

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Permanентní magnety pro PMSM

**vedoucí práce: Ing. Pavel Světlík
autor: Pavel Kuřil**

2014

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Pavel KUŘIL**
Osobní číslo: **E11B0053K**
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Permanentní magnety pro PMSM**
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

V úvodní části student popíše provedení synchronních strojů s vnitřním a vnějším rotorem. Výhody a nevýhody jednotlivých uspořádání.

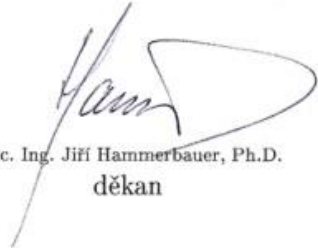
1. Provedení rotorů synchronních strojů s permanentními magnety (PM), porovnání vlastností.
2. Popište PM ze vzácných zemin na bázi Nd.
3. Popište PM ze vzácných zemin na bázi Sm.
4. Popište PM na bázi feritu.
5. Porovnejte jejich vlastnosti (magnetismus, životnost, teplotní závislost).

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

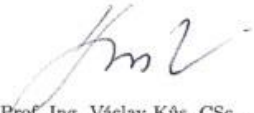
1. Hrabovcová, V.: Moderné elektrické stroje. EDIS Žilina 2001
2. Bartoš, V.: teorie elektrických strojů. Skripta ZCU, Plzeň 2006
3. Trinkewitz, Z.: průmyslové zkoušky velkých elektrických strojů točivých. SNTL Praha 1984

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

Datum zadání bakalářské práce: **14. října 2013**
Termín odevzdání bakalářské práce: **9. června 2014**


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




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

Anotace

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na přehled o permanentních magnetech a jejich použití u synchronních motorů.

Klíčová slova

Permanentní magnety, slitiny AlNiCo, feritové permanentní magnety, samariové permanentní magnety, neodymové permanentní magnety, synchronní motory, remanence, koercitivita, energetický součin.

Abstract

This thesis is focused on an overview of the permanent magnets and their use in synchronous motors.

Key words

Permanent magnets, alloys AlNiCo, ferrite permanent magnets, samarium permanent magnets, neodymium permanent magnets, synchronous motors, remanence, coercivity, energy product.

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 diplomové práce.

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

V Plzni dne 9.6.2014

Pavel Kuřil

.....

Poděkování

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

Obsah

OBSAH.....	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	10
ÚVOD.....	12
1 MAGNETISMUS.....	13
1.1 MAGNETICKÝ JEV.....	13
1.2 ROZDĚLENÍ MATERIÁLŮ PODLE ÚČINKŮ VNĚJŠÍHO MAGNETICKÉHO POLE.....	15
1.3 PRVOTNÍ MAGNETIZAČNÍ KŘIVKA.....	16
1.4 VLIV TEPLoty.....	18
1.5 MAGNETOSTRIKCE.....	19
2 PERMANENTNÍ MAGNETY	20
2.1 PERMANENTNÍ MAGNETISMUS.....	20
2.2 MAXIMÁLNÍ ENERGETICKÝ SOUČIN $(BH)_{max}$	22
2.3 STABILIZACE PERMANENTNÍCH MAGNETŮ.....	23
2.4 MATERIÁLY PERMANENTNÍCH MAGNETŮ NA BÁZI RŮZNÝCH SLITIN.....	24
2.5 FERITOVÉ PERMANENTNÍ MAGNETY.....	25
2.6 PERMANENTNÍ MAGNETY ZE VZÁCNÝCH ZEMIN.....	27
2.6.1 Samariové permanentní magnety.....	27
2.6.2 Neodymové permanentní magnety.....	29
2.7 POUŽITÍ PERMANENTNÍCH MAGNETŮ V ELEKTRICKÝCH STROJÍCH.....	30
2.8 POROVNÁNÍ PERMANENTNÍCH MAGNETŮ.....	32
2.8.1 Magnetické vlastnosti.....	32
2.8.2 Životnost permanentních magnetů.....	33
2.8.3 Teplotní závislost permanentních magnetů.....	35
2.8.4 Odolnost permanentních magnetů proti korozi.....	36
2.8.5 Prodej permanentních magnetů.....	37
3 SYNCHRONNÍ MOTORY S PERMANENTNÍMI MAGNETY.....	39
3.1 SYNCHRONNÍ MOTORY S PERMANENTNÍMI MAGNETY S VNITŘNÍM ROTOREM.....	40
3.1.1 PMSM s povrchovým uspořádáním magnetů na rotoru.....	41
3.1.2 PMSM s povrchovým uspořádáním magnetů uvnitř rotoru.....	41
3.1.3 Diskové PMSM.....	43
3.2 SYNCHRONNÍ MOTORY S PERMANENTNÍMI MAGNETY S VNĚJŠÍM ROTOREM.....	45

3.3 POROVNÁNÍ PROVEDENÍ PMSM S VNĚJŠÍM A VNITŘNÍM ROTOREM.....	47
3.4 REGULACE SYNCHRONNÍCH MOTORŮ S PERMANENTNÍMI MAGNETY	48
3.4.1 Vektorové řízení.....	48
ZÁVĚR.....	49
POUŽITÁ LITERATURA.....	50

Seznam symbolů a zkratek

A [Am^{-1}]	Měrné povrchové zatížení povrchu kotvy
B [T]	Magnetická indukce
B_r [T]	Remanentní magnetická indukce
B_δ [T]	Magnetická indukce ve vzduchové mezeře
$(BH)_{max}$ [Jm^{-3}]	Maximální energetický součin
D [m]	Průměr kotvy
H [Am^{-1}]	Intenzita magnetického pole
H_c [Am^{-1}]	Koercitivní intenzita magnetického pole
I [A]	Elektrický proud
J [T]	Magnetická polarizace
l [m]	Délka
l_{Fe} [m]	Délka kotvy
M [Am^{-1}]	Magnetizace
M_e [Nm]	Moment elektromagnetický
m [Am^{-2}]	Magnetický moment
m [kg]	Hmotnost
p [-]	Počet pólových dvojic
P_i [W]	Výkon vnitřní
S [m^2]	Obsah
T [$^\circ\text{C}$]	Termodynamická teplota
T_C [$^\circ\text{C}$]	Curieho teplota
U_s [V]	Svorkové napětí
U_{ib} [V]	Vnitřní budicí napětí
V [m^3]	Objem
X_d [Ω]	Reaktance v ose d
X_q [Ω]	Reaktance v ose q
β [$^\circ$]	Zátěžný úhel

κ_m [-].....	Magnetická susceptibilita
φ [°].....	Fázový posun
λ [-].....	Koeficient magnetostrikce
μ_r [-].....	Relativní permeabilita
μ_0 [-].....	Permeabilita vakua
θ_r [°].....	Poloha rotoru
Φ [Wb].....	Magnetický tok
ω_s [rads ⁻¹].....	Synchronní rychlost
AlNiCo.....	Slitina hliníku, niklu a kobaltu
NdFeB.....	Permanentní magnet na bázi neodymu, železa a boru
PMSM.....	Anglická zkratka pro synchronní motor s permanentními magnety
SmCo.....	Permanentní magnet na bázi samaria a kobaltu

Úvod

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na přehled o permanentních magnetech a jejich použití u synchronních motorů.

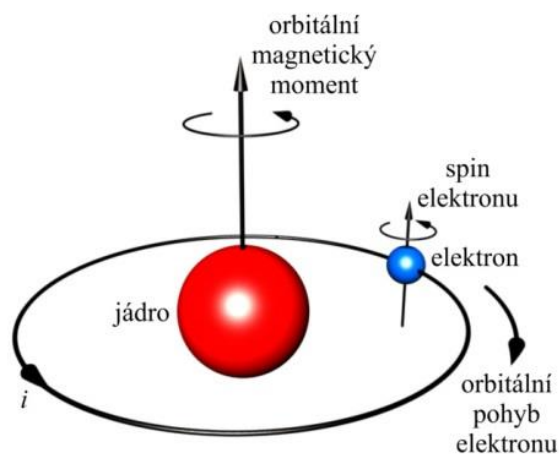
Text je rozdělen do tří částí. První část se zabývá magnetickým jevem a vlastnostmi materiálů podle účinků magnetického pole. Druhá část se věnuje permanentním magnetům a jejich vlastnostem. Třetí část se zabývá použitím permanentních magnetů u synchronních motorů a konstrukcí synchronních motorů s těmito magnety.

Prvním úkolem práce bylo vytvořit základní přehled o typech permanentních magnetů a především o jejich vlastnostech. Druhým úkolem bylo popsat různé konstrukční provedení synchronních motorů s permanentními magnety, které se v současné době stále více uplatňují i v oblastech, kde to dříve nebylo obvyklé. Jednou takovou oblastí jsou trakční motory u kolejových vozidel, kde se dříve používaly především stejnosměrné motory a později motory asynchronní. Právě zdokonalení vlastností permanentních magnetů ze vzácných zemin umožnilo použít tyto motory jako hnací jednotky kolejových i silničních vozidel.

1 Magnetismus

1.1 Magnetický jev

Pro vysvětlení magnetického jevu a jeho vlastností použijeme jednoduchý model atomu. Elektron obíhá kolem jádra atomu po orbitální dráze. Orbitální dráha je ekvivalentní smyčce proudu. Pohyb elektronu podle osy jádra vytváří magnetický moment, který nazýváme orbitální magnetický moment. [1]

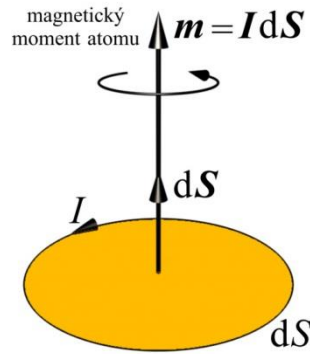


Obr. 1.1 Orbitální pohyb elektronu (překresleno z [1])

Každý elektron má ještě navíc i svůj magnetický moment vzniklý od vlastního otáčivého pohybu kolem své osy. Tento pohyb se nazývá spin elektronu. Tomuto magnetickému momentu říkáme spinový moment. Spinový moment je zároveň elementární magnetický moment atomu. Je také nazýván jako Bohrův magneton. Jeho hodnota je $m_B = 9,27 \cdot 10^{-24} \text{ Am}^2$. Orbitální moment je násobkem této hodnoty. I jádro atomu má svůj vlastní magnetický moment. Ten lze pro svoji malou hodnotu u výsledného magnetického momentu atomu zanedbat. [1]

Magnetické pole vytvořené smyčkovým (molekulárním) proudem I , obepínající plochu dS je charakterizované magnetickým momentem m

$$m = IdS. \quad (1.1)$$



Obr. 1.2 Magnetický moment proudové smyčky (překresleno z [1])

Magnetické momenty atomů v látce (molekule) se vektorově sčítají do výsledného magnetického momentu

$$\mathbf{m} = \sum_{i=1}^n \mathbf{m}_i, \quad (1.2)$$

kde $i = 1, 2, \dots, n$.

Hustotu magnetických momentů v objemu látky (molekuly) charakterizuje vektor magnetizace \mathbf{M}

$$\mathbf{M} = \lim_{\Delta V} \frac{1}{\Delta V} \sum_{i=1}^n \mathbf{m}_i. \quad (1.3)$$

Magnetické vlastnosti prostředí charakterizuje relativní permeabilita μ_r a magnetická susceptibilita κ_m . Jejich vzájemný vztah je dán rovnicí

$$\kappa_m = \mu_r - 1. \quad (1.4)$$

Magnetická susceptibilita κ_m je konstanta úměrnosti mezi magnetizací materiálu (látky) \mathbf{M} a intenzitou vnějšího magnetického pole \mathbf{H}

$$\kappa_m = \frac{\mathbf{M}}{\mathbf{H}}. \quad (1.5)$$

Vliv určitého prostředí na silové účinky magnetického pole vyjadřuje permeabilita μ . Permeabilita vakua je $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Hm}^{-1}$. Relativní permeabilita μ_r vyjadřuje kolikrát je permeabilita v prostředí látky větší než ve vakuu ve stejných podmínkách. Relativní permeabilita vakua je $\mu_r = 1$. Permeabilita je dána vztahy

$$\mu = \frac{B}{H}, \quad (1.6)$$

$$\mu = \mu_0 \mu_r. \quad (1.7)$$

Při působení vnějšího magnetického pole na látku má magnetická indukce \mathbf{B} dvě složky složené z volného prostoru a magnetizace materiálu

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} + \mu_0 \mathbf{M} = \mu_0 \mathbf{H} + \mu_0 \kappa_m \mathbf{H} = \mu_0 (1 + \kappa_m) \mathbf{H} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H}. \quad (1.8)$$

Výraz „ $\mu_0 \mathbf{M}$ “ uvedený v rovnici (1.8) je označován také jako magnetická polarizace (Coulombův moment). Magnetická polarizace je dána vztahem

$$\mathbf{J} = \mu_0 \mathbf{M}. \quad (1.9)$$

1.2 Rozdělení materiálů podle účinků vnějšího magnetického pole

Látky, které při působení vnějšího magnetického pole toto magnetické pole zeslabují, nazýváme diamagnetickými látkami. U takových látek je součet všech dílčích momentů záporný. Záporná je tedy i hodnota susceptibility. Ta u takových látek dosahuje hodnoty asi -10^{-5} . U některých anomálních diamagnetik, ale také až -10^{-3} . Mezi látky diamagnetické patří např. organické látky, plasty, krystaly alkalických halogenidů (NaCl, KBr), vzácné plyny, z kovů pak stříbro (Ag), zlato (Au), měď (Cu), zinek (Zn), rtuť (Hg) a supravodiče. [2]

Látky, které nazýváme jako paramagnetické, mají kladný součet dílčích magnetických momentů a nemají vnitřní orbity plně obsazeny. Na těchto základech není tedy možná úplná kompenzace orbitálních a spinových momentů. Každý atom v látce má výsledný magnetický moment. Tyto momenty jsou orientovány všemi směry a teprve za působení vnějšího magnetického pole se natáčí do jeho směru, čímž se projeví jako slabé zmagnetování (paramagnetismus). Proti tomuto vlivu magnetického pole, které usměřuje tyto magnetické momenty, působí zase vliv tepelného pohybu. Pro tuto závislost platí vztah

$$\kappa_m = \frac{T_C}{T}, \quad (1.10)$$

kde T_C je Curieova teplota a T je termodynamická teplota. [2]

Susceptibilita paramagnetik je kladná, a její velikost se pohybuje v rozmezí 10^{-5} až 10^{-2} . Mezi paramagnetické látky patří např. hliník (Al), platina (Pt), cín (Sn) a alkalické kovy. Dále jsou to prvky, které mají atomy prvků s neúplně zaplněnými orbity $3d$, $4d$, $4f$ a $5d$. Tyto prvky jsou silně paramagnetické a patří mezi ně např. mangan (Mn). [2]

V některých látkách jsou atomy uspořádané tak, že jejich magnetické momenty mají stejný směr, a tak se navzájem podporují. Takové látky označujeme jako feromagnetické. Mají tedy nenulový magnetický moment i bez přítomnosti vnějšího magnetického pole. Feromagnetický stav vzniká při určitém poměru mřížkové soustavy (a) a poloměru orbity $3d$ (r). Tento poměr je u feromagnetismu $2,8 < a/r < 6,2$. U paramagnetických materiálů je tento poměr $a/r > 6,2$. Feromagnetismus nemůže vzniknout u látek v kapalném nebo plynném stavu, neboť tyto látky mají velké vzdálenosti mezi atomy. Vlastnosti feromagnetických látek mají prvky železo (Fe), nikl (Ni), kobalt (Co) a kovy ze vzácných zemin gadolinium (Gd) a dysprosium (Dy). [2] [3]

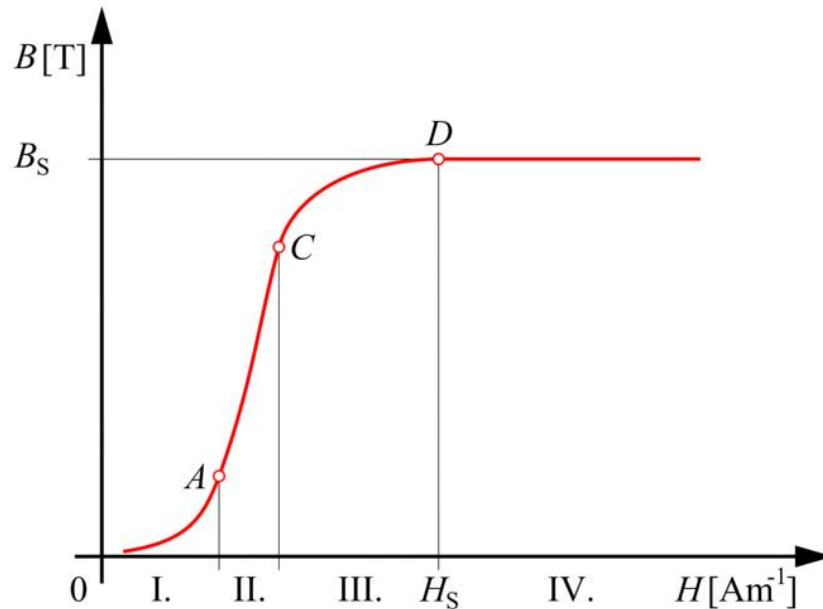
Látky, které označujeme jako antiferomagnetické, mají antiparalelní uspořádání magnetických momentů. Susceptibilita antiferomagnetik odpovídá susceptibilitě paramagnetických materiálů. Antiferomagnetiky jsou např. oxidy, siřníky a chloridy manganu, chromu, železa, kobaltu a niklu. [3]

U nekovových látek krystalické povahy, označovaných jako ferity (sloučeniny oxidů železa a oxidy některých dalších kovů), se vyskytuje stav, který nazýváme ferimagnetismus. I u těchto látek jsou magnetické momenty antiparalelně uspořádané. Tyto antiparalelně uspořádané momenty nejsou identické jako v případě antiferomagnetik, ale jsou rozdílné. Tím se momenty vzájemně neruší a ferity mají určitý výsledný magnetický moment. [3]

1.3 Prvotní magnetizační křivka

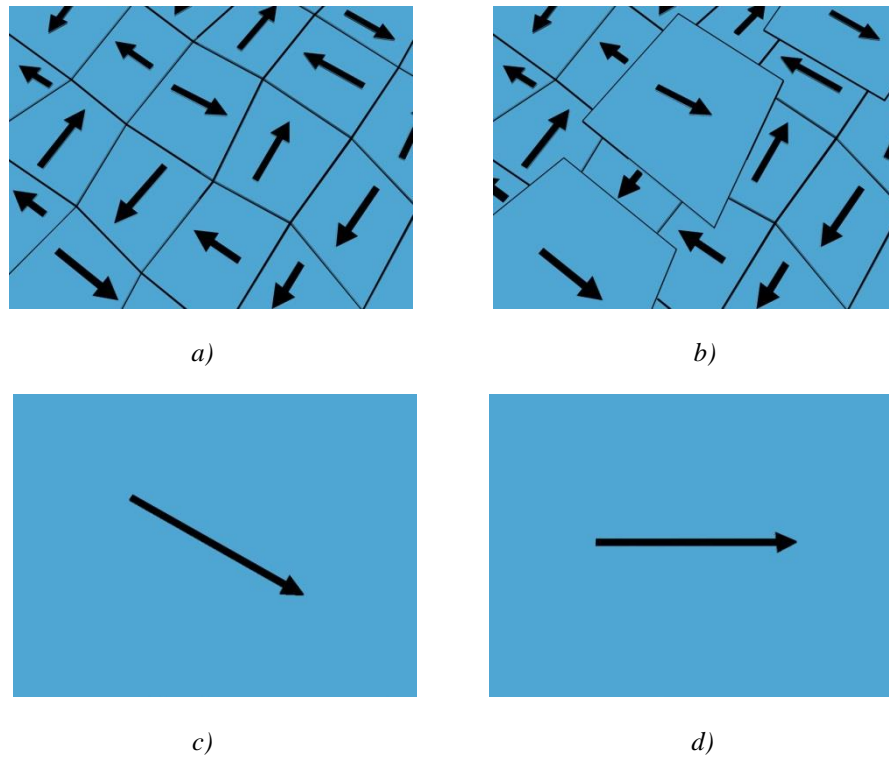
U feromagnetické látky jsou výsledné momenty atomů se souhlasnou orientací obsaženy v tzv. doménách. Magnetické momenty v doménách zaujímají směr, který závisí na krystalografických osách krystalu. Jejich velikost je v rozsahu 10^{-3} až 10^{-6} cm³. Domény jsou mezi sebou odděleny tzv. Blochovou stěnou, která umožňuje přechody magnetických momentů. Tloušťka Blochovy stěny je přibližně 10^{-8} až 10^{-6} m. [2]

Pokud vzorek feromagnetického materiálu vystavíme působení vnějšího magnetického pole a intenzitu tohoto pole budeme postupně zvyšovat, bude vzrůstat i magnetická indukce podle křivky prvotní magnetizace. [2]



Obr. 1.3 Křivka prvotní magnetizace (překresleno z [1])

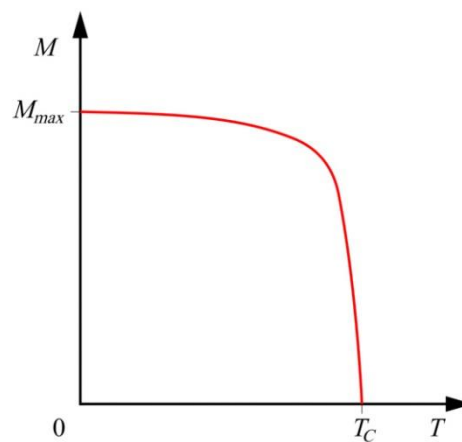
Pokud nepůsobí vnější magnetické pole, jsou momenty jednotlivých domén uspořádány různě. Účinky momentů takto uspořádaných momentů jednotlivých domén se vzájemně ruší, takže výsledný vektor magnetizace látky je nulový. Při působení vnějšího magnetického pole a při postupném zvyšování jeho intenzity se domény, u kterých se nejvíce shoduje směr magnetického momentu se směrem vnějšího pole, začnou zvětšovat. Tento proces je ještě vratný. Pokud se dále zvyšuje intenzita vnějšího magnetického pole, dochází k přemístění a natáčení stěn domén do směru působení vnějšího magnetického pole. Tento proces je již nevratný. Tyto nevratné posuvy neprobíhají spojitě, ale po skocích. Výsledkem dalšího zvyšování intenzity magnetického pole bude, že všechny domény budou natočeny ve směru vnějšího pole. Materiál je již plně nasycen. Další zvyšování intenzity se bude projevovat pouze nepatrně. [1] [2] [3]



Obr. 1.4 Proces pohybu domén ve feromagnetických materiálech: a) bez přiloženého vnějšího pole, b, c, d) po přiložení pole intenzity \mathbf{H} , která se postupně zvyšuje (překresleno z [1])

1.4 Vliv teploty

Při zvyšování teploty materiálu oscilují atomy v krystalové mřížce okolo své střední hodnoty. Oscilace narušuje seřazení magnetických momentů. Se zvyšující se teplotou feromagnetického materiálu dochází ke snižování magnetizace. [1]



Obr. 1.5 Průběh magnetizace při zvyšování teploty (překresleno z [1])

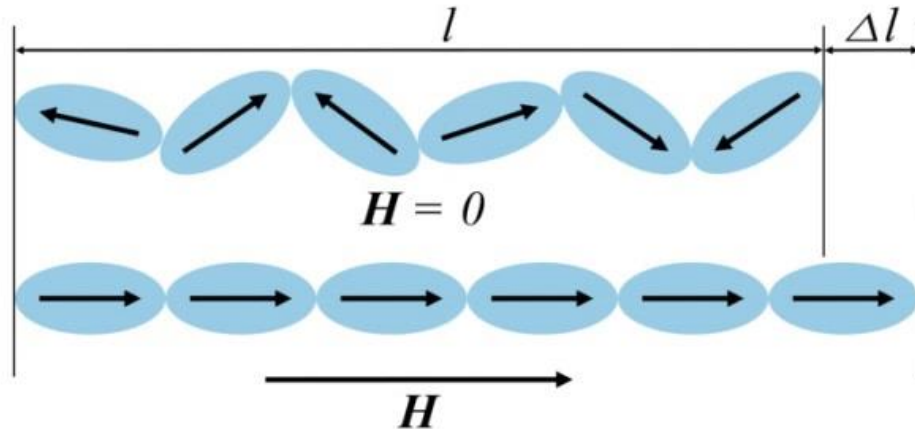
Při teplotě T_C se paralelní uspořádání momentů úplně ztratí a momenty se uspořádají náhodně. Tato teplota je označována jako Curieova teplota. Například pro železo je Curieova teplota 770 °C. Nejmenší Curieovu teplotu mají vzácné kovy. Teploty elektrických strojů se pohybují přibližně do 150 °C, takže v jejich případě je vliv teploty na magnetické vlastnosti např. železa malý. Naopak u prvků ze vzácných zemin je tato teplota důležitá, neboť Curieova teplota může být i pod normální pokojovou teplotou. [1]

1.5 Magnetostrikce

Magnetostrikce je změna rozměrů a tvaru feromagnetických těles, která vzniká při jejich magnetování. Tato změna se může týkat jak délky, tak šířky, i jejich objemu. Podle toho rozlišujeme magnetostrikci podélnou, příčnou a objemovou. Magnetostrikci látek, u nichž dochází ve směru pole k prodloužení, nazýváme kladnou. Pokud dojde ke zkrácení tělesa, jedná se o magnetostrikci zápornou. Délkové magnetostrikční změny ve směru pole jsou doprovázeny změnami příčných rozměrů, tj. vzrůstá-li délka tělesa, dochází současně ke zkrácení jeho příčných rozměrů a obráceně. Podélná a příčná magnetostrikce vystupuje prakticky bez objemových změn a souvisí s magnetizačními ději probíhajícími jak posuvem stěn, tak i stáčením vektoru spontánní magnetizace. Magnetostrikce objemová přichází v úvahu téměř výhradně při značně vysokých intenzitách pole, kdy je magnetizačním dějem paraproces. Jiným druhem magnetostrikce, odvozeným z magnetostrikce podélné je tzv. Wiedemannův jev, jehož podstatou je kroucení feromagnetického tělesa, jímž protéká elektrický proud. Velikost magnetostrikce posuzujeme podle relativního prodloužení nebo zkrácení feromagnetického tělesa v magnetickém poli. Relativní prodloužení nebo zkrácení vyjadřuje koeficient magnetostrikce λ

$$\lambda = \frac{\Delta l}{l}. \quad (1.11)$$

Hodnoty tohoto koeficientu se pohybují u většiny feromagnetických látek v řádových velikostech 10^{-6} až 10^{-5} . Koeficient magnetostrikce závisí na intenzitě magnetického pole, při jehož určité intenzitě dosáhne nasycené hodnoty, která se již dále nemění. [3]

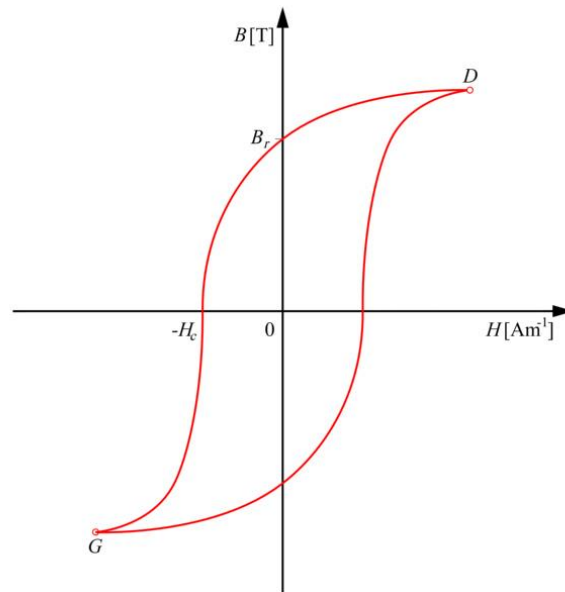


Obr. 1.6 Princip magnetostrickce

2 Permanentní magnety

2.1 Permanentní magnetismus

Permanentní magnetismus má každý feromagnetický materiál, který je vystaven působení vnějšího magnetického pole a vykazuje určitou remanentní indukci $\pm B_r$. Při snižování intenzity pole H klesá magnetická indukce B pomaleji, a nesleduje tak zpětně křivku prvotní magnetizace. Při nulové intenzitě pole H neklesne indukce B rovněž na nulu, ale pouze na hodnotu remanentní indukce B_r . Je to způsobeno nevratnými změnami Blochových stěn. Zpoždění magnetické indukce B za magnetickou intenzitou H nazýváme magnetickou hysterezí. Pro dosažení nulové indukce je potřebná záporná hodnota intenzity magnetického pole $-H_c$. Tuto hodnotu nazýváme koercitivní silou. Střídavá změna magnetování a odmagnetování materiálu vytváří potom tzv. hysterezní smyčku. Při tomto opakovaném střídavém ději vznikají ve feromagnetickém materiálu ztráty energie, které se projevují jeho zahřátím. Tyto ztráty se nazývají hysterezní ztráty a jsou úměrné ploše uzavřené hysterezní smyčky. [1] [3]



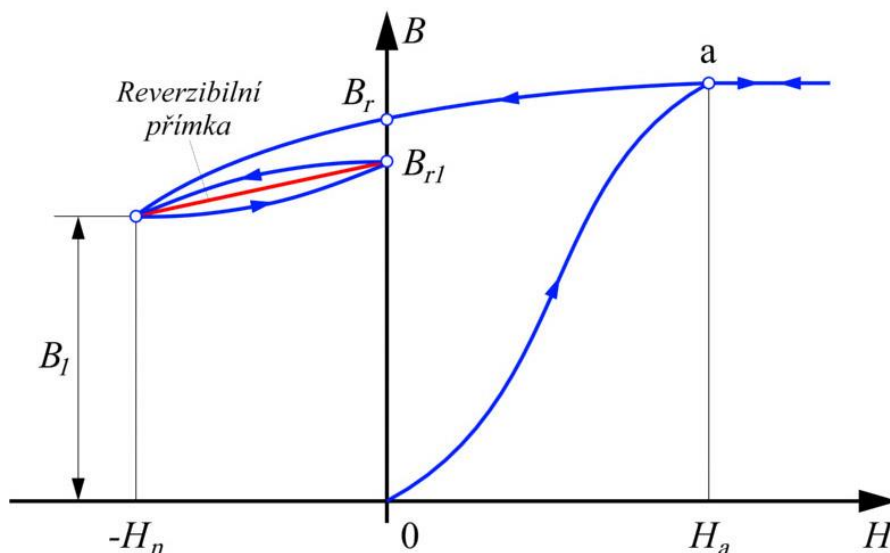
Obr. 2.1 Hysterezní smyčka (překresleno z [1])

Některé materiály mají o mnoho vyšší permanentní magnetismus než ostatní materiály. Jsou to především slitiny železa (Fe), niklu (Ni) a kobaltu (Co). Tepelné zpracování těchto slitin vytváří složitější krystalickou strukturu. Tato struktura brání pohybu doménových stěn. Magnetické materiály tedy rozdělujeme na měkké a tvrdé. [1]

U magneticky měkkých materiálů dochází vlivem pohybu doménových stěn k rychlejší počáteční magnetizaci. Až při vysoké hodnotě magnetické intenzity vnějšího magnetického pole se začnou natáčet domény. Dají se tedy snadno zmagnetovat a odmagnetovat. Jejich hysterezní smyčka je úzká. Magnetické tvrdé materiály mají vlivem tepelného zpracování velmi malé prodloužené krystaly. Jejich struktura složení brání pohybu doménových stěn. U těchto materiálů se objeví největší přírůstek magnetizace jako výsledek nevratné změny všech domén přes celých 180° . Po odstranění magnetické intenzity mají o mnoho větší remanenci než magneticky měkké materiály. Tyto materiály jsou vhodné pro tvorbu permanentních magnetů. [1]

Při přemagnetování střídavým magnetickým polem, vznikají ve feromagnetických látkách ztráty energie, které se projevují zahřátím látky a nazývají se hysterezní ztráty. Tyto ztráty energie jsou úměrné ploše hysterezní smyčky. Zlepšení hysterezních ztrát u látky lze docílit např. obsahem příměsí, různým tepelným zpracováním atd. [3]

Při použití permanentních magnetů je důležitý druhý kvadrant hysterezní smyčky. Tato její část se nazývá demagnetizační křivka, resp. demagnetizační charakteristika. Křivka je důležitá při popisování vlastností jednotlivých materiálů permanentních magnetů a její použití má význam při konstrukci a výrobě elektrických strojů s přihlédnutím na jejich umístění v provozu. [1]



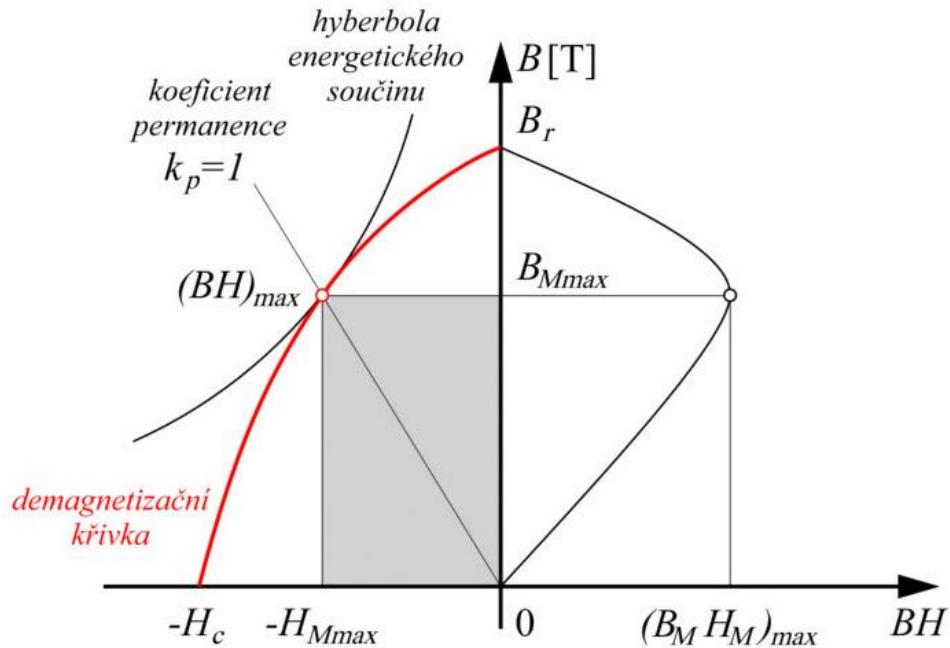
Obr. 2.2 Demagnetizace a reverzibilní přímka (překresleno z [1])

Na obr. 2.2 je vidět reverzibilní úsečka, která vznikla jako náhrada elementární smyčky vzniklé opakovaným působením magnetického pole H_n . Elementární smyčka vznikne tak, že se odstraní působení pole H_n a magnetická indukce se vrátí z hodnoty B_1 na novou hodnotu B_{r1} , která je menší než původní remanentní indukce B_r . Pokud opět začne působit pole H_n , vrátí se indukce zase zpět přibližně na hodnotu B_1 . Vzniklá reverzibilní přímka, resp. směrnice přímky, určuje reverzibilní permeabilitu. [1]

2.2 Maximální energetický součin $(BH)_{max}$

Pro porovnání vlastností permanentních magnetů je důležitý bod na demagnetizační křivce, kde má absolutní hodnota odpovídajících hodnot B a H maximum. Tento bod ukazuje maximální vnější energii, kterou by vytvořil jednotkový objem materiálu permanentního magnetu. Neznamena to, že právě taková energie je v magnetu uložena, ale je mírou uložení energie.

Dále ukazuje, jak je permanentní magnet odolný vůči demagnetizačním účinkům vnějšího pole. [1]



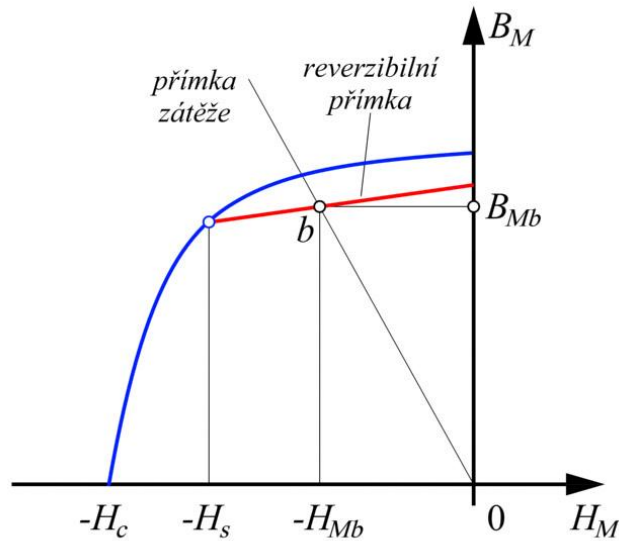
Obr. 2.3 Demagnetizační charakteristika a energetický součin $(BH)_{max}$ (překresleno z [1])

2.3 Stabilizace permanentních magnetů

U točivých strojů, resp. u motorů je permanentní magnet vystaven demagnetizujícím účinkům kotvy. Permanentní magnet potom nepracuje na demagnetizační křivce, ale na reverzibilní přímce. Přímka je určena stabilizováním permanentního magnetu, tedy tak, že magnet je vystaven demagnetizujícím účinkům stejným jako při provozování H_s . Výsledný průsečík vratné přímky a přímky zátěže se označuje jako pracovní bod. Souřadnice pracovního bodu B_{Mb} a H_{Mb} se dosazují do rovnice pro objem

$$V_M = \frac{B_\delta^2 V_\delta}{\mu_0 B_M H_M}, \quad (2.1)$$

a výsledek dá požadovaný objem permanentního magnetu. [1]



Obr. 2.4 Demagnetizace a reverzibilní přímka (překresleno z [1])

2.4 Materiály permanentních magnetů na bázi různých slitin

Počátkem dvacátého století se nejčastěji používal materiál z jednoduché slitiny železa (Fe) s 1 % uhlíku (C). Energetický součin $(BH)_{max}$ byl přibližně $1,6 \text{ kJm}^{-3}$ a koercitivita H_c asi $0,4 \text{ kAm}^{-1}$. U dražších slitin oceli s 35 % kobaltu (Co) a malým množstvím chromu (Cr) a wolframu (W) dosahoval energetický součin $(BH)_{max}$ už mnohem vyšší hodnoty, okolo $7,5 \text{ kJm}^{-3}$ a koercitivita H_c dosahovala kolem 20 kAm^{-1} . Tyto oceli už bylo možné vytvarovat obvyklým způsobem a potom při vysoké teplotě zakalit, aby získaly tvrdé magnetické i dobré mechanické vlastnosti. Později vznikl nový druh slitiny složené ze železa (Fe), niklu (Ni) a hliníku (Al). Tento materiál byl také vhodný pro výrobu permanentních magnetů. Jeho hodnota koercitivity H_c byla už dosti vysoká 40 kAm^{-1} , ale u hodnot energetického součinu $(BH)_{max}$ se dosahovalo jen okolo 10 kJm^{-3} . Později se zjistilo, že přidáním kobaltu (Co) do slitiny, ochlazováním odlitků v magnetickém poli a následném magnetování ve směru, ve kterém působilo magnetické pole po dobu chladnutí, se dosáhne mnohem větších hodnot energetického součinu $(BH)_{max}$. Vznikly tak slitiny AlNiCo, které obsahují 7 až 10 % hliníku (Al), 13 až 16 % niklu (Ni), 20 až 40 % kobaltu (Co) a zbytek tvoří železo (Fe). Navíc se do magnetů AlNiCo přidávají přísady jako měď (Cu), titan (Ti) a niob (Nb) nebo tantal (Ta). [1] [4]

Všeobecně se od permanentních magnetů vyžaduje, aby působily jen v jednom směru, takže většina těchto magnetů je vystavená působení magnetického pole po dobu jejich vychladnutí. Odlitky se po dobu chladnutí srážejí, scvrkávají. Aby se tedy dosáhlo malé mechanické tolerance, je nutné tyto vychladlé odlitky vybrousit na požadovaný tvar. [1]

Magnety ze slitin AlNiCo mají vysokou remanentní indukci B_r okolo 1,2 T, nízkou koercitivitu H_c okolo 50 kAm^{-1} a malý energetický součin $(BH)_{max}$ okolo 40 až 80 kJm^{-3} . Tvar jejich demagnetizační křivky se sklonem $3\mu_0$ vyžaduje stabilizaci. Některé slitiny, které mají homogenní krystalovou orientaci, mají mnohem vyšší hodnotu energetického součinu $(BH)_{max}$ než AlNiCo 5, nižší remanenci B_r a vyšší koercitivitu H_c , ale jejich výrobní proces je mnohem dražší. [1]

Mechanické vlastnosti AlNiCo slitin jsou velmi nevhodné. Jsou totiž velmi tvrdé a křehké. Údery a nárazy do magnetu mají vliv i na jeho demagnetizaci. [1] [4]

Oblasti použití magnetů AlNiCo jsou měřicí přístroje, kontrolní zařízení, různé typy měničů a snímačů, motory a proudové generátory a mnoho dalších zařízení, ve kterých je potřebné stabilní magnetické pole nezávislé na teplotě, a jejich konstrukční prostor je dostatečně velký pro umístění magnetu. [4]

2.5 Feritové permanentní magnety

Tyto feritové materiály mají chemický vzorec $XO.6(\text{Fe}_2\text{O}_3)$, kde X může obsahovat prvky barya (Ba) nebo stroncia (Sr), ale i třeba olova (Pb). Mísí se v poměru přibližně 80 % Fe_2O_3 a 20 % BaCO_3 nebo SrCO_3 . [4] Výroba feritových materiálů probíhá práškovou metalurgií, kde se nejdříve surový materiál rozemele na jednotlivé krystaly, které potom mají velikost jako jednotlivé domény, tedy asi $1 \mu\text{m}$. Poté je umletý prášek buď mokrou, nebo suchou cestou lisován pod vlivem magnetického pole (500 kAm^{-1}). Takto slisovaný celek je pak asi dvě hodiny spékán (sintrován) na vzduchu při teplotě 1 300 °C. Během této operace se celek zmenší asi o 15 %. [1]

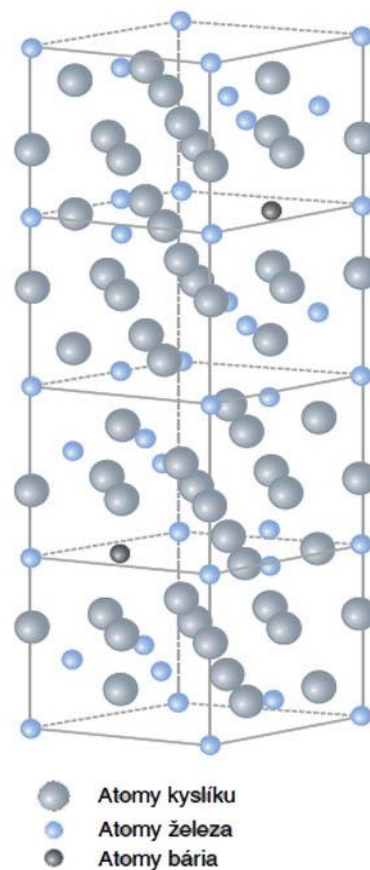
Feritové permanentní magnety jsou vyráběny jako anizotropní nebo izotropní. Izotropní magnety mají ve všech směrech stejné magnetické vlastnosti. Jsou lisovány bez přítomnosti magnetického pole. Anizotropní materiály jsou naopak lisovány za přítomnosti magnetického pole, takže získávají dobré magnetické vlastnosti pouze v jednom směru. Při stejném objemu jako u izotropních magnetů se tak dosáhne vyššího magnetického toku. Remanentní indukce je podle typu 1,5 až 2krát vyšší než u izotropních feritových magnetů. [5]

I když mají tyto materiály nižší remanentní indukci a energetický součin než třeba AlNiCo materiály, je naopak jejich koercitivita mnohem vyšší a mohou tedy odolávat mnohem vyšším demagnetizačním polím bez toho, že by se nějak výrazně snížila jejich remanence. Jejich demagnetizační charakteristiky jsou téměř ideální. [1]

Feritové permanentní magnety mají remanentní indukci okolo 0,36 T a koercitivitu okolo 150 až 250 kAm⁻¹. Pro poměrně vysokou hodnotu koercitivity feritových materiálů je požadovaná délka magnetů poměrně malá. Potřebná délka magnetů l_m souvisí s koercitivitou H_c tak, že jejich součin $H_c l_m$ má vytvořit potřebné budící magnetické napětí. Naopak zase jejich nízká remanence B_r souvisí s plochou magnetu S_M tak, že jejich součin $B_r S_m$ má vytvořit potřebný magnetický tok v magnetickém obvodu. [1]

Permanentní magnety z feritových materiálů jsou křehké a citlivé na náraz a ohyb. Vzhledem k jejich tvrdosti jsou opracovávány diamantovými nástroji, popřípadě vodním paprskem. Odolávají působení mnoha chemikálií. Jsou odolné i vůči ředidlům, louhům a slabým kyselinám. [5]

Baryový ferit se používá pro magnety např. do reproduktorů a mikrofonů. V této aplikaci se neočekává ani demagnetizující magnetické napětí ani rozmontování magnetického obvodu



Obr. 2.5 Krystalická struktura $BaFe_{12}O_{19}$
[5]

po magnetizaci. Zde není důležitá vysoká hodnota koercitivity H_c , ale účelem je dosáhnout co nejvyšší hodnoty remanentní indukce B_r a energetického součinu $(BH)_{max}$. [1] [4]

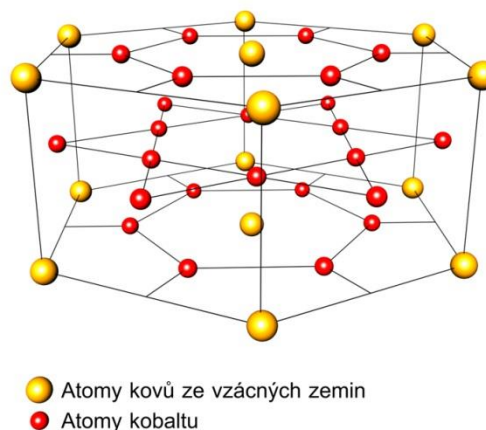
Stronciový ferit je zkonstruovaný pro použití v elektrických strojích, kde jsou magnety během provozu vystaveny demagnetizující reakci kotvy. Proto je zde velmi důležitá vysoká koercitivita. [1]

V průmyslu se zejména používají tam, kde jde o elektromechanickou přeměnu energie. Je tomu tak pro jejich vlastnosti coby tvrdých feritů i pro jejich nižší cenu. [1]

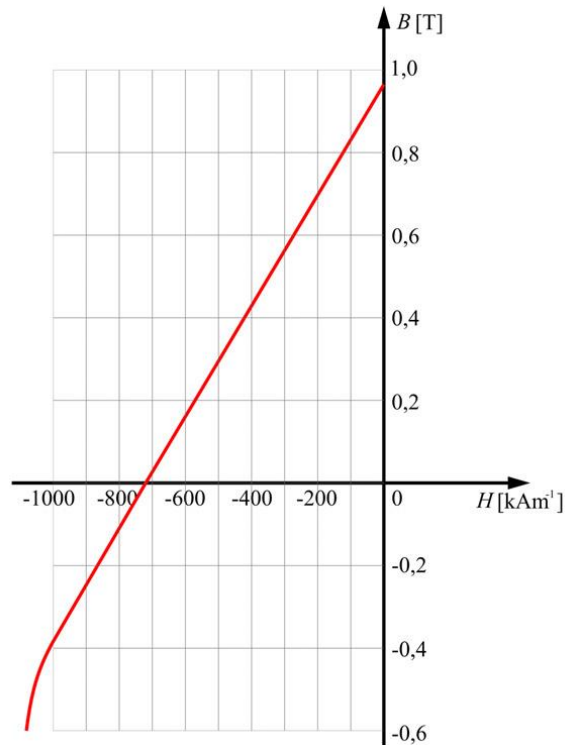
2.6 Permanentní magnety ze vzácných zemin

2.6.1 Samariové permanentní magnety

V šedesátých letech minulého století byl vyvinut nový druh materiálů permanentních magnetů, který spojuje výhody poměrně vysoké remanence AlNiCo materiálů spolu s vyšší koercitivitou, než jaká je u feritů. Jsou to sloučeniny materiálů železa (Fe), niklu (Ni) a kobaltu (Co) s jedním nebo několika vzácnými prvky. Jedna z nejčastěji používaných sloučenin se skládá z prvků samarium (Sm) a kobalt (Co), a to nejčastěji v poměru 1 : 5 nebo 2 : 17, tj. SmCo_5 nebo $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$. [1]



Obr. 2.6 Krystalická struktura SmCo_5 (3D model vytvořený dle obrázku z [5])



Obr. 2.7 Demagnetizační křivka permanentního magnetu ze vzácných zemin SmCo (překresleno z [1])

Na obr. 2.7 je charakteristika demagnetizační křivky permanentního magnetu SmCo s remanentní indukci B_r s hodnotou 0,965 T a koercitivitou H_c velikosti 720 kAm⁻¹. Energetický součin $(BH)_{max}$ má hodnotu 160 kJm⁻³ (tj. asi čtyřikrát více než u AlNiCo slitin). Podél celého druhého kvadrantu má tvar přímky se sklonem $1,06\mu_0$, je též velmi blízko reverzibilní permeabilitě a reverzibilní přímka je téměř shodná s demagnetizační charakteristikou, takže ani tento permanentní magnet nepotřebuje stabilizaci. Demagnetizační charakteristika se od přímky odklání až v třetím kvadrantu, při opačné magnetické indukci okolo 0,4 T a záporné magnetické indukci 1 000 kAm⁻¹. [1]

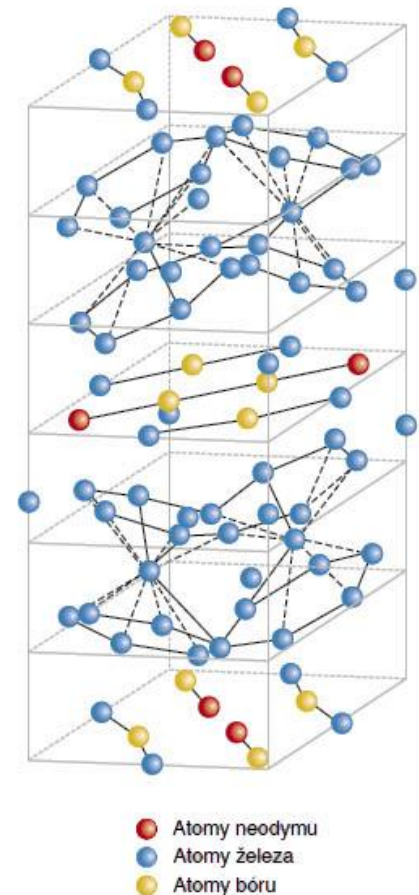
Předností těchto magnetů je jejich vysoká teplotní odolnost. Ta může být až 300 °C. Zároveň jsou odolné vůči korozi, takže není třeba je povrchově upravovat. [6]

Kvůli přítomnosti těchto vzácných prvků v permanentních materiálech je cena těchto materiálů velmi vysoká, i když postupně klesá. Jejich použití se proto omezilo na magnetické systémy, u kterých se vyžadují malé rozměry, ale současně kvalitní vlastnosti. Používají se např. v měřicích a kontrolních přístrojích, měničích a snímačích různých typů, v malých motorech a proudových generátorech a v mnohých jiných zařízeních vyžadujících stabilní mag-

netická pole při proměnlivé teplotě (–60 až 250 °C). Použití těchto magnetů s vysokým maximálním energetickým součinem a s vysokou koercivitou umožňuje miniaturizaci zařízení, která byla dříve vyráběna s využitím feritových magnetů a magnetů AlNiCo. [1] [4]

2.6.2 Neodymové permanentní magnety

V osmdesátých letech byl vyvinut materiál pro permanentní magnety, který je složený z prvků neodym (Nd), železo (Fe) a bor (B). Tento materiál permanentních magnetů má při pokojové teplotě nejvyšší energetický součin $(BH)_{max}$ ze všech průmyslově vyráběných magnetů a sice okolo 250 kJm^{-3} . Jejich vysoká remanentní indukce B_r okolo 1,2 T a vysoká koercitivní síla H_c okolo 800 kAm^{-1} umožňuje při průmyslové výrobě elektrických strojů výrazně změnit jejich velikost, a tím i hmotnost stroje, takže je možné podstatně zmenšit velikosti magnetů v porovnání s feritovými permanentními magnety, při zachování stejného výkonu jako u stroje s feritovými materiály. Tyto materiály jsou mnohem levnější než samariové permanentní magnety. V jejich prvopočátku byla jejich nevýhodou velká citlivost na teplotu, ale dnes se už vyrovnají feritovým magnetům a pro oba druhy platí, že pro práci s teplotou okolo 100 °C se už musí konstruovat zvlášť pečlivě. NdFeB materiál má jednoosovou strukturu s magnetokrystalickou anizotropií, proto ho lze snadno magnetizovat v jednom směru. Tato anizotropie magnetů ze vzácných prvků je porovnatelná s feritovými magnety. [1]



Obr. 2.8 Krystalická struktura Nd₂Fe₁₄B [5]

Výroba probíhá tak, že se nejdříve rozpustí v oxidu hlinitém železo (Fe) a bor (B), když klesne teplota nad teplotu tekutiny, přidá se neodym (Nd). Poté se tavenina odleje do silnostěnné měděné formy. Vychladlá slitina NdFeB ve tvaru hroudy se v dusíkaté atmosféře rozdrtí výkonnými kladivy na částice o velikosti menší než 500 μm. Poté se tyto částice seme-

lou na tak malé rozměry, že už neobsahují částice zrn, a proto již upřednostňují jen jednu osu magnetizace. Po semletí se prášek buď suší ve vakuu, nebo se zahřívá v argonové atmosféře. Také se uplatňuje metoda tryskového mletí, kde odpadá proces sušení. (Tento materiál permanentních magnetů ze vzácných prvků je velmi závislý na chemickém složení. Jakékoliv znečištění během výrobního procesu, třeba oxidací slitiny, odčerpává ze slitiny vzácné prvky.) Pak následuje lisování kovového prášku pod tlakem. Aby měl výlisek maximální magnetizaci, musí se částice prášku magneticky seřazovat tak, aby osy magnetizace částic byly vzájemně paralelní. Vyšších hodnot remanence B_r a energetického součinu $(BH)_{max}$ se dosáhne izostatickým lisováním. Další možné zpracování je spékání (sintrování), které se provádí v atmosféře inertního plynu, v podtlaku nebo ve vakuu. [1]

Magnety z této slitiny jsou houževnatější a méně náchylné ke zlomení a k jinému poškození než ostatní magnety. Mají také relativní permeabilitu blízko jedné s vysokou koercitivitou a mohou být magnetizovány už před montáží bez jakékoliv ztráty magnetického toku. Jejich nevýhodou je, že jsou náchylné ke korozi, proto se jejich povrch upravuje nanesením vrstvy niklu, zinku a epoxidové pryskyřice nebo jsou magnety povrchově upravovány pasivací. [1] [6]

Oblast použití neodymových permanentních magnetů jsou malé motory a proudové generátory, elektronická zařízení, počítačidla, mechanické hračky, separátory, upínače, měniče a mnoho jiných, masově vyráběných zařízení používaných v obmezeném rozsahu teplot [4].

2.7 Použití permanentních magnetů v elektrických strojích

Použití vhodného permanentního magnetu je určeno měrným momentem točivého stroje. Pro dosažení co nejvyššího měrného momentu točivého stroje je potřeba co nejvyššího magnetického a elektrického využití stroje. Elektrické zatížení točivého stroje je omezené tepelně-ventilačními poměry stroje a demagnetizačním účinkem kotvy. Permanentní magnet tak musí mít větší koercitivitu H_c , a musí také odolávat vyšším teplotám. Tato kritéria nejlépe splňují permanentní magnety SmCo. Tyto magnety jsou však z permanentních magnetů nejdražší. Magnetické zatížení charakterizované magnetickým tokem Φ ve vzduchové mezeře, resp. jeho indukci B_δ , je přímo úměrné remanentní indukci B_r , a ploše pólového nástavce permanentního magnetu. Z toho vyplývá, že pro vysoký měrný moment je třeba použít největší

možný objem magnetu. Pro vyšší výkony točivých strojů se feritové permanentní magnety nehodí. Pro dosažení vyššího měrného momentu by bylo potřeba většího objemu feritových permanentních magnetů, což by znamenalo překročit objem rotoru. Vzhledem k vysokým cenám samariových magnetů se zdá neoptimálnějším řešením použití neodymových magnetů. Nevýhodou těchto materiálů ovšem je, že se jejich vlastnosti při teplotách překračujících 130 °C zhoršují. U těchto permanentních magnetů záleží z jakého materiálu jsou vyrobeny. Při použití jiných materiálů pak mohou stroje pracovat při teplotách až 220 °C. Obvyčejné neodymové magnety s vyšším koeficientem permanence udržují vyšší teploty bez ztráty magnetických vlastností. Výhodou oproti samariovým magnetům je i to, že jsou o 13 % lehčí. [7]

V posledních letech se při výrobě elektrických motorů nejvíce používají permanentní magnety NdFeB. Motory s těmito permanentními magnety mají vyšší poměr mezi výkonem a váhou motoru a také vyšší rychlost. Dále mají větší moment na určitou velikost magnetu. Tabulka 2.1 porovnává motory s různými druhy magnetů. [1]

Tab. 2.1 Porovnání rozměrů 4pólového 2kW motoru při 2 500 ot.min⁻¹ [1]

	Ferit – FXD 460	SmCo – Recona 20	NdFeB – Crumax 301
Délka permanentního magnetu [mm]	14,2	2,9	2,7
Délka kotvy [mm]	117	93	90
Indukce ve vzduchové mezeře B_g [T]	0,2	0,5	0,56
Hmotnost permanentního magnetu [kg]	2,17	0,46	0,36
Hmotnost motoru [kg]	15,0	8,5	8,0

2.8 Porovnání permanentních magnetů

2.8.1 Magnetické vlastnosti

a) Permanentní magnety AlNiCo

Hodnoty remanence B_r se u těchto magnetů podobají hodnotám magnetů SmCo a NdFeB. Jejich reverzibilní permeabilita je 2,7krát vyšší než u jiných magnetů. Nízké hodnoty koercitivity H_c však znemožňují použití těchto permanentních magnetů v přítomnosti silných demagnetizačních polí, což omezuje rozsah jejich aplikací. Navíc má nízká koercitivita vliv na ustálení pracovního bodu. [4]

b) Feritové permanentní magnety

Předností feritových magnetů je, že mají vysokou hodnotu koercitivity H_c a rezistivity, která umožňuje jejich provozování v proměnlivých magnetických polích. Hodnoty remanentní indukce B_r jsou přibližně 2,3krát menší než u jiných magnetů (AlNiCo, NdFeB a SmCo). [4]

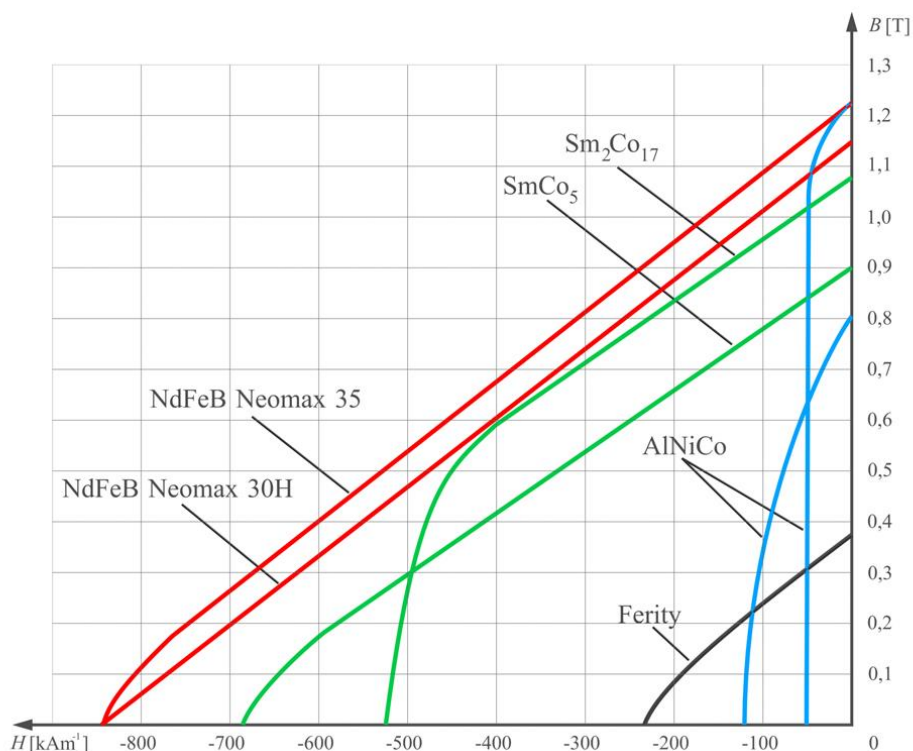
c) Samariové permanentní magnety (SmCo)

Mezi přednosti samariových permanentních magnetů patří především vysoká hodnota maximálního energetického součinu $(BH)_{max}$, koercitivity H_c a remanence B_r . [4]

d) Neodymové permanentní magnety (NdFeB)

Výraznou výhodou neodymových magnetů je extrémně vysoká hodnota maximálního energetického součinu $(BH)_{max}$, velmi vysoká hodnota koercitivity H_c a vysoká hodnota remanentní indukce B_r . [4]

Porovnání demagnetizačních křivek permanentních magnetů je na obrázku 2.9 a porovnání fyzikálních vlastností permanentních magnetů je v tabulce 2.2.



Obr. 2.9 Porovnání demagnetizačních křivek různých typů permanentních magnetů (překresleno z [1])

Tab. 2.2 Porovnání fyzikálních vlastností permanentních magnetů [4] [6] [8]

Permanentní magnety	Koercitivita H_c [kAm ⁻¹]	Remanence B_r [T]	Energetický součin $(BH)_{max}$ [kJm ⁻³]	Curieova teplota T_c [°C]
AlNiCo	42 až 152	0,55 až 1,22	8 až 48	890
Ferity	140 až 310	0,20 až 0,45	6,5 až 40,6	450
SmCo	600 až 800	0,85 až 1,10	110 až 240	750 až 800
NdFeB	800 až 1000	1,00 až 1,40	220 až 390	300

2.8.2 Životnost permanentních magnetů

Pokud se s permanentními magnety zachází tak, jak je potřeba, vydrží jejich magnetizace „věčně“. Je však třeba brát ohled na typ a druh magnetu. [8]

Magnety mají teplotní omezení, což znamená, že ztrácejí své magnetické vlastnosti při vystavení jejich teplotnímu maximu. U feritových magnetů je to 250 °C, u AlNiCo 450 °C, u

SmCo 350 °C a u neodymových od 80 až do 220 °C (záleží na typu neodymového magnetu). Pokud je permanentní magnet vystaven delší čas vysoké teplotě, stane se nemagnetickým. Pokud je teplota, při které magnet ztrácí magnetické vlastnosti (Curieova teplota), menší než teplota, při které dochází k metalurgickým změnám, lze tento materiál opět zmagnetovat na původní vlastnosti. To se týká feritových magnetů, kde teplota, při které dochází k metalurgickým změnám, má hodnotu 1 080 °C, tedy větší než je hodnota Curieovy teploty (450 °C). Permanentní magnety AlNiCo, SmCo a NdFeB mají teplotu, při které dochází k metalurgickým změnám, menší než je jejich Curieova teplota (viz. tab. 2.2). [1][8]

Tab. 2.2 Curieova teplota a teplota, při které dochází k metalurgickým změnám u permanentních magnetů [1]

Permanentní magnety	Curieova teplota [°C]	Teplota, při které dochází k metalurgickým změnám [°C]
AlNiCo 5	890	550
Ferity	450	1080
SmCo ₅	750	300
Sm ₂ Co ₁₇	800	350
NdFeB	300	200

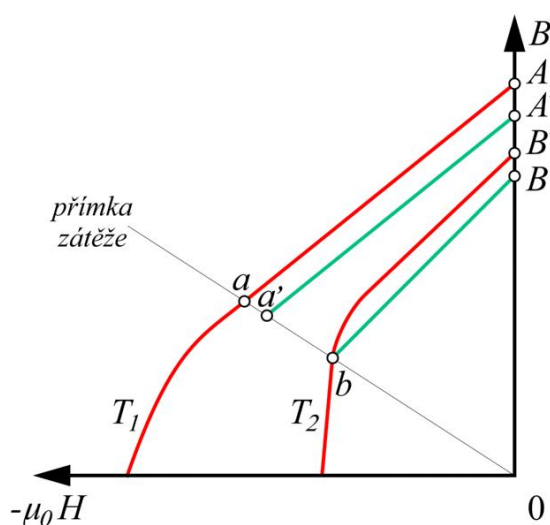
Dalším způsobem snížení či zrušení magnetických vlastností je vystavení magnetu většímu magnetickému poli, než je jeho vlastní. [8]

Jsou-li permanentní magnety vystaveny radioaktivnímu záření, může dojít k narušení jejich struktury různými defekty. Tím mohou být přímo ovlivněny strukturně závislé vlastnosti jako koercitivita H_c , magnetická indukce B a remanentní magnetická indukce B_r , a nepřímo mohou být ovlivněny vnitřní vlastnosti jako sytící magnetování a Curieova teplota. Magneticky měřitelné změny vznikají teprve při dosažení definované intenzity záření, která je variabilní podle druhu materiálu. [5]

2.8.3 Teplotní závislost permanentních magnetů

Hysterezní smyčka mění tvar s teplotou. V určitém rozsahu jsou změny vratné (reverzibilní) a do určité míry i lineární, takže na určení nové hodnoty remanentní indukce B_r a koercitivity H_c při zvyšování teploty je možné použít teplotní koeficienty. [1]

Nevratné (nereverzibilní) změny nastávají tehdy, pokud se remanentní indukce B_r sníží na hodnotu menší než jakou dosahovala při normální provozní teplotě. Na obrázku 2.10 je vidět, že provozní teplotě T_1 odpovídá bod a na přímce zátěže. Remanentní indukce je v bodě A . Pokud stoupne teplota na hodnotu T_2 , přesune se pracovní bod do bodu b a odpovídající remanentní indukce je v bodě B' . Koleno smyčky je však nad bodem b , takže skutečná remanentní indukce je v bodě B . Pokud klesne teplota opět na hodnotu T_1 , přesune se pracovní bod pouze do bodu a' , a nikoliv do bodu a . Pokud se celý cyklus opakuje, remanentní indukce se stabilizuje v bodě A' . U permanentního magnetu tak došlo k nevratné změně. Návrat k původním hodnotám permanentního magnetu lze provést opětovnou magnetizací při nízké teplotě. [1]

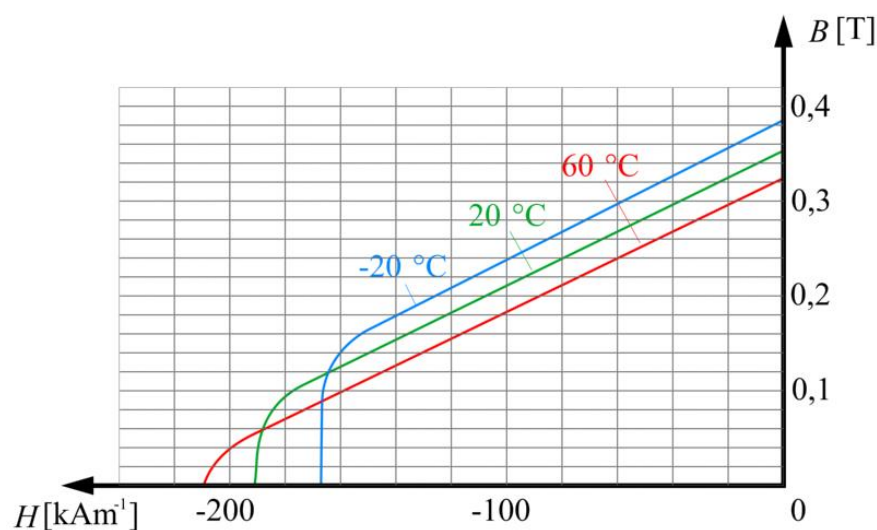


Obr. 2.10 Nevratné ztráty magnetického toku permanentního magnetu (překresleno z [1])

Teplotní stabilitou magnetických parametrů předčí jiné magnety slitiny AlNiCo. Podobnou teplotní stabilitou se vyznačují i magnety SmCo. U těchto magnetů je materiálový vývoj téměř ukončen a materiály dodavatelů jsou téměř sjednocené. Tímto jsou tedy příslušné teplotní koeficienty u těchto materiálů od různých dodavatelů téměř identické. Naopak perma-

nenní magnety NdFeB mají nízký rozsah pracovních teplot a jejich magnetické vlastnosti jsou ve značné míře závislé na teplotě. [4] [8]

U feritů a permanentních magnetů ze vzácných zemin probíhá teplotní závislost opačně. Při vzrůstající teplotě klesá remanentní indukce o 0,2 % na jeden kelvin a koercitivita vzrůstá současně o 0,3 % na jeden kelvin. Naopak při klesající teplotě stoupá remanentní indukce a koercitivita klesá stejnou měrou. To má za následek, že pokud jsou magnety s nízko položeným pracovním bodem vystaveny nižším teplotám, mohou utrpět trvalou ztrátu magnetování. [8]



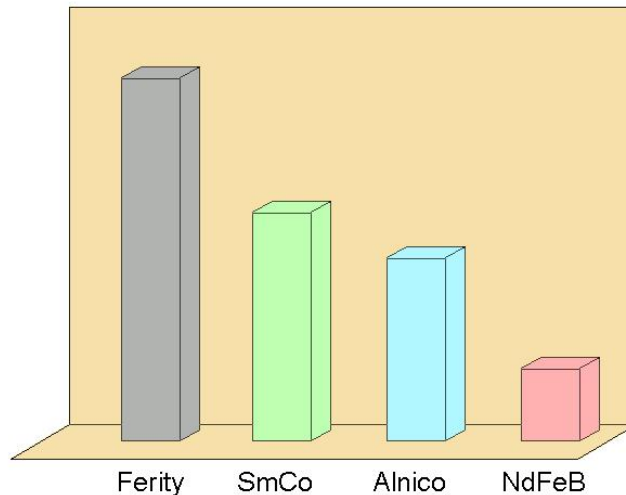
Obr. 2.11 Teplotní závislosti magnetických vlastností magneticky tvrdých feritů (překresleno z [8])

2.8.4 Odolnost permanentních magnetů proti korozi

Vysokou odolností proti korozi se vyznačují feritové permanentní magnety. Magnety SmCo mají i k vzhledem k velkému rozsahu přípustných pracovních teplot rovněž velmi vysokou odolnost proti korozi. Také magnety ze slitin AlNiCo mají vyšší odolnost proti korozi. [4]

Nejvíce náchylné ke korozi jsou permanentní magnety NdFeB. Je to dáno materiálovou strukturou, která se skládá z magnetických zrn $Nd_2Fe_{14}B$ a okolní zrnité mezní fáze z volného neodymu. Vysoká teplota výrazně snižuje u těchto magnetů chemickou odolnost. Za určitých podmínek se může magnet prakticky rozpustit. Zůstanou pouze zbytky. Byl proto vyvinut nový materiál, u něhož byla většina reaktivního neodymu v mezizrnové oblasti nahrazena

stabilními intermetalickými sloučeninami, které se vytvářejí během tepelného opracování ze základních surovin a chemických přísad. Materiál se pasivuje a vykazuje dlouhodobě podobné chování jako magnety $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$, které jsou známé jako materiály odolné korozi. Vysoká odolnost nových kvalitních permanentních magnetů NdFeB se dosahuje přísadami, které působí též teplotní stálost. Tyto přísady však snižují objemový podíl magnetické fáze $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ a snižují tak magnetický tok. [8]



Obr. 2.12 Porovnání korozní odolnosti permanentních magnetů (překresleno z [9])

2.8.5 Prodej permanentních magnetů

V současné době se permanentní magnety různých materiálů prodávají ve standardních tvarech a na přání zákazníka se vyrábějí i jiné požadované tvary a velikosti. Tyto by měly být podle možnosti dány již lisováním, neboť dodatečná změna tvaru je možná pouze náročným opracováním diamantovými nástroji. To platí pro různé otvory, hrany, drážky, zapuštění atd. Přitom je třeba dbát na to, že otvory, vybrání apod. lze vyrobit pouze ve směru lisování. U anizotropních permanentních magnetů se nedají vyrobit žádné otvory, drážky apod. příčně ke směru lisování. Hodnoty magnetických veličin uváděné prodejci jsou závazné, pokud nebylo se zákazníkem dohodnuto jinak. Magnetické hodnoty odpovídají normě DIN IEC 60404-8-1. [5]

V následujících tabulkách jsou uvedeny ceny několika různě velkých sériově vyráběných permanentních magnetů na našem trhu.

Tab. 2.3 AlNiCo permanentní magnety – hranoly [8]

Délka [mm]	Šířka [mm]	Výška [mm]	Cena [Kč] bez DPH
20	5	10	55
60	5	15	120
50	15	10	160
			cca 7 Kč za 1 g

Tab. 2.4 Feritové permanentní magnety – hranoly [8]

Délka [mm]	Šířka [mm]	Výška [mm]	Cena bez DPH [Kč]
11	8,7	4,6	3,20
50	50	15	27,90
75	50	15	41,80
			cca Kč 0,60 za 1 g

Tab. 2.5 Samariové permanentní magnety – hranoly [8]

Délka [mm]	Šířka [mm]	Výška [mm]	Cena bez DPH [Kč]
12	4	1,6	31,90
17	4	1,6	36,30
16	6	9,5	118,40
			cca 29 Kč za 1 g

Tab. 2.6 Neodymové permanentní magnety – hranoly [8]

Délka [mm]	Šířka [mm]	Výška [mm]	Povrchová úprava	Cena bez DPH [Kč]
2,15	1,2	0,8	nikl	3,90
20	2,0	2,0	nikl	14,20
20	5,4	2,2	pasivace	47,80
				cca 5 Kč za 1 g

3 Synchronní motory s permanentními magnety

Nové využití synchronních motorů malých a středních výkonů přineslo použití permanentních magnetů ze vzácných zemin. Synchronní motory s těmito magnety se ve velké míře využívají v servopohonech o výkonech od stovek wattů do desítek kilowattů. V této oblasti jde zejména o náhradu stejnosměrných a krokových motorů. Pro své příznivé vlastnosti se synchronní stroje s permanentními magnety v poslední době začínají intenzivně využívat i v dopravních prostředcích. [7]

Konstrukce synchronních motorů s permanentními magnety je rozdílná v závislosti na výkonu a použití. U klasické koncepce těchto motorů je satorové třífázové vinutí uloženo v drážkách magnetického obvodu, obdobně jako u asynchronních motorů. Uvnitř satoru je umístěn rotor, který nese permanentní magnety. Rotor může být odlehčen dutinami, neboť magnetický tok se uzavírá při povrchu rotoru. Póly permanentních magnetů jsou složeny z dílčích segmentů. Rozměry segmentů jsou omezeny na desetiny až na jednotky centimetrů. Používané permanentní magnety jsou nejčastěji samariové a neodymové. Tyto magnety jsou zdrojem velkého magnetického toku, čímž je umožněn menší objem motoru. Permanentní magnety se připevňují na rotor lepením. Používají se dva různé technologické postupy. První postup je, že se magnety před nalepením na rotor nejdříve magnetují. Zde však vzniká komplikace při usazování, neboť zde již působí magnetické síly. Druhým postupem je, že se lepí ještě nezmagnetované magnety. To však vyžaduje použití speciálních přípravků. Počet pólů rotoru je většinou shodný s počtem pólů satoru. U větších vícepólových motorů se počet pólů může lišit. Tím, že rotor nemá budicí vinutí, nevznikají zde ztráty jako u motoru s vinutím v rotoru. Takový motor má tedy lepší účinnost. I když mají vyšší účinnost než motory s budicími cívkami stejného výkonu, je magnetická indukce o hodně nižší, když se použijí ferity. [7]

Vztah pro vnitřní výkon je

$$P_i = k_l B_\delta A D^2 l_{Fe} n, \quad (3.1)$$

kde B_δ je indukce ve vzduchové mezeře, A je měrné proudové zatížení povrchu kotvy, D je průměr kotvy, l_{Fe} je délka kotvy, n je rychlost otáček. Snížení indukce ve vzduchové mezeře B_δ se pro ten stejný výkon dá vykompenzovat zvětšením objemu kotvy, úměrnému součinu $d^2 l_{Fe}$. To se obvykle řeší prodloužením kotvy. Např. feritové magnety by vyžadovaly o 50%

delší kotvu v porovnání s magnety ze vzácných zemin. Zlepšení účinnosti je proto zapláceno zvětšením hmotnosti, objemu a ceny. Je však možné pracovat s účínkem blížícím se jedné jako u indukčních motorů stejného výkonu, takže snížení požadované hodnoty jalového výkonu vede ke snížení ceny měniče. Když však buzení pomocí permanentních magnetů je navrženo tak, že stroj pracuje s $\cos \varphi = 1$ při plné zátěži, potom je při odlehčení silný kapacitní účíník, který má za následek špatnou účinnost. Účinnost těchto motorů se pohybuje okolo 90 %. Obvyklou aplikací pro tento typ motoru jsou pohony v textilním průmyslu, které sice vyžadují možnost změny rychlosti, ale vždy v synchronizaci. [1]

3.1 Synchronní motory s permanentními magnety s vnitřním rotorem



Obr. 3.1 Uspořádání permanentních magnetů na rotoru:

a) povrchové, b) vnitřní (překresleno z [1])

Tento typ motorů má klasické uspořádání, tedy vnější stator a vnitřní rotor. Tyto motory mohou mít různé uspořádání permanentních magnetů. Permanentní magnety mohou být uspořádány po obvodě rotoru nebo mohou být uvnitř železa rotoru (obr. 3.1). Uspořádání magnetů rozhoduje o chování motoru.

3.1.1 PMSM s povrchovým uspořádáním magnetů na rotoru

Povrchové uspořádání permanentních magnetů na rotoru lze považovat za typ s nevyniklými póly. Vzduchová mezera je všeobecně velká, takže vliv reakce kotvy na tok pólu je velmi malý. Permanentní magnety na povrchu rotoru, tedy ve vzduchové mezeře představuje materiál s permeabilitou rovnající se v ideálním případě μ_0 . Ve skutečnosti je jeho permeabilita 1,02 až 1,10, podle druhu a kvality permanentních magnetů. Můžeme tedy považovat vzduchovou mezeru včetně permanentních magnetů za homogenní prostor s celkovou permeabilitou μ_0 . Tento typ motoru tedy považujeme za typ s hladkým rotorem. V tomto smyslu se analyzují i jeho vlastnosti, tj. reaktance v podélné a příčné větvi jsou stejné $X_d = X_q$. Elektromagnetický moment M_e je u tohoto typu motoru

$$M_e = \frac{pm}{\omega_s} U_s \frac{U_{ib}}{X_d} \sin\beta, \quad (3.2)$$

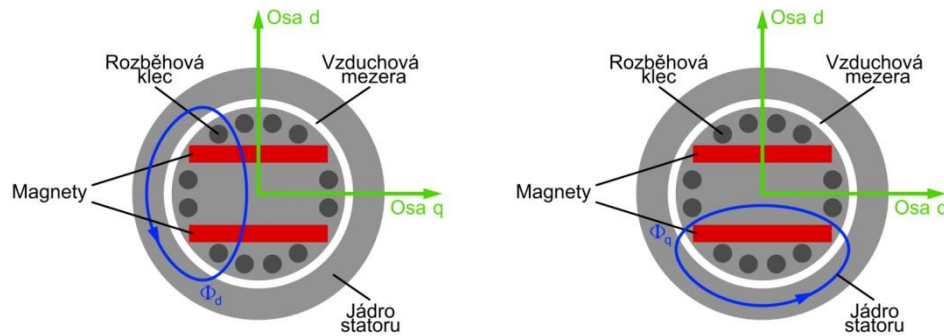
kde p je počet pólových dvojic, m je počet fází, ω_s je synchronní rychlost, U_s je svorkové napětí, U_{ib} je indukované napětí od buzení a β je zátěžný úhel. [1]

3.1.2 PMSM s povrchovým uspořádáním magnetů uvnitř rotoru

Uspořádání rotoru s vnitřními permanentními magnety (*obr 3.2*) se považuje za typ s vyniklými póly a proto je celkový moment součtem synchronního (budicího) momentu a reluktančního momentu

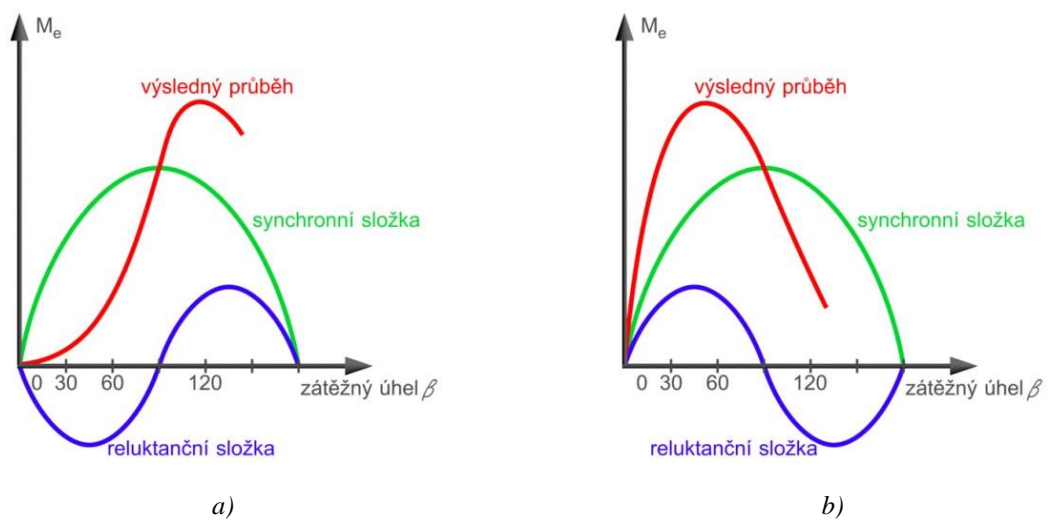
$$M_e = \frac{pm}{\omega_s} U_s \left[\frac{U_{ib}}{X_d} \sin\beta + \frac{U_s}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin\beta \right], \quad (3.3)$$

kde p je počet pólových dvojic, m je počet fází, ω_s je synchronní rychlost, U_s je svorkové napětí, U_{ib} je indukované napětí od buzení a β je zátěžný úhel. [1]



Obr. 3.2 Rotor s vnitřním uložením permanentních magnetů (překresleno z [1])

Z obr. 3.2 (vlevo) je patrné, že pokud je vlna magnetického napětí reakce kotvy svojí amplitudou přesně v ose d , musí magnetická siločára v rotoru v ose d překonávat dvakrát cestu přes materiál permanentního magnetu s jeho nízkou hodnotou $\mu_{rM} \cong \mu_0$, tj. téměř jako přes vzduchovou mezeru. Jak se vlna magnetického napětí reakce kotvy posune svojí amplitudou přesně do osy q (obrázek vpravo), uzavírá se magnetická siločára v rotoru v ose q jen magneticky měkkým železným materiálem, tj. s velkou magnetickou vodivostí, a tedy mnohem větší permeabilitou jako μ_0 nebo $\mu_{rFE} \gg \mu_0$. Proto platí $X_q > X_d$. Tomu odpovídá charakteristika momentu v závislosti od zátěžného úhlu β , která je zobrazená na obr. 1.3a. [1]

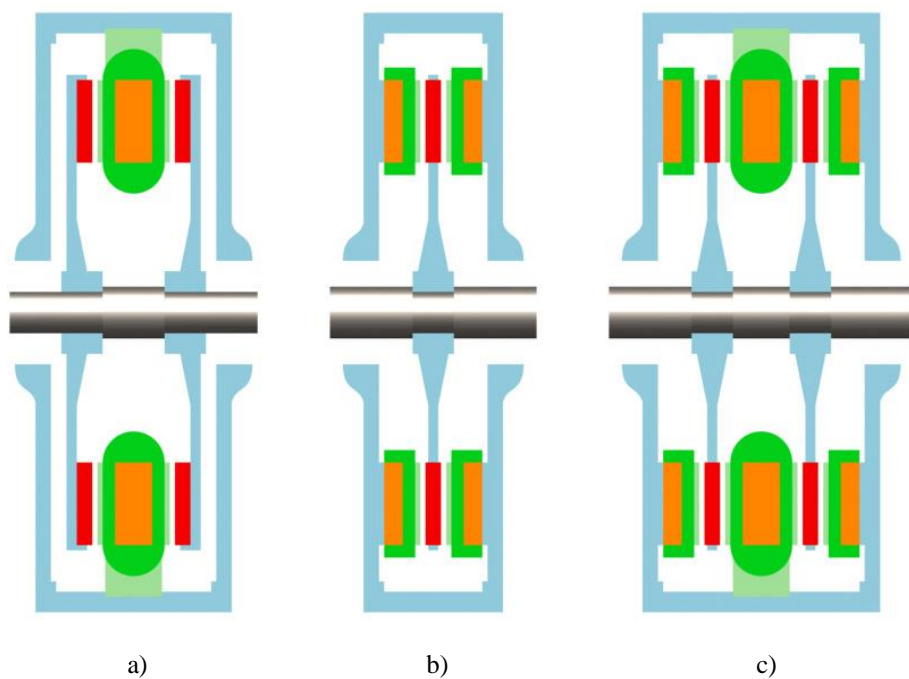


Obr 3.3 a) Moment M_e při $X_d < X_q$, b) moment M_e při $X_d > X_q$ (překresleno z [1])

Na obr. 3.3b je stejná charakteristika pro případ $X_d > X_q$, tj. pro uspořádání rotoru s povrchovými permanentními magnety, resp. klasické synchronní stroje s budícími cívkami na vyniklých pólech. [1]

3.1.3 Diskové PMSM

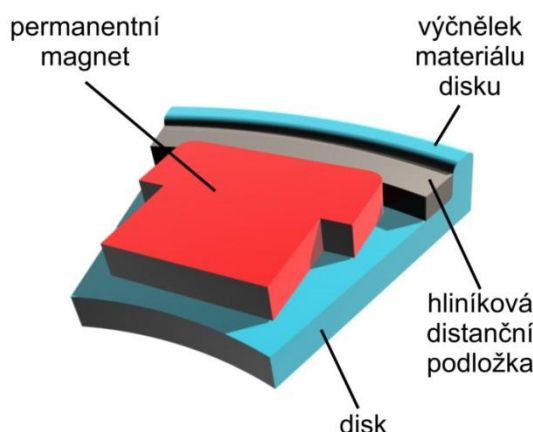
Synchronní diskové motory s permanentními magnety využívají krátkou axiální osu, a tedy malý moment setrvačnosti, v souvislosti s rychlou odezvou na řídicí impulsy. V případě zabezpečení proti odstředivým silám na vnějším obvodě disku se mohou použít pro velmi vysoké rychlosti. Jsou konstruovány ve třech základních typech (*obr. 3.4*). U všech tří typů jsou aktivní plochy uspořádané v radiálním směru a buď stator, nebo rotor, nebo oba dva členy jsou aktivní z obou stran. [1]



Obr 3.4 Uspořádání diskových synchronních motorů s permanentními magnety:

a) se statorem uprostřed, b) s rotorem uprostřed, c) dvoudiskové uspořádání (překresleno z [1])

Konstrukční uspořádání se statorem uprostřed (*obr. 3.4a*) má z obou stran rotační disky z permanentních magnetů. Rotační disky slouží k uzavření magnetického toku musejí být z magneticky měkkého materiálu. Na *obr. 3.5* je vidět uložení magnetu na rotačním disku. Výčnělek materiálu disku slouží k ochraně před odstředivými silami. Hliníková distanční podložka slouží k tomu, aby nedošlo ke zkratu permanentního magnetu. [1]



Obr. 3.5 Uložení magnetu na rotačním disku (3D model vytvořený podle obrázku z [1])

Konstrukční uspořádání motoru s rotorem uprostřed (obr. 3.4b) a s dvoudiskovým uspořádáním (obr. 3.4c) vyžaduje, aby diskové rotory byly z nemagnetického materiálu, neboť magnetický tok se uzavírá přes statickou část stroje. Používá se např. hliník nebo skleněná vlákna. Tento materiál má tu vlastnost, že se elektricky a magneticky chová neutrálně. Permanentní magnety jsou připevněny lepidlem. Odstředivé síly jsou zachycené tuhou a lehkou bandáží z uhlíkového vlákna. Toto spojení je dostatečně stabilní a vykazuje dobré vlastnosti i při vysokých rychlostech. [1]

U diskových motorů je důležitý tvar permanentních magnetů. Pokud má zůstat koeficient pólového krytí konstantní, měl by mít permanentní magnet klínový, lichoběžníkový nebo dvojstupňový tvar (obr. 3.5). Jeho šířka se mění úměrně s poloměrem. Výrobně je však výhodnější a cenově méně náročný pravoúhlý tvar. Potom se počítá tzv. střední koeficient pólového krytí, který bývá ohraničený na hodnotu 0,8. Při návrhu takového stroje v podstatě platí, že na dosažení určité amplitudy magnetické indukce se má použít magnet raději širší než vyšší. Výška magnetu určuje reaktanci a tím i vlastnosti stroje. Pomocí vyššího magnetu se navrhují stroje s menší magnetizační reaktancí a vyšším maximálním momentem. Výška magnetu, resp. síla disku určuje vzduchovou mezeru. Permanentní magnet má permeabilitu blízkou hodnotě μ_0 , takže permanentní magnet spolu s celým magnetickým diskem tvoří pro magnetický tok nevodivý prostor, který je třeba překonat spolu se skutečnými vzduchovými mezerami mezi diskem a statorem, resp. statorem a diskem. [1]

U diskových motorů pro vyšší rychlosti se zvyšující se frekvencí, se klade vyšší požadavek na satorové plechy, aby byly potlačeny ztráty vířivými proudy. S ohledem na směr toku a

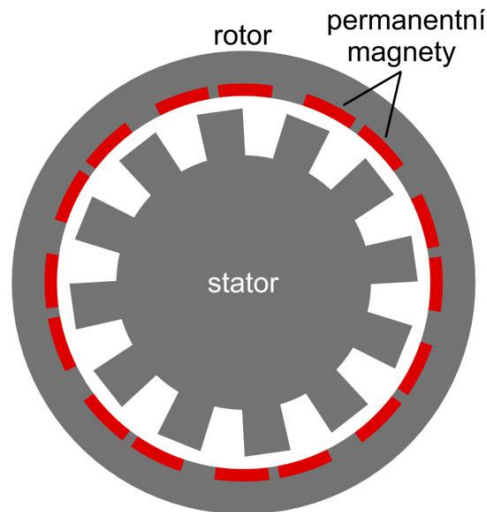
způsob uzavírání magnetické siločáry tvoří magnetický obvod statoru toroidní svinuté průběžné drážkované plechy (obr. 3.6). [1]



Obr. 3.6 Pohled na vnitřní čelní plochu statoru (3D model vytvořený podle obrázku z [1])

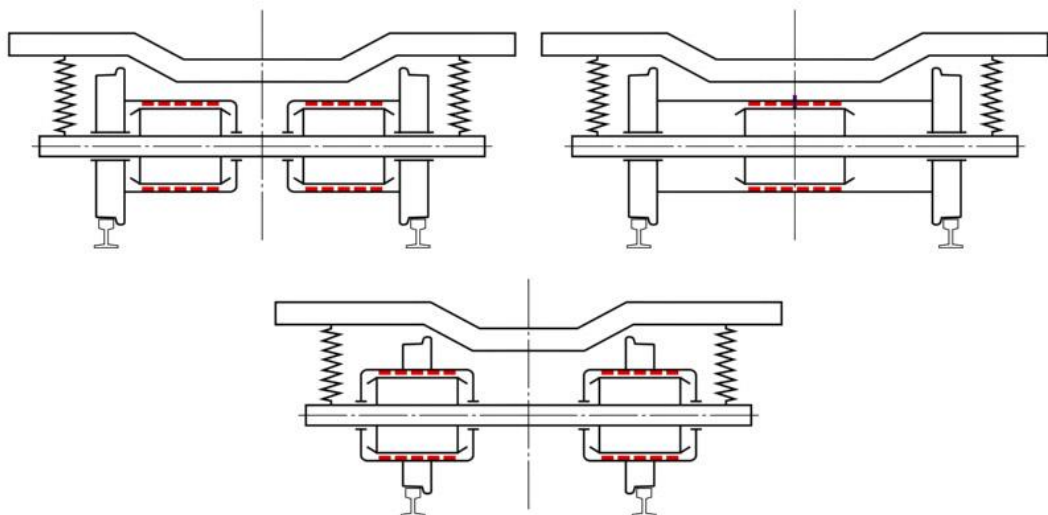
3.2 Synchronní motory s permanentními magnety s vnějším rotorem

Pro různá využití synchronních motorů s permanentními magnety je důležitá optimalizace poměru mezi délkou a průměrem. Limitujícím faktorem je většinou počet segmentů permanentních magnetů. Řešením tohoto omezení je zvolit kratší motor o větším průměru. Toho se např. využívá pro individuální pohon kol u silničních i železničních vozidel. Délka motoru ovlivňuje i účinnost stroje. Například dlouhý trakční motor o výkonu 40 kW má přibližně o 2 % vyšší účinnost než krátký motor o stejném výkonu. Minimalizace rozměrů vede k velké koncentraci výkonu s nutností účinného odvodu ztrátového tepla. U takto konstruovaných motorů se používá vodní chlazení. [7]



Obr. 3.7 Synchronní motor s permanentními magnety s vnějším rotorem (překresleno z [7])

Motory, které se používají k individuálnímu pohonu kol jsou zároveň součástí kola. Rotor s permanentními magnety takového motoru je napevno spojen s kolem a stator s třífázovým vinutím naopak pevně spojen s osou kola. Tyto motory jsou nazývány také jako nábojové motory. Používají se pro výkony od stovek wattů pro pohon lehkých jednostopých vozidel až po 60 kW pro individuální pohon kol nízkopodlažních tramvají. Princip napájení a řízení je stejný jako u provedení motorů s vnitřním rotorem. Různá konstrukční řešení trakčních pohonů PMSM s vnějším rotorem u nízkopodlažních tramvají je na obr. 3.8. [7]



Obr. 3.8 Různá konstrukční řešení trakčních pohonů PMSM s vnějším rotorem (překresleno z [7])

3.3 Porovnání provedení PMSM s vnějším a vnitřním rotorem

V současné době se synchronní motory s permanentními magnety stále více rozšiřují i v oblasti kolejových a silničních vozidel. Motory s vnitřním rotorem se uplatňují spíše k pohonu náprav kolejových vozidel. Naopak motory s vnějším rotorem nalézají více uplatnění u silničních vozidel a u některých nízkopodlažních tramvají. Přínosem použití trakčních motorů PMSM je možnost absence mechanické převodovky v pohonu kol nebo náprav vozidla. U kolejových vozidel není integrace motoru s vnějším rotorem do konstrukce kola výhodná, neboť toto řešení zvyšuje neodpružené hmoty a při jízdě dochází ke zvýšení mechanických rázů v trati a jejím okolí. [10]

Jednou z výhod u PMSM v provedení s vnějším rotorem oproti motorům v provedení s rotorem vnitřním je vyšší dosažitelný moment, který motor vytvoří při zachování stejného objemu a proudu motoru. Moment u synchronních motorů s permanentními magnety je závislý na objemu motoru, magnetické indukci ve vzduchové mezeře, počtu závitů vinutí a proudu procházejícím vinutím. Průměr vzduchové mezery je u motorů v provedení s vnějším rotorem větší než u motorů v provedení s rotorem vnitřním, a proto mohou motory s vnějším rotorem vytvořit vyšší moment při stejném proudu. [11]

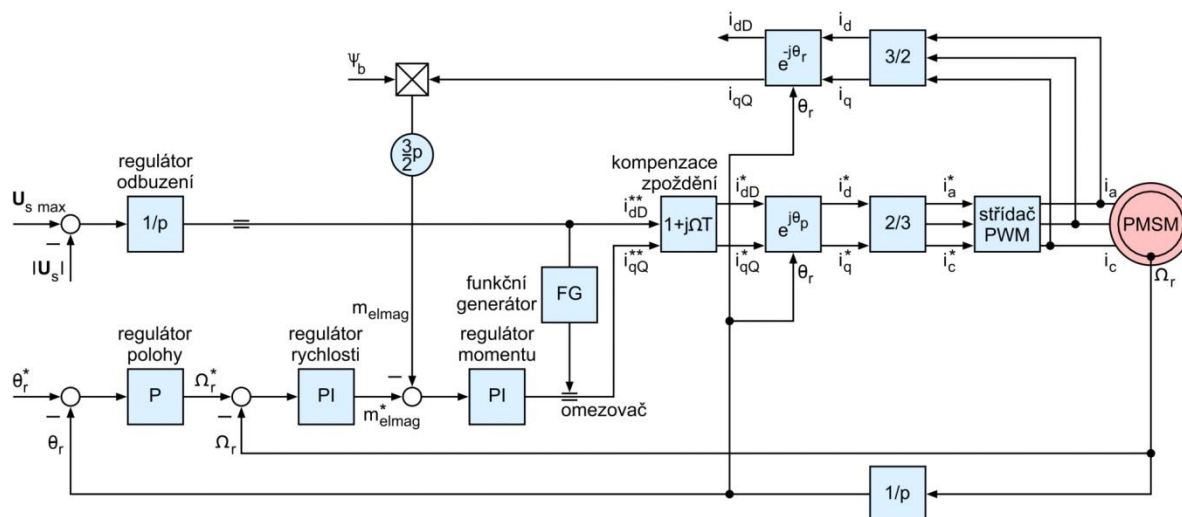
Naopak nevýhodou u PMSM v provedení s vnějším rotorem oproti motorům s vnitřním rotorem je horší odvádění tepla z vnitřního prostoru, a je tak nutné brát větší ohled na správnost tepelného návrhu. U motorů s vnitřním rotorem je teplo ze statoru odváděno přímo do okolního prostředí. [11]

Další výhodou u PMSM v provedení s vnějším rotorem oproti motorům v provedení s rotorem vnitřním je, že i při vysokých otáčkách zůstává motor stabilní, jelikož rotor zajišťuje magnety proti vlivu odstředivých sil. [12]

Dle výrobců lze stator otevřený směrem vně u provedení s vnějším rotorem snadněji navíjet, než je tomu u statorů se srovnatelnými vnitřními rotory. [12]

3.4 Regulace synchronních motorů s permanentními magnety

3.4.1 Vektorové řízení



Obr 3.9 Vektorové řízení synchronního motoru s permanentními magnety (překresleno z [11])

V současné době se pro regulaci synchronního motoru s permanentními magnety ve většině případů používá vektorové řízení. Při této metodě řízení jsou monitorovány dva fázové proudy a z nich jsou vytvořeny složkové proudy $I_d(t)$ a $I_q(t)$. Z rychlosti rotoru, která se měří, se získává integrací poloha rotoru θ_r . Hodnota úhlu θ_r je využita k převodu vektorů do souřadného systému statoru, a naopak do souřadného systému rotoru. Jako vstup do regulátoru odbuzení slouží rozdíl mezi omezeným napětím $U_{s,max}$ a skutečným napětím statoru U_s . Výstup se integruje, a získává se tak požadovaná hodnota podélné složky statorového proudu i_{dD}^* , přepočítaná do souřadného systému rotoru. Obdobně je rozdíl mezi požadovaným momentem a momentem skutečným zdrojem příčné složky statorového proudu i_{qQ}^* , rovněž přepočítané do souřadného systému rotoru. K hlídání překročení hodnoty statorového proudu slouží u vektorového řízení funkční generátor. [13]

Vzhledem k tomu, že regulace synchronního motoru s permanentními magnety pracuje s úhlem natočení rotoru, není skupinová regulace více motorů možná. Každý motor tedy má individuální napájení z vlastního střídače. [10]

Závěr

V současné době se budou při použití synchronních motorů asi nejvíce uplatňovat neodymové magnety (NdFeB). Jejich výhodou je extrémně vysoká hodnota energetického součinnu, vysoká hodnota koercitivity a vysoká remanence. Tyto přednosti umožňují zmenšit rozměry motorů, a tedy je výhodně použít např. jako hnací jednotky u kolejových a silničních vozidel. Motor s těmito permanentními magnety dosahuje dvojnásobné zmenšení rozměru a hmotnosti ve srovnání s asynchronním motorem se stejným výkonem a otáčkami. Takto zmenšený motor lze tedy u vozidel použít jako hnací jednotku, která nepotřebuje převodovku. Motor lze potom konstruovat jako pomaloběžný s větším počtem pólů. Ve srovnání s asynchronním motorem má synchronní motor s permanentními magnety větší účinnost danou neexistencí Jouleových ztrát v rotoru. Další výhodou je velká momentová přetížitelnost takového motoru.

Nevýhodou neodymových magnetů (NdFeB) je nízký rozsah pracovních teplot a také to, že jejich magnetické vlastnosti jsou ve značné míře závislé na teplotě. Další nevýhodou je jejich náchylnost ke korozi. V těchto případech jsou lepší samariové permanentní magnety (SmCo), které jsou však podstatně dražší.

I synchronní motory s permanentními magnety mají v porovnání s asynchronními motory některé nevýhody. Jejich konstrukce je složitější, a tedy jsou tyto motory celkově dražší. Další nevýhodou těchto motorů je, že se nedají odbudit. To má za následek problematické řešení při poruchových stavech motoru.

Vývoj v této oblasti není ukončen, takže vlastnosti těchto motorů se budou stále zlepšovat.

Použitá literatura

- [1] HRABOVCOVÁ V., L. JANOUŠEK, P. RAFAJDUS, a M. LIČKO. *Moderné elektrické stroje*. Žilina: Žilinská univerzita v Žilině, 2000. ISBN 80-7100-809-5.
- [2] MENTLÍK V., M. BEČKA, V. BOČEK, V. KOČOVÁ, Z. KRAUS, E. KUČEROVÁ, a J. RAIS. *Elektrotechnické materiály*. Plzeň: Fakulta elektrotechnická, Plzeň, 1996. ISBN 80-7082-227-9.
- [3] DUBSKÝ J. a Z. KRAUS. *Kovy a magnetické materiály*. Plzeň: VŠSE, 1965.
- [4] ENES Magnesy Pawel Zientek Sp. k. [online]. *Sortiment*. ©2014. [cit. 2014-04-10]. Dostupné z: <http://www.magnety-magnety.com/>
- [5] SINOMAG, s. r. o. [online]. *Magnety a teorie: Co je třeba vědět o permanentních magnetech*. ©2014. [cit. 2014-03-15]. Dostupné z: <http://www.sinomag.cz/sinomag.cz/?c=o-magnetech-slovník>
- [6] MAGSY, s.r.o. [online]. *Extra silné neodymové magnety NdFeB*. ©2014. [cit. 2014-03-15]. Dostupné z: <http://www.magsy.cz/24797-neodymovy-magnet-ndfeb>
- [7] NOVÁK, J. Uplatnění synchronních strojů v dopravní technice – 1. část. *Časopis Elektro*. Praha, 2006, 6/2006, s. 4–7, ISSN 1210-0889.
- [8] NEOMAG.CZ, VIDLIČKA, Marian [online]. *Jaká je „životnost“ magnetů?* ©2014. [cit. 2014-03-15]. Dostupné z: <http://www.neomag.cz/cz/381/f-a-q/>
- [9] ABC MAGNET, s. r. o. [online]. *O magnetech*. ©2014. [cit. 2014-04-10]. Dostupné z: <http://www.abcmagnet.cz/o-magnetech.php>
- [10] NOVÁK, J., O. ČERNÝ a J. ŠIMÁNEK. Regulace synchronního motoru pro lehkou kolejovou trakci. *Časopis Elektro*. 6/2008, s. 4-10. ISSN 1210-0889.
- [11] HÖLL, J. *Vysokomomentové elektromotory pro pohony nezávislé trakce v oboru manipulační techniky*. Brno, 2010. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [12] ETM.CZ – ELEKTROTECHNIKA ONLINE [online]. *Unikátní servomotor s vnějším rotorem*. ©2014. [cit. 2014-04-15]. Dostupné z: <http://www.etm.cz/index.php/etm/383-unikatni-servomotor-s-vnejsim-rotorem>
- [13] PISKAČ, L. *Elektrické pohony: Principy a funkce*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2008. ISBN 978-80-7043-688-2.