetizačního pole H_a , se pracovní bod na demagnetizační křivce přesune pod kolenem K, na bod a. Pokud přestaneme působit intenzitou H_a , zůstane pracovní bod na demagnetizační charakteristice L_a . Jestliže budeme aplikovat intenzitou H_b , dostaneme se na bod b, kde se po odeznění pole stabilizuje bod na křivce L_b . Původní křivka i L_a budou nevratně zničeny. Menší koercivita materiálu a působení velkého magnetického pole, zapříčiní změnu magnetizace zrn. [12]



Obr. 4.8 Zobrazení nevratné demagnetizace PM. [12]

Tato demagnetizace nemusí být oproti celkové síle magnetu, tak razantně zásadní. Ale jedná se o nevratné snížení účinnosti, efektivnosti stroje, proto by při návrhu měl být brán ohled na dostatečné chlazení. Popřípadě při konstrukci stroje počítat s nižší charakteristikou, aby se zmaření stroje předešlo. Nejlepším řešením je vytvořit model v některé 3-D, 2-D aplikaci metodou konečných prvků a podrobit ho teplotní zatížitelnosti.

4.6. Řešení magnetického obvodu pomocí MKP

Při řešení se vycházelo z konstantního teplotního koeficientu daného výrobními parametry konkrétního PM. Změna parametrů bude dána rovnicemi (4.8),(4.9).

$$B_r = B_{r20} \cdot \left[1 + \frac{\alpha_{Br}}{100} (\vartheta_m - 20) \right] \quad (4.8)$$

$$H_{ic} = H_{ic20} \cdot \left[1 + \frac{\alpha_{iHc}}{100} (\vartheta_m - 20) \right] \quad (4.9)$$

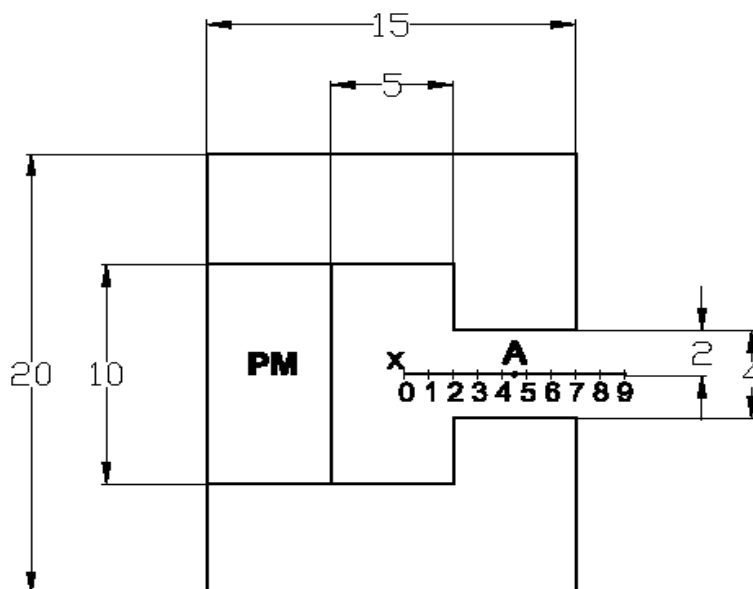
Pro řešení teplotní závislosti byly vybrány magnety od německého výrobce Vacuumschmelze, což je přední světový výrobce kovových materiálů se speciálními fyzikálními vlastnostmi. Tato společnost se mimo jiné zabývá PM ze vzácných zemin, pro které má označení:

- Vacomax - veškeré samariové PM,
- Vacodym - veškeré neodymové PM, včetně jejich sloučenin s Dy.

Označení magnetu trojčíslím označuje jeho teplotní závislost, korozní odolnost, povrchovou úpravu a hlavní magnetické parametry. Poslední dvoj písmenné označení rozděluje způsob lisování při výrobě:

- HR - izostatické lisování,
- TP - nástrojové lisování (síla působí ze všech stran),
- AP - nástrojové lisování (síla působí pouze v jednom směru).

Pro modelování byla zvolena aplikace FEMM, jedná se o magnetický obvod totožný s obr. 2.5. Obvod je tvořen feromagnetikem o relativní permeabilitě $\mu_r = 2000$ a vzduchovou mezerou o permeabilitě vakua. Na obr. 4.9 jsou zobrazené rozměry řešeného obvodu. Legendy magnetické indukce jsou pro možné porovnání v rozsahu: 0 – 1,0 T. Pro magnet Vacodym 633 HR je maximální pracovní teplota 110 °C a chování ve vyšší teplotě už nemusí být lineární.

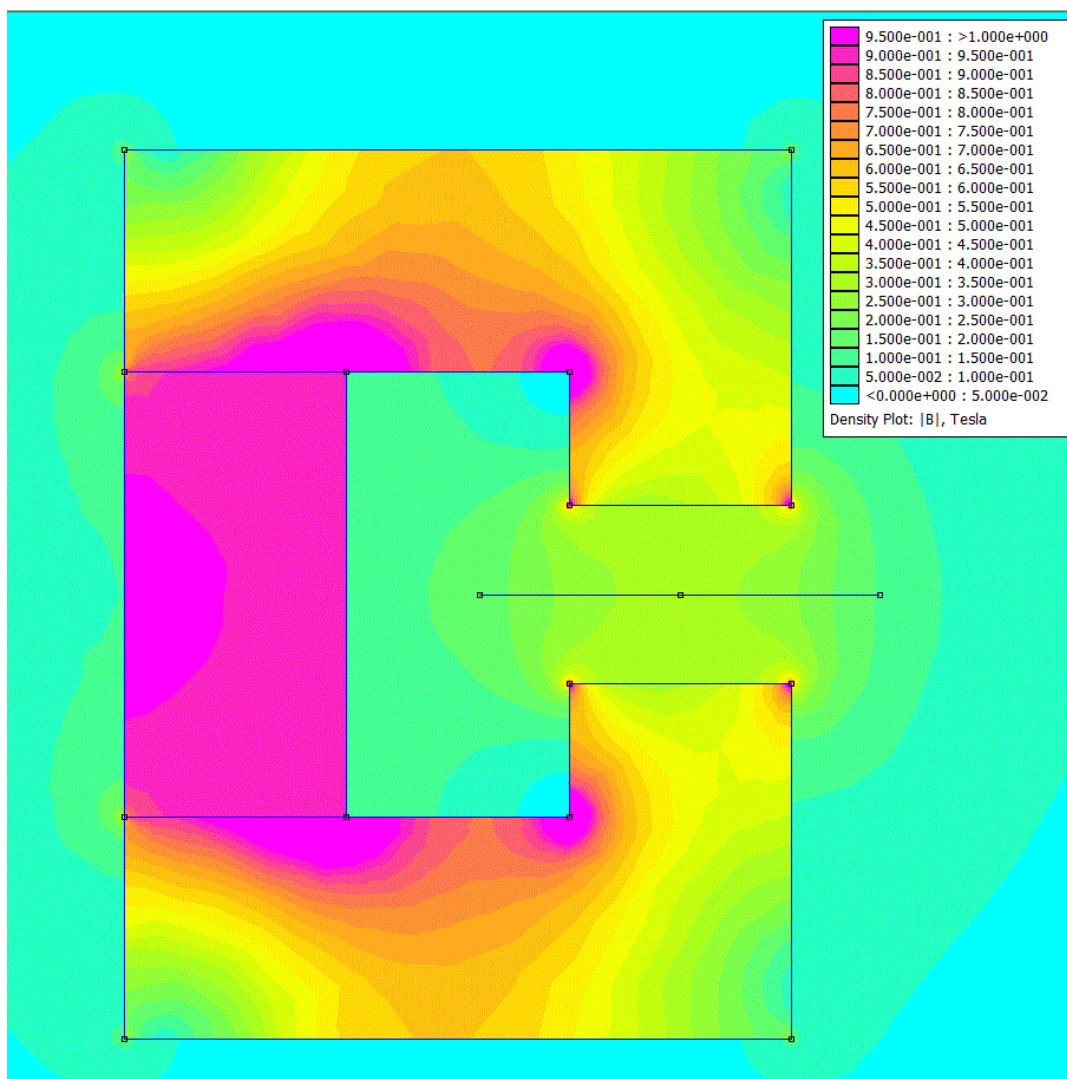


Obr. 4.9 Výkres magnetického obvodu.

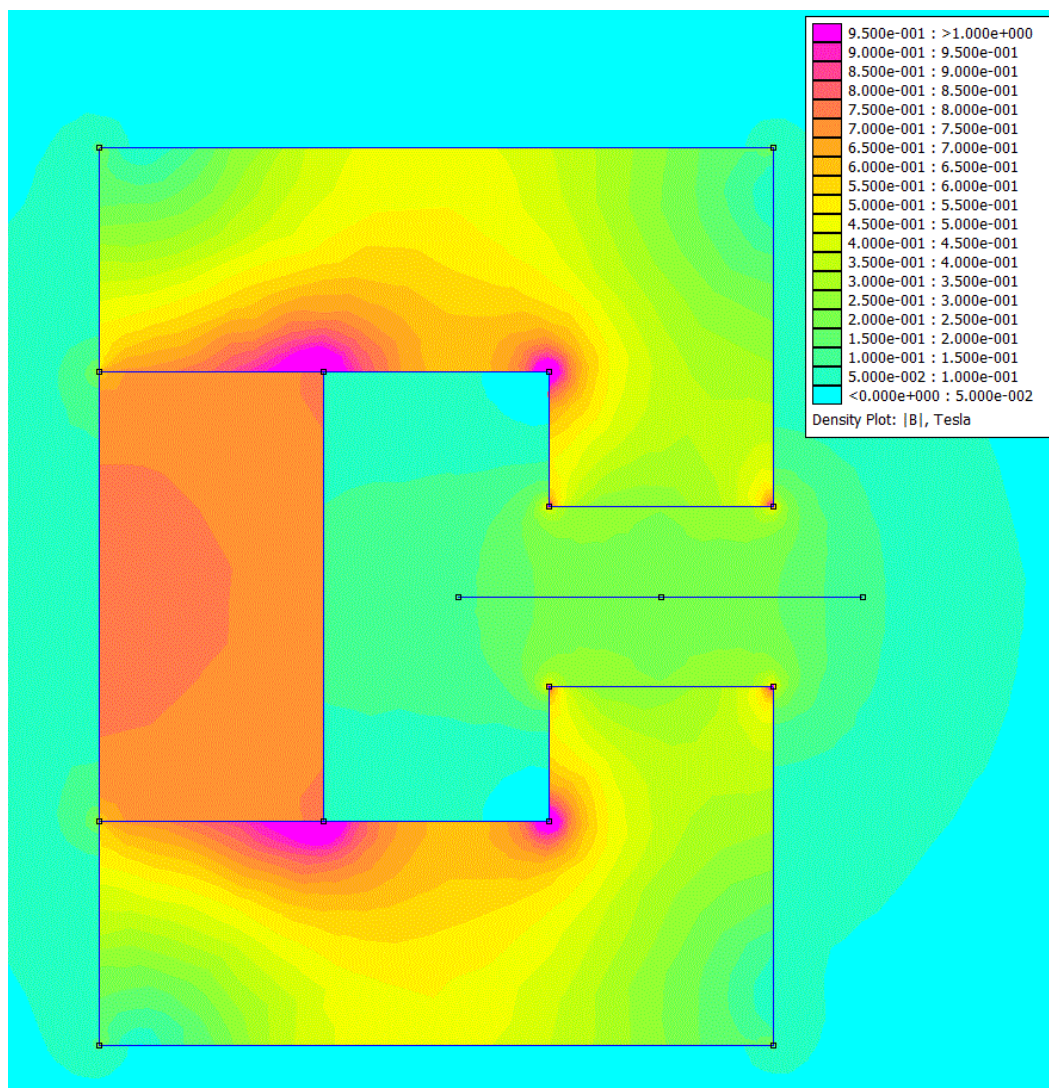
4.6.1. Model teplotní závislosti $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ Vacomax 240 HR

remanentní indukce B_r	1.12 [T]
koercivita H_c	730 [kA/m]
vnitřní koercivita H_{ic}	640 [kA/m]
maximální energetický součin BH_{\max}	240 [kJ/m ³]
relativní permeabilita μ_r	1.39 [-]
teplotní koeficient α_B pro 20 až 100 °C	-0.030 [%/°C]
teplotní koeficient α_{iH} pro 20 až 100 °C	-0.15 [%/°C]
teplotní koeficient α_B pro 20 až 150 °C	-0.035 [%/°C]
teplotní koeficient α_{iH} pro 20 až 150 °C	-0.16 [%/°C]
maximální provozní teplota T_{\max}	300 [°C]

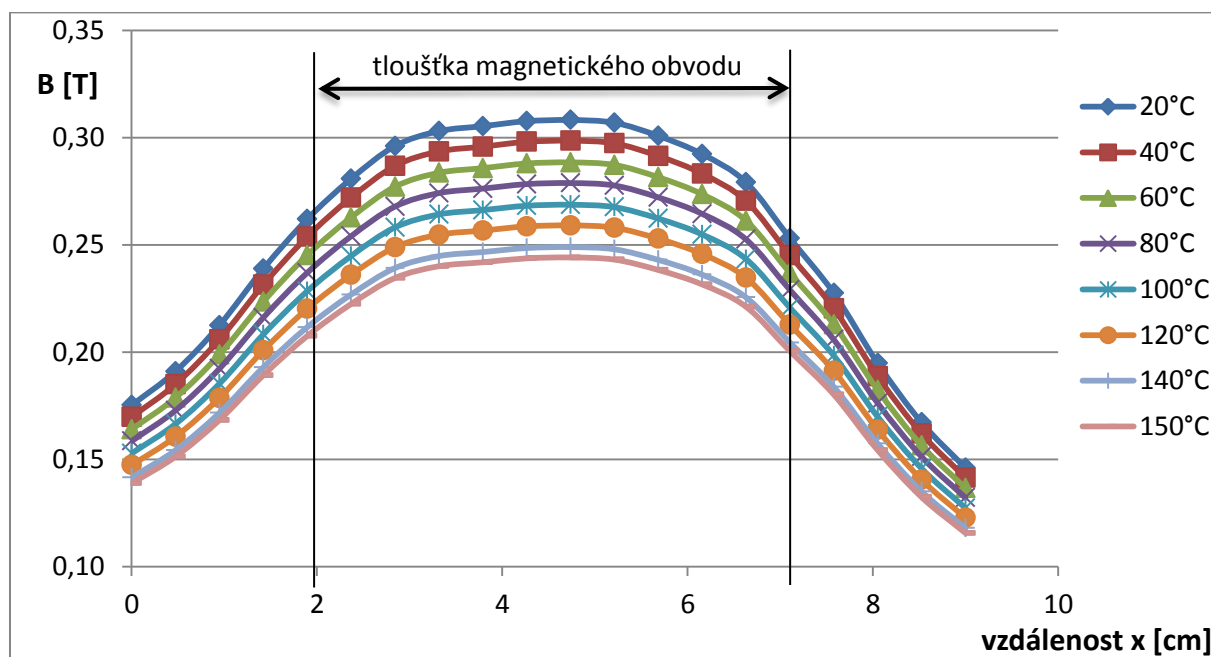
Tab. 4.1 Katalogové parametry PM $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ Vacomax 240 HR [13]



Obr. 4.10 Rozložení magnetické indukce magnetu Vacomax 240 HR při 20 °C.



Obr. 4.11 Rozložení magnetické indukce magnetu Vacomax 240 HR při 150 °C.

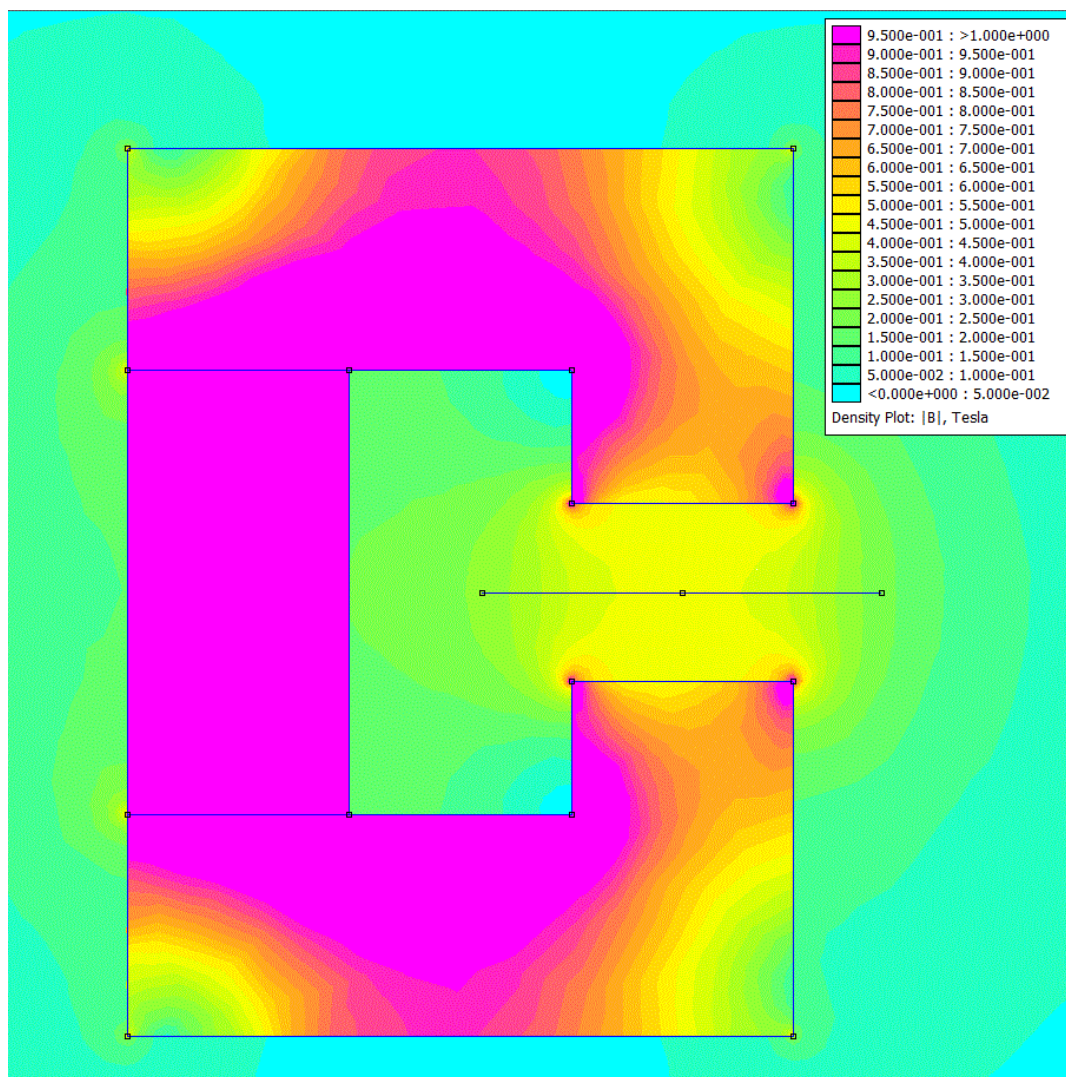


Obr. 4.12 Magnetická indukce na úsečce x ve vzduchové mezeře magnetu Vacomax 240 HR.

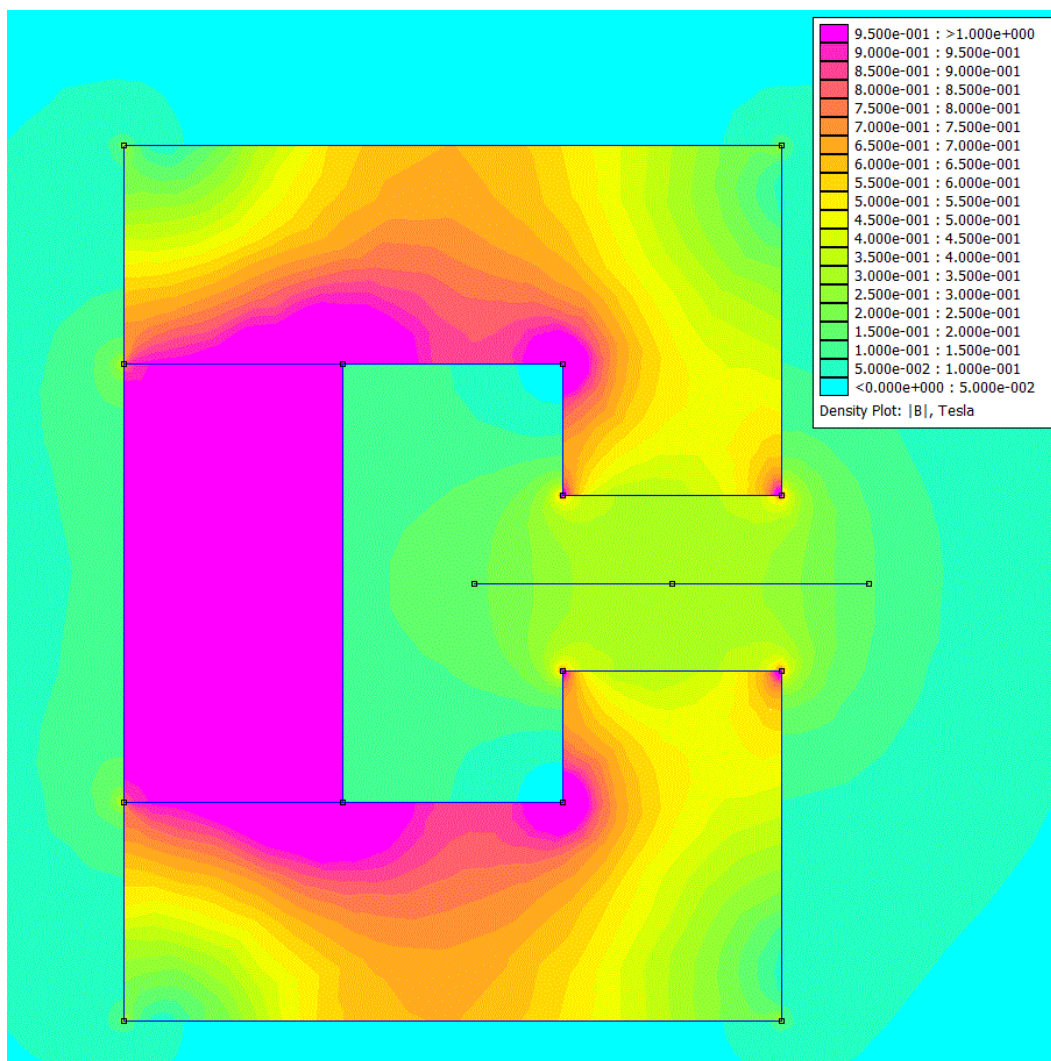
4.6.2. Model teplotní závislosti SmCo₅ Vacomax 200 HR

remanentní indukce B_r	1.01 [T]
koercivita H_c	755 [kA/m]
vnitřní koercivita H_{ic}	995 [kA/m]
maximální energetický součin BH_{max}	200 [kJ/m ³]
relativní permeabilita μ_r	1.34 [-]
teplotní koeficient α_B pro 20 až 100 °C	-0.040 [%/°C]
teplotní koeficient α_{iH} pro 20 až 100 °C	-0.21 [%/°C]
teplotní koeficient α_B pro 20 až 150 °C	-0.045 [%/°C]
teplotní koeficient α_{iH} pro 20 až 150 °C	-0.22 [%/°C]
maximální provozní teplota T_{max}	250 [°C]

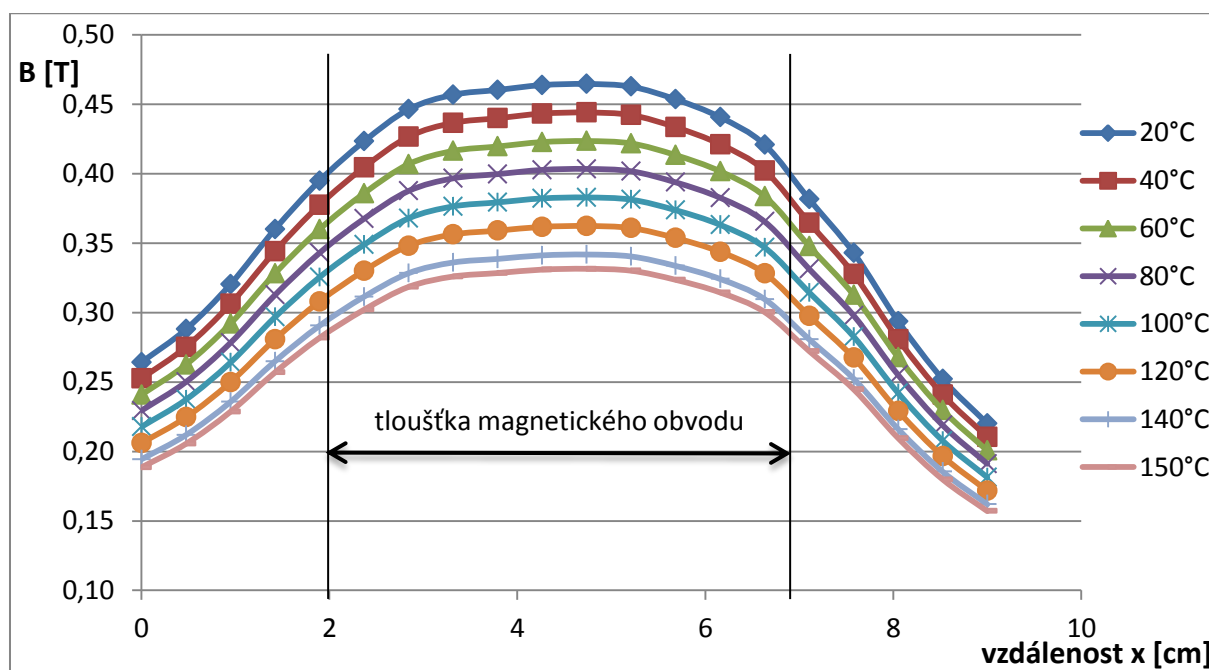
Tab. 4.2 Katalogové parametry PM SmCo₅ Vacomax 200 HR [13]



Obr. 4.13 Rozložení magnetické indukce magnetu Vacomax 200 HR při 20 °C.



Obr. 4.44 Rozložení magnetické indukce magnetu Vacomax 200 HR při 150 °C.

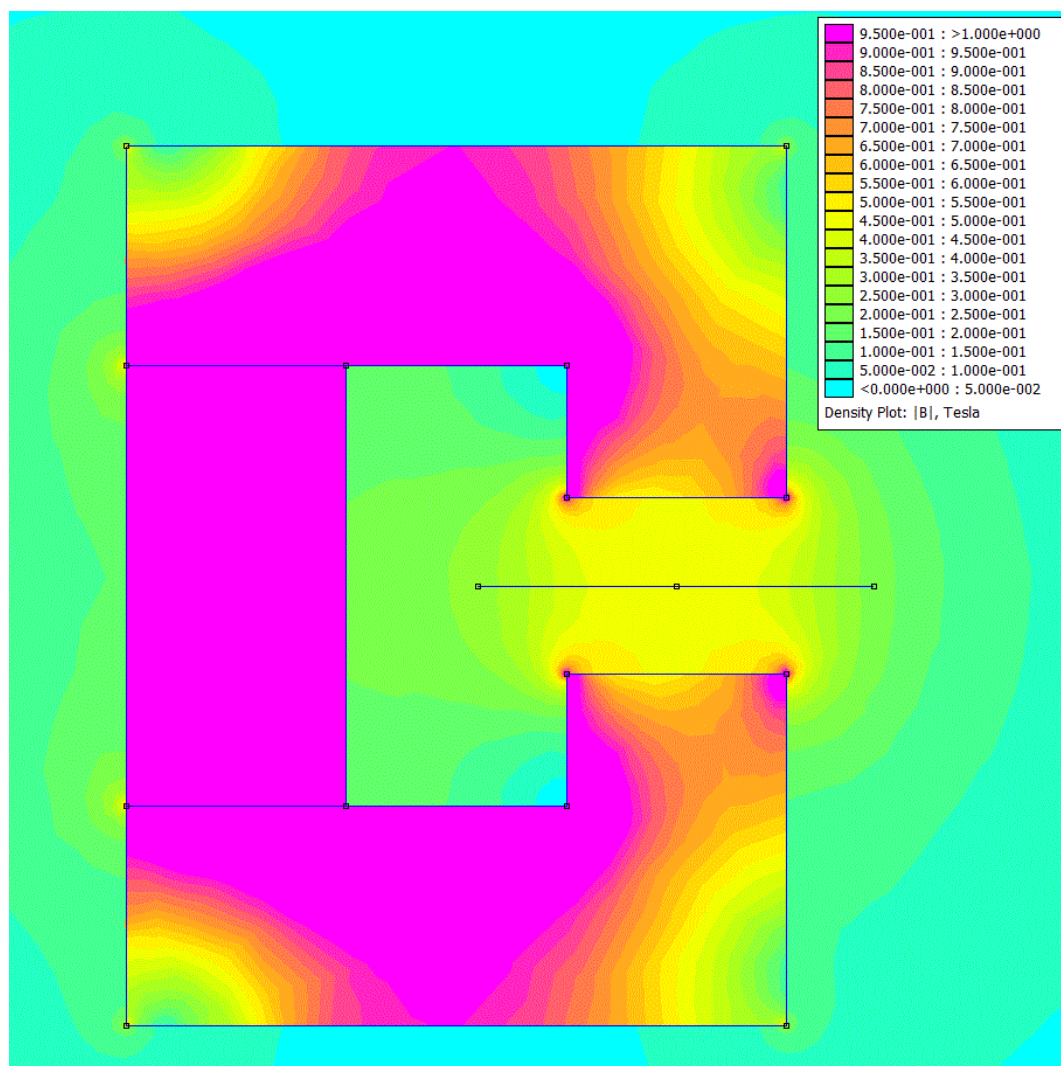


Obr. 4.15 Magnetická indukce na úsečce x ve vzduchové mezeře magnetu Vacomax 200 HR.

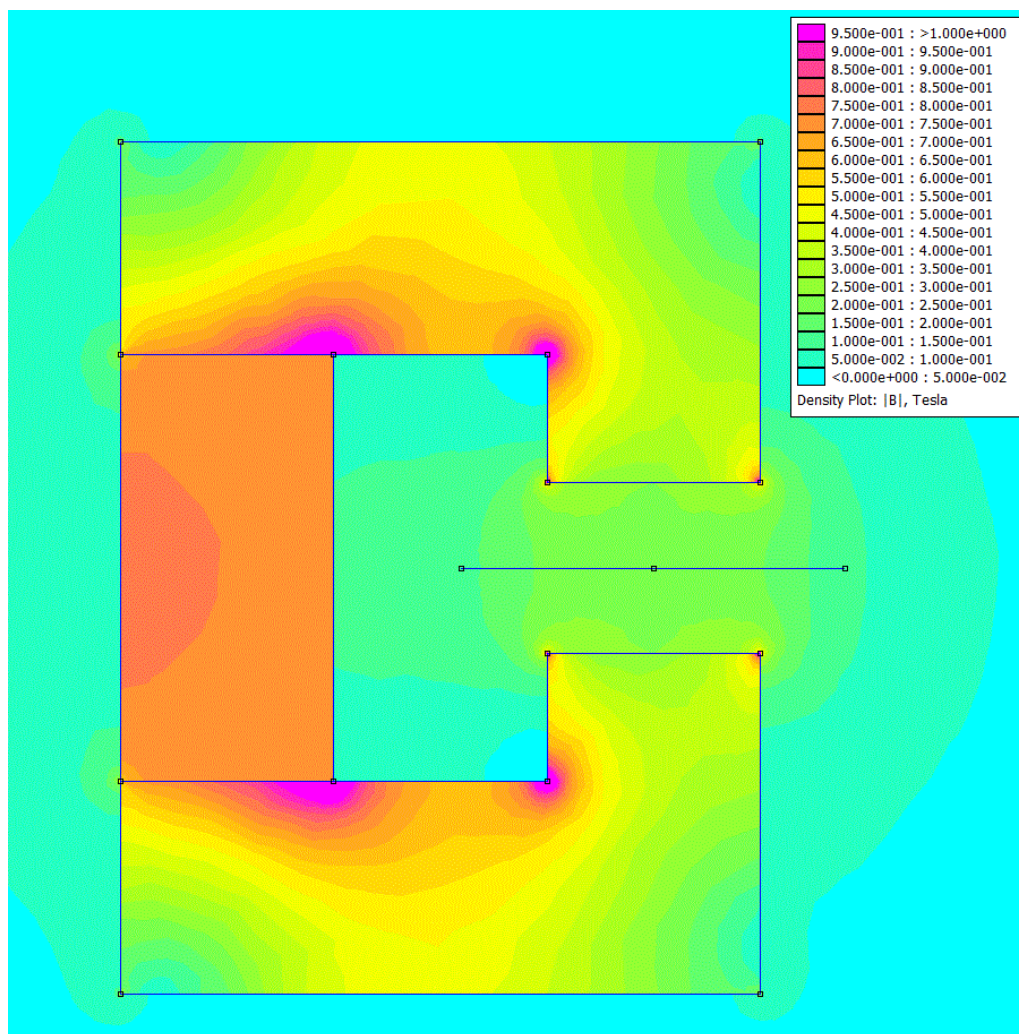
4.6.3. Model teplotní závislosti NdFeB Vacodym 633 HR

remanentní indukce B_r	1.32 [T]
koercivita H_c	1040 [kA/m]
vnitřní koercivita H_{ic}	1280 [kA/m]
maximální energetický součin BH_{max}	350 [kJ/m ³]
relativní permeabilita μ_r	1.05 [-]
teplotní koeficient α_B pro 20 až 100 °C	-0.095 [%/°C]
teplotní koeficient α_{iH} pro 20 až 100 °C	-0.65 [%/°C]
teplotní koeficient α_B pro 20 až 150 °C	-0.105 [%/°C]
teplotní koeficient α_{iH} pro 20 až 150 °C	-0.55 [%/°C]
maximální provozní teplota T_{max}	110 [°C]

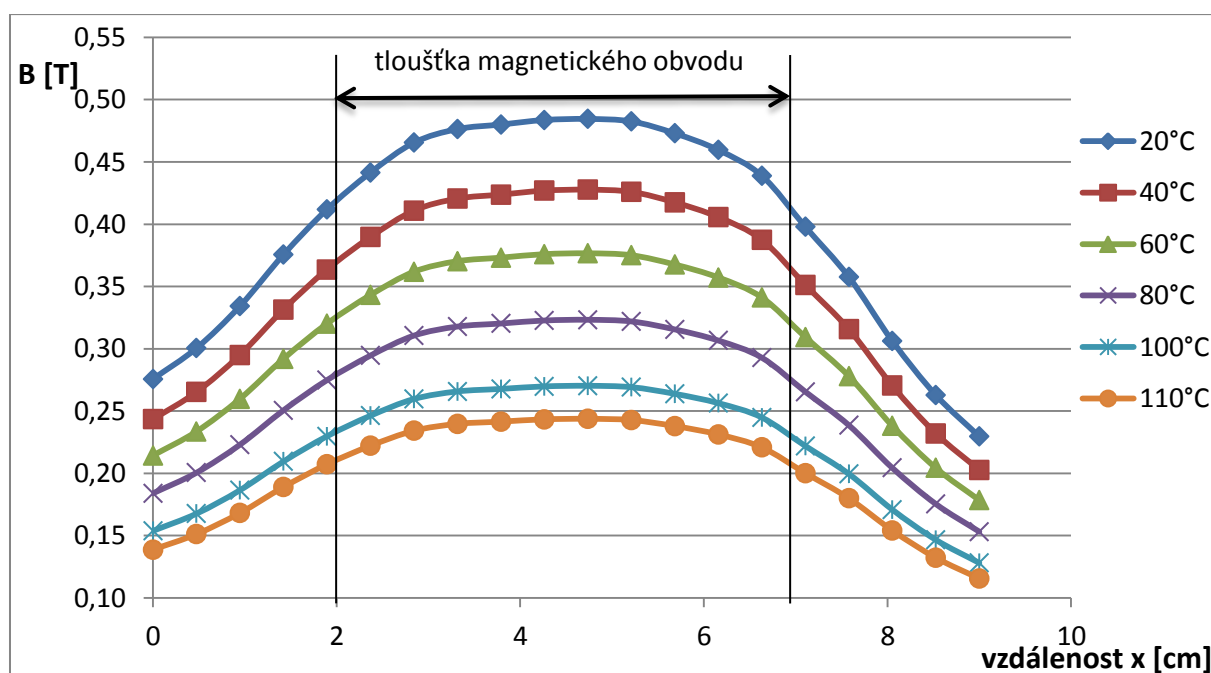
Tab. 4.3 Katalogové parametry PM NdFeB Vacodym 633 HR [13]



Obr. 4.16 Rozložení magnetické indukce magnetu Vacodym 633 HR při 20 °C.

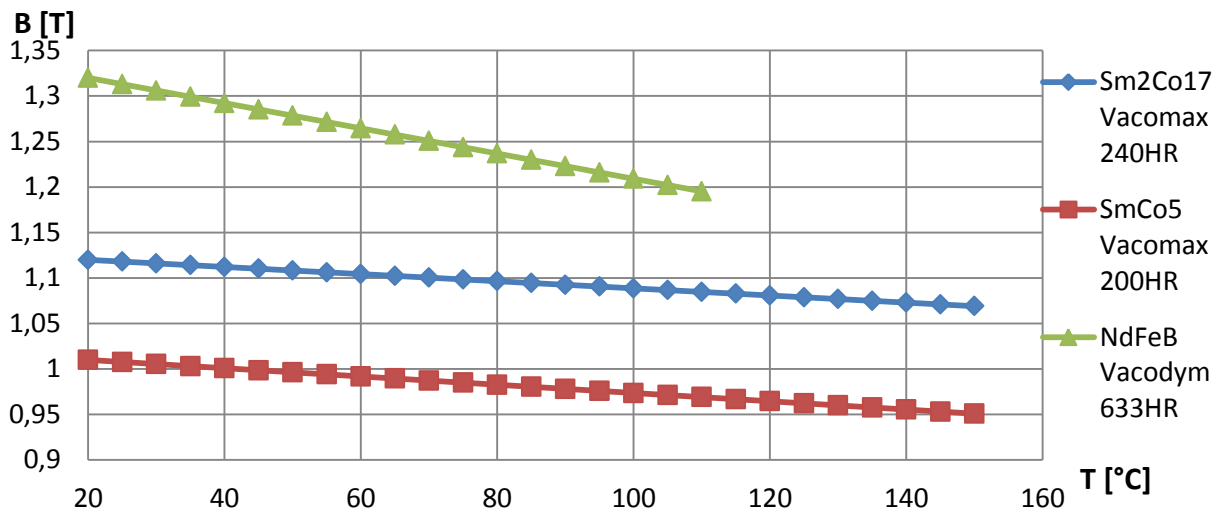


Obr. 4.17 Rozložení magnetické indukce magnetu Vacodym 633 HR při 110 °C.

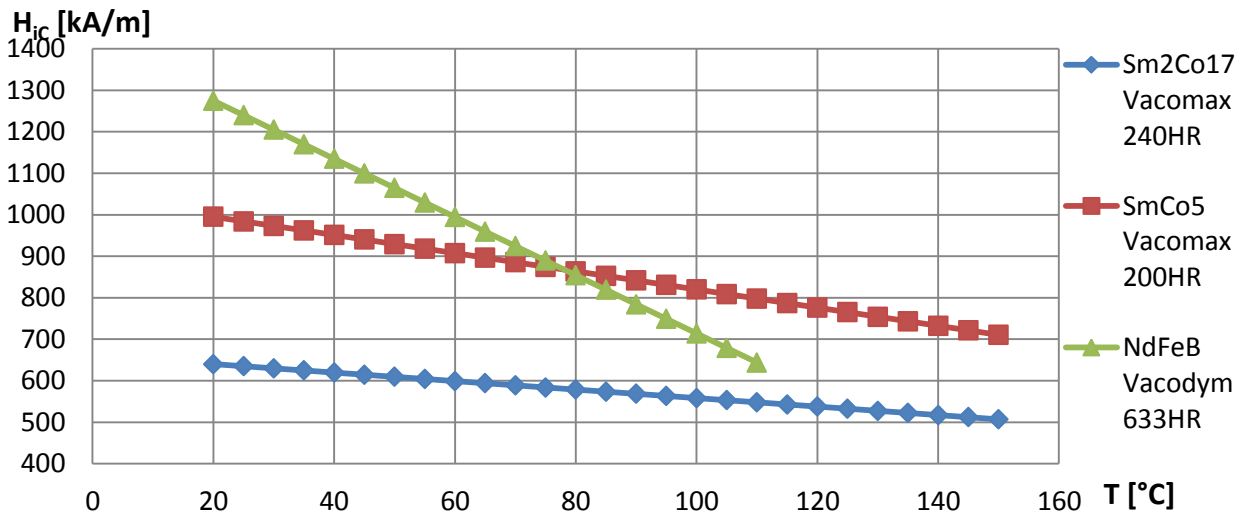


Obr. 4.18 Magnetická indukce na úsečce x ve vzduchové mezeře magnetu Vacodym 633 HR.

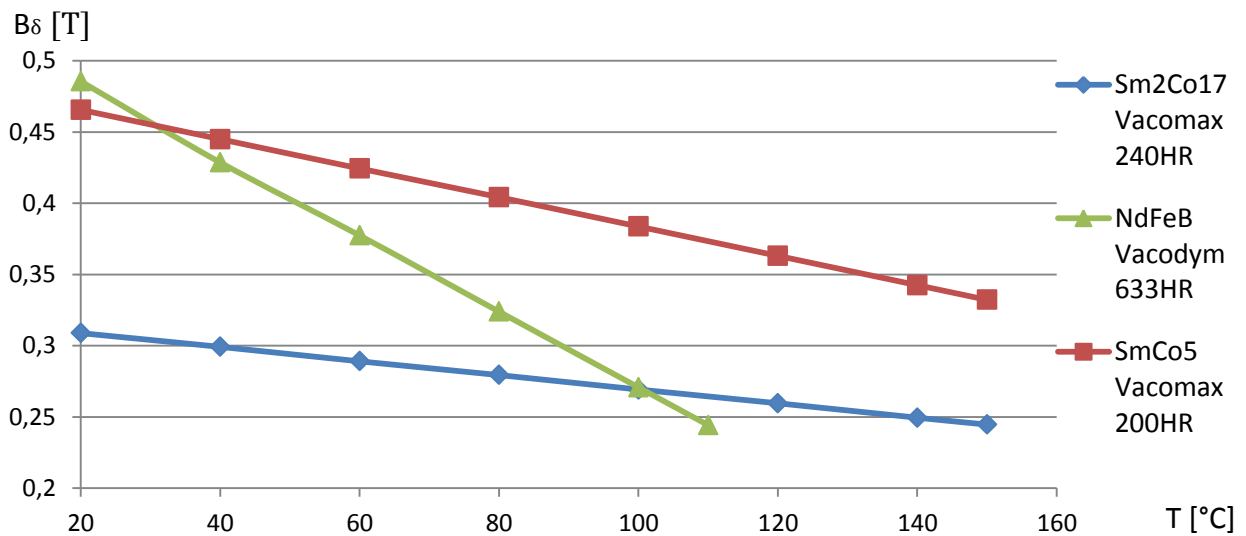
4.6.4. Grafické porovnání modelovaných PM



Obr. 4.19 Porovnání Teplotních závislostí magnetické indukce samotných PM.



Obr. 4.20 Porovnání teplotních závislostí vnitřní koercivity samotných PM.



Obr. 4.21 Porovnání magnetických indukci v bodě A vzduchové mezery obvodu.

Závěr

Před uvedením problematiky PM ze vzácných zemin bylo třeba seznámit s těmito materiály. První kapitola poskytuje základní informace, které jsou potřeba při návrhu magnetického obvodu. Jedná se o získání základního prvku pro výrobu magnetu, samotnou výrobu magnetu a v neposlední řadě jejich povrchová úprava, kde bylo snahou přiblížit k její nutnosti u NdFeB magnetů. Řešený obvod představoval jednoduchý elementární obvod, k jehož vyřešení při zanedbání rozptylového toku stačí znát rozměry prvků v obvodu. PM se chová jako stejnosměrný zdroj magnetického toku, a před jeho zařazením do obvodu je nutné spočítat místo pracovního bodu, abychom věděli v jakých hodnotách magnetické remanence a koercivity se obvod pohybuje.

Druhá část práce týkající se tepelné závislosti PM je řešena pomocí softwaru FEMM a porovnána jednotlivé typy magnetů. Z obrázků v poslední kapitole je zřejmá jejich teplotní závislost. Největší ztráta magnetické indukce při změně teploty převládá u neodymových magnetů, kde magnetická indukce ve vzduchové mezeře při teplotě 100 °C se rovná nejslabšímu z měřených magnetů $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$. Pro stroje používané v nízkých teplotách (do ~60 - 80 °C) se vyplatí cenově přijatelné NdFeB magnety. Pro vyšší teploty je lepší zvolit samariové magnety. Pomocí modelování MKP lze velmi dobře chování PM při vyšších teplotách porovnat a následně vybrat vhodný z nich pro předem stanovenou pracovní teplotu.

Seznam použité literatury

- [1] HANSELMAN, Duane C. Brushless permanent-magnet motor design. New York: McGraw-Hill, c1994, x, 191 p. ISBN 00-702-6025-7.
- [2] VIDLIČKA, Marian. Permanentní magnety. [online]. s. 44 [cit. 2013-03-31].
- [3] GREENWOOD, N a Alan EARNSHAW. Chemie prvků. 1. vyd. Praha: Informatorium, 1993, s. 1-793. ISBN 80-85427-38-9.
- [4] BARTOŠ, Václav, Josef ČERVENÝ, Josef HRUŠKA, Anna KOTLANOVÁ a Bohumil SKALA. Elektrické stroje. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2006. ISBN 978-807-0434-444.
- [5] GIERAS, Jacek F a Mitchell WING. Permanent magnet motor technology: design and applications. 2nd ed., rev. and expanded. New York: Marcel Dekker, c2002, 590 p. ISBN 08-247-0739-7.
- [6] MEEKER, David. Magnetic Circuit Derivation of Energy Stored in a Permanent Magnet. Finite Element Method Magnetism: PMEnergy [online]. 2007, č. 4, 2010-12-27 [cit. 2013-04-26]. Dostupné z: <http://www.femm.info/wiki/PMEnergy>
- [7] ANDREWS, C.M. Understanding Permanent Magnets. Group Arnold [online]. 1998, s. 5 [cit. 2013-04-28]. Dostupné z: <http://www.arnoldmagnetics.com/WorkArea/DownloadAsset.aspx?id=4461>
- [8] BŘEZOVÁ, Kateřina. Jak moc vzácné jsou vzácné zeminy?. Blog - Kateřina Březová [online]. 2012, 2012-09-12 [cit. 2013-05-27]. Dostupné z: <http://brezova.blog.idnes.cz/c/294022/Jak-moc-vzacne-jsou-vzacne-zeminy.html>
- [9] ŠTĚPÁN, Jaroslav. Permanentní magnety. Plzeň, 2007. Bakalářská práce. ZČU v Plzni. Vedoucí práce Ing. Daniel Vachtl.
- [10] LIU, Sam a G. Edward KUHLMANN. Temperature Coefficients of Rare Earth Permanent Magnets. IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS. 1999, NO. 5, SEPTEMBER, č. 35, s. 3.
- [11] RUOHO, Sami, Minna HAAVISTO, Eelis TAKALA, Timo SANTA-NOKKI a Martti PAJU. Temperature Dependence of Resistivity of Sintered Rare-Earth Permanent-Magnet Materials. IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS. JANUARY 2010, roč. 46, č. 1, s. 6.
- [12] ZHOU, P., Y. XIAO, N. LAMBERT a M.A. RAHMAN. Temperature-Dependent Demagnetization Model of Permanent Magnets for Finite Element Analysis. IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS. 2012, roč. 48, 2, FEBRUARY, s. 4.
- [13] Selten erd dauermagnete: VACODYM, VACOMAX. VACUUMSCHMELZE. VAC [online]. [cit. 2013-06-05]. Dostupné z: http://www.vacuumschmelze.de/fileadmin/Medienbibliothek_2010/Downloads/DM/Vdym_Vmax_de.pdf

Příloha

Oxide	Original \$/Kg	*verringertes \$/kg
Lanthanum	\$ 15.00	\$ 11.25
Cer	\$ 10.00	\$ 7.50
Praseodym	\$ 76.00	\$ 57.00
Neodym	\$ 77.00	\$ 57.75
Samarium	\$ 12.00	\$ 9.00
Europium	\$ 905.00	\$ 678.75
Gadolinium	\$ 45.00	\$ 33.75
Terbium	\$ 980.00	\$ 735.00
Dysprosium	\$ 800.00	\$ 600.00
Yttrium	\$ 28.00	\$ 21.00
**Ashram Warenkorbpreis (Gesamtressource)	\$ 35.03	\$ 26.27
***Warenkorbpreis (Tagebauressource)	\$ 38.43	\$ 28.82

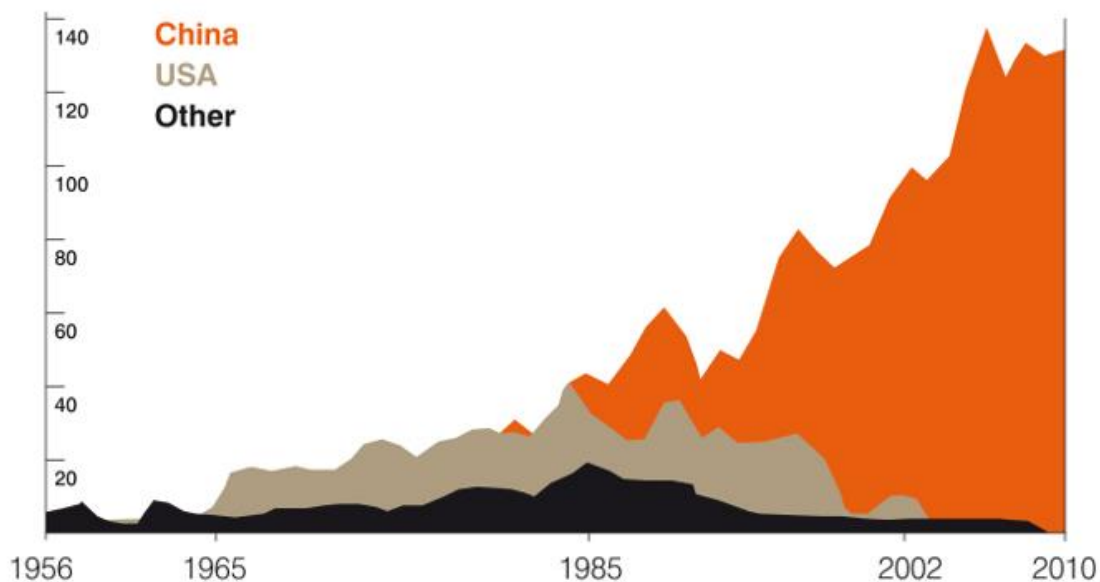
* Discount von 25% auf jedes einzelne Oxid

** Ressource Stand 6. März 2012

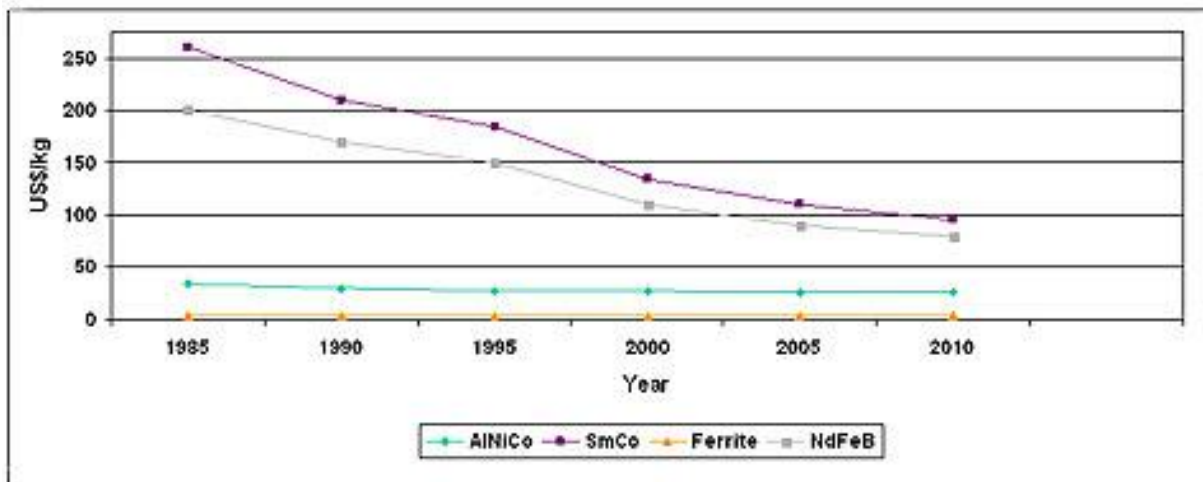
*** siehe Tabelle 2 in dieser Pressemitteilung

Obr. P1 Cena čistého prvku vzácné zeminy v US \$

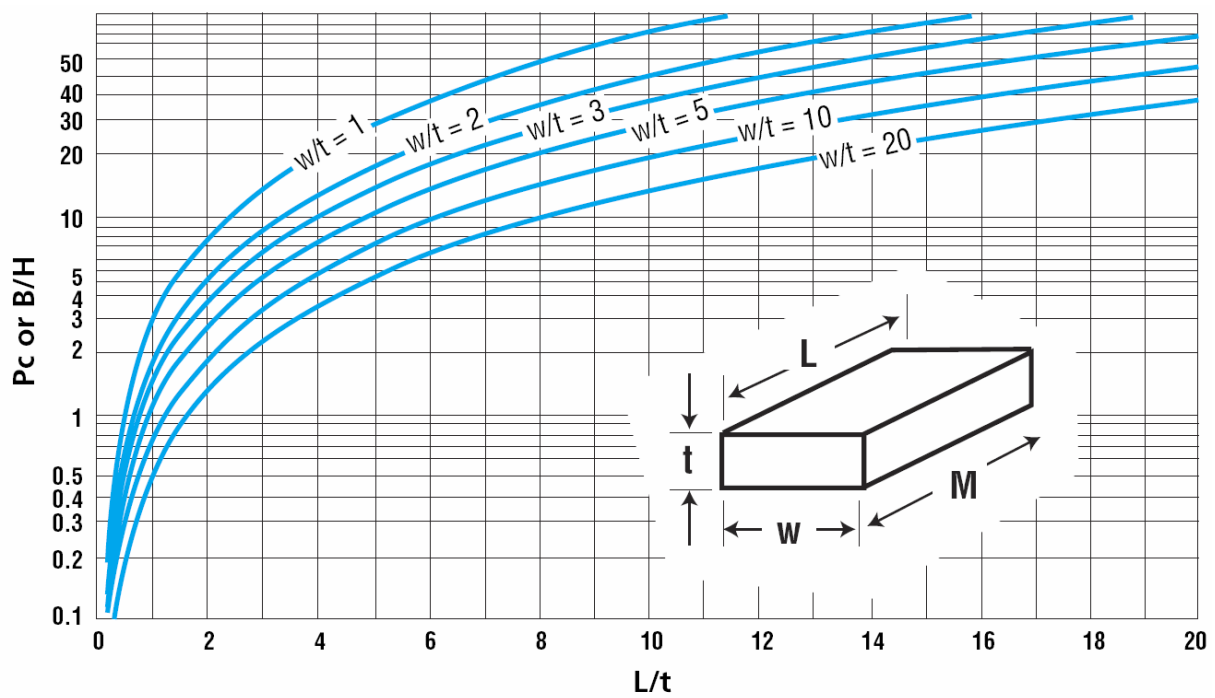
Global Rare Earth Metal Oxide Production (,000 tonnes)



Obr. P2 Světová produkce oxidů kovů vzácných zemin v 1000x tun



Obr. P3 Průměrná tržní hodnota 1 kg v US \$



$$\text{Formula is } Pc = B/H = (1.77 \cdot Lw/t) \cdot (L \cdot (w+t) + w \cdot t)^{-0.5}$$

Obr. P4 Hodnota koeficientu permeance kvádrového PM ze vzácných zemin