

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ
ELEKTRONIKY**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Tepelná závislost permanentních magnetů

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Josef BALATKA**

Osobní číslo: **E14B0001P**

Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**

Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**

Název tématu: **Tepelná závislost permanentních magnetů**

Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Popište druhy permanentních magnetů a jejich vlastnosti.
2. Popište způsoby testování permanentních magnetů.
3. Vytvořte model oteplování permanentního magnetu v magnetickém obvodu.
4. Realizujte experimentální měření a ověřte získaná data.
5. Provedte zhodnocení výsledků.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **30 - 40 stran**

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

Seznam odborné literatury:

1. **Hrabovcová,V.,Janoušek,L.,Rafajdus,P.,Ličko,M.:** Moderné elektrické stroje,ŽU, Žilina 2001.
2. **Internetové zdroje.**

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Pavel Světlík

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky³

Datum zadání bakalářské práce: **14. října 2016**

Termín odevzdání bakalářské práce: **8. června 2017**

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



Prof. Ing. Václav Kús, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2016

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na vysvětlení magnetismu, řešení permanentních magnetů a jejich způsobů testování. Dále se práce podrobněji zabývá zkoumáním tepelné závislosti permanentních magnetů. V práci je porovnán teoretický výpočet, simulace a praktické měření.

Klíčová slova

Magnetismus, permanentní magnet, tepelná závislost, neodymové magnety, feritové magnety, samariové magnety, AlNiCo, pryžové magnety, plastické magnety, testování, teplota.

Abstract

The bachelor thesis is focused on explanation of magnetism, permanent magnets and their methods of testing. Further, the thesis deals with the investigation of thermal dependence of permanent magnets. The thesis compares the theoretical calculation, simulation and practical measurement.

Key words

Magnetism, permanent magnet, thermal dependence, neodymium magnets, ferrite magnets, samarium magnets, AlNiCo, rubber magnets, plastic magnets, testing, temperature.

Prohlášení

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 práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 7.6.2017

Josef Balatka

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	11
1 MAGNETISMUS	12
1.1 MAGNETICKÉ VELIČINY	12
<i>Magnetická indukce</i>	12
<i>Intenzita magnetického pole</i>	12
<i>Magnetický indukční tok</i>	12
<i>Permeabilita</i>	12
1.2 DRUHY MAGNETIK	13
1.3 MAGNETICKÝ JEV.....	14
1.3.1 <i>Vliv teploty</i>	17
1.4 MAGNETOSTRIKCE	17
1.5 PERMANENTNÍ MAGNETISMUS.....	18
1.5.1 <i>Křivka prvotní magnetizace</i>	20
1.5.2 <i>Maximální energetický součin $(BH)_{max}$</i>	21
1.6 MAGNETIZACE PERMANENTNÍCH MAGNETŮ.....	22
1.7 STABILIZACE PERMANENTNÍCH MAGNETŮ	22
1.8 MAGNETICKÉ KAPALINY	23
2 PERMANENTNÍ MAGNETY	24
2.1 FERITOVÉ PERMANENTNÍ MAGNETY	24
2.2 ALNiCo MAGNETY.....	26
2.3 PERMANENTNÍ MAGNETY ZE VZÁCNÝCH ZEMIN	28
2.3.1 <i>Neodymové permanentní magnety</i>	29
2.3.2 <i>Samariové permanentní magnety</i>	31
2.4 PRYŽOVÉ PERMANENTNÍ MAGNETY.....	32
2.5 PLASTICKÉ PERMANENTNÍ MAGNETY	33
3 ZPŮSOBY TESTOVÁNÍ PERMANENTNÍCH MAGNETŮ	34
3.1 MĚŘENÍ MAGNETICKÝCH VLASTNOSTÍ.....	34
3.1.1 <i>Měření hystereziografem</i>	34
3.1.2 <i>Měření magnetické indukce teslametrem</i>	34
3.1.3 <i>Měření Helmholtzovou cívkou</i>	34
3.1.4 <i>Měření Fluxmetrem</i>	35
3.2 MĚŘENÍ PŘÍDRŽNÉ SÍLY	35
3.3 TEPLOTNÍ ZKOUŠKY	36
3.4 KOROZNÍ ZKOUŠKY	37
3.4.1 <i>Zkouška solnou mlhou</i>	37
3.4.2 <i>Zkouška v tlakové páře</i>	37
3.5 TOXIKOLOGICKÁ MĚŘENÍ.....	38
3.6 MĚŘENÍ ROZMĚRŮ.....	38
3.7 MĚŘENÍ MECHANICKÉ ODOLNOSTI.....	38
4 TEPELNÁ ZÁVISLOST PERMANENTNÍCH MAGNETŮ V MAGNETICKÉM OBVODU	40
4.1 MAGNETICKÝ OBVOD.....	41
4.2 TEORETICKÝ VÝPOČET	42
4.3 MODEL OTEPLOVÁNÍ V MAGNETICKÉM OBVODU.....	43
4.4 MĚŘENÍ.....	44
ZÁVĚR	46

SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....	47
PŘÍLOHY	49

Seznam symbolů a zkratk

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
H [Am ⁻¹]	Intenzita magnetického pole
H_c [Am ⁻¹]	Koercitivní intenzita magnetického pole
h_m [m]	Výška magnetu
I [A]	Elektrický proud
l [m].....	Délka
l_s [m].....	Střední délka závitu cívky
M [Am ⁻¹].....	Magnetizace
m [Am ⁻²]	Magnetický moment
m [kg].....	Hmotnost
Q [C].....	Elektrický náboj
S_V [m ²]	Plocha vodiče
T [°C].....	Teplota
T_C [°C]	Curieova (kritická) teplota
t [s].....	Čas
V [m ³].....	Objem
δ [m].....	Šířka vzduchové mezery
λ [-]	Koeficient magnetostrikce
μ [Hm ⁻¹]	Absolutní permeabilita
μ_r [-]	Relativní permeabilita
μ_0 [Hm ⁻¹].....	Permeabilita vakua
ρ [Ωm]	Měrný elektrický odpor
Φ [Wb].....	Magnetický (indukční) tok
AlNiCo	Slitina hliníku, niklu a kobaltu
NaCl.....	Chlorid sodný
NdFeB.....	Permanentní magnet na bázi neodymu, železa a boru
SmCo	Permanentní magnet na bázi samaria a kobaltu
TCNQ	Tetrakyno–chinodimethan

Úvod

Předkládaná bakalářská práce se zabývá všemi dostupnými druhy permanentních magnetů, jejich vlastnostmi a způsoby testování. Obsahuje výsledky a porovnání teoretického výpočtu, simulace a praktického měření tepelné závislosti neodymového magnetu.

Text je rozdělen do čtyř částí. První část se zabývá popisem magnetického jevu a jeho vlastností, hlavních fyzikálních veličin a rozdělením materiálů podle účinků magnetického pole. Druhá část se věnuje popisu všech dostupných permanentních magnetů, jejich vlastnostem a výrobním procesům. Třetí část je zaměřena na nejběžnější metody testování a kontroly permanentních magnetů od magnetických po mechanické zkoušky. Čtvrtá část se věnuje tepelné závislosti permanentních magnetů, obsahuje teoretický výpočet, výsledky simulace, která byla provedena v programu Agros2D, dále obsahuje výsledky praktického měření.

1 Magnetismus

1.1 Magnetické veličiny

Magnetická indukce

Magnetická indukce **B** vyjadřuje intenzitu silového působení magnetického pole na částice s magnetickým momentem. Je to vektorová fyzikální veličina, která je závislá na prostředí prostřednictvím absolutní permeability. V soustavě jednotek SI je pro její vyjádření používána jednotka tesla, zkratka T. [1]

Intenzita magnetického pole

Intenzita magnetického pole **H** vyjadřuje intenzitu silového působení vnějšího magnetického pole. Je to vektorová fyzikální veličina, která je nezávislá na prostředí. V soustavě jednotek SI je pro její vyjádření používána jednotka ampér na metr, zkratka A/m. [1]

Magnetický indukční tok

Magnetický indukční tok Φ vyjadřuje celkový tok magnetické indukce procházející danou souvislou plochou. Je to skalární fyzikální veličina. V soustavě jednotek SI je pro její vyjádření používána jednotka weber, zkratka Wb. [1]

Permeabilita

Permeabilita vakua μ_0 vyjadřuje magnetickou vodivost vakua. Je to skalární fyzikální veličina a je konstantní. Její hodnota je $4\pi \cdot 10^{-7}$. V soustavě jednotek SI je pro její vyjádření používána jednotka henry na metr, zkratka H/m. [1]

Relativní permeabilita μ_r vyjadřuje magnetickou vodivost prostředí, přesněji kolikrát je toto prostředí lepším magnetickým vodičem než vakuum. [1]

Absolutní permeabilita μ vyjadřuje skutečnou magnetickou vodivost prostředí. Je to skalární fyzikální veličina, která je závislá na velikosti relativní permeability prostředí. Za působení magnetické intenzity dochází buď k zesílení, nebo zeslabení pole v materiálu. [1]

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r \quad (1.1.)$$

1.2 Druhy magnetik

Magnetické pole může být vytvořeno v libovolném prostředí. Avšak magnetické pole určité intenzity vyvolá v odlišných prostředích různé účinky. Intenzita magnetického pole je nezávislá na prostředí, proto se magnetická indukce mění v závislosti na magnetických vlastnostech prostředí. Různé magnetické vlastnosti prostředí jsou vyjádřeny převážně pomocí relativní permeability prostředí, podle které se rozlišují materiály diamagnetické, paramagnetické a feromagnetické. [1]

Diamagnetické materiály mají hodnotu relativní permeability prostředí menší než 1. Tato látka má mírné zeslabující účinky na vnější magnetické pole. Mezi diamagnetické materiály patří inertní plyny, voda, bromid draselný, kuchyňská sůl, bizmut, rtuť, olovo, zlato, stříbro, organické látky a mnoho dalších látek. [1]

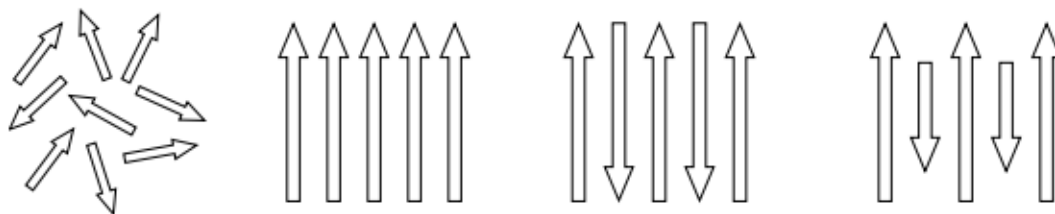
Paramagnetické materiály mají hodnotu relativní permeability prostředí větší než 1. Tato látka má mírné zesilující účinky na vnější magnetické pole. Atomy paramagnetických materiálů mají ve své valenční sféře elektronového obalu většinou méně než 4 elektrony. Mezi skupinu paramagnetických materiálů se řadí plynný kyslík, kapalný kyslík, hliník, platina, paládium, vanad, chrom, hořčík, sodík, vzduch, různé přechodné kovy, kovy vzácných zemin a mnoho dalších látek. [1]

Feromagnetické materiály mají hodnotu relativní permeability prostředí mnohokrát větší než 1. Tato hodnota se pohybuje řádově od 100 do 100 000. Atomy feromagnetických látek mají částečně neobsazené některé vnitřní sféry elektronového obalu. Tato látka má velmi silné zesilující účinky na vnější magnetické pole. Dá se říci, že to jsou paramagnetické látky, které obsahují v pevném stavu skupiny atomů, jejichž magnetické momenty jsou shodně orientovány i bez působení vnějšího magnetického pole. Shodná orientace magnetických momentů se označuje jako nasycený stav. Výsledné magnetické momenty jsou však orientovány náhodně a navzájem se kompenzují. Vnější magnetické pole svým vlivem natáčí magnetické momenty domén, to se projevuje zesílením magnetického pole a většinou i zmagnetováním materiálů. Při překročení Curieovy teploty, která je pro železo 770 °C, se změní feromagnetická látka na paramagnetickou a pokud je před tím zmagnetována, tak dojde k jejímu odmagnetování. Mezi feromagnetické látky patří železo, kobalt, nikl, gadolinium a slitiny těchto látek. [1]

Speciálními druhy feromagnetických materiálů jsou antiferomagnetické a ferimagnetické materiály.

Antiferomagnetické materiály mají stejně velké jednotlivé atomy a magnetické momenty mají orientovány opačně. Mezi tyto látky patří na příklad mangan. [1]

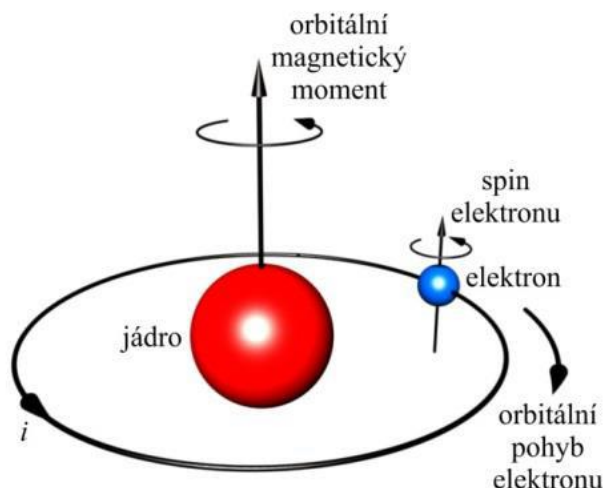
Ferimagnetické materiály nemají jednotlivé atomy stejně velké. Jejich magnetické momenty jsou orientovány opačně. Mezi tyto látky patří na příklad ferity, které jsou vyráběné práškovou technologií a sloučeniny jiných kovů. Mají velkou hodnotu poměrné permeability až po 10^5 . Jejich měrný elektrický odpor je mnohem větší než u feromagnetických látek. Proto se tento materiál používá pro výrobu cívek vysokofrekvenčních obvodů. [1]



Obr. 1.1. Uspořádání magnetických momentů – zleva: u paramagnetických, feromagnetických, antiferomagnetických a ferimagnetických materiálů [1]

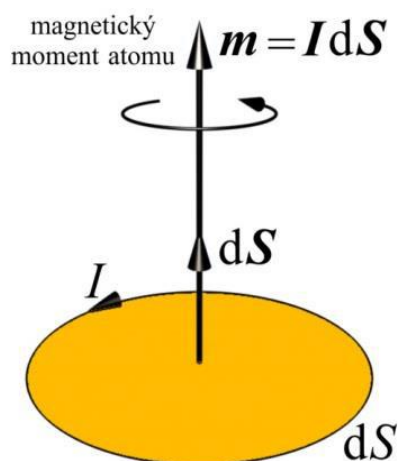
1.3 Magnetický jev

Pro stručné vysvětlení magnetického jevu použijeme jednoduchý model atomu, který se skládá z jádra obklopeného oblakem elektronů. Každý elektron má náboj $1,6 \cdot 10^{-19}$ C, přičemž předpokládáme, že náboj je soustředěný do velmi malého prostoru. Každý elektron se pohybuje po své kruhové dráze neboli po orbitě, a současně se otáčí okolo své vlastní osy. Proud je ekvivalentní pohybu elektronu, takže vytváří magnetický moment podél osy orbitu, nazýváme ho orbitální magnetický moment. Směr momentu se určuje pravidlem pravé ruky tak, že kladný proud ve smyčce je ekvivalentní pohybu záporného náboje elektronu, přičemž pohyb elektronu je opačný než směr proudu. [2]



Obr. 1.2. Orbitální pohyb elektronu [3]

Všechny elektrony mají ještě magnetický moment nezávislý na pohybu po své kruhové dráze. Tento moment vzniká vlivem otáčení náboje elektronu okolo své vlastní osy. Tomuto pohybu říkáme spin elektronu a magnetický moment nazýváme spinový magnetický moment nebo také elementární magnetický moment atomu. Protože elektron má určitou velikost elektrického náboje, má jeho spin i určitý měrný magnetický moment. Magnetický moment spinu má velikost $9,27 \cdot 10^{-24} \text{ A} \cdot \text{m}^2$ a orbitální magnetický moment je roven nule nebo je celočíselným násobkem této hodnoty. [2]



Obr. 1.3. Magnetický moment proudové smyčky [3]

Na popis tohoto jevu je použit jednoduchý model atomu, ve kterém je nahrazen orbitální i spinový pohyb elektronu elementárními proudovými smyčkami. Magnetické

pole, vytvořené smyčkovým proudem I , obklopující plochu dS a představované vektorem dS , je určeno orbitálním nebo spinovým magnetickým momentem m . [2]

$$m = IdS \quad (1.2.)$$

Atom, ve kterém nejsou vykompenzované magnetické momenty vytvořené spinovým a orbitálním pohybem elektronů, má jistý výsledný magnetický moment, který je roven vektorovému součtu všech magnetických momentů. Když v objemu V , je n takových atomů, pak každý z nich určuje magnetický moment m_i . Výsledný magnetický moment m je vytvořený vektorovým součtem těchto momentů. [2]

$$m = \sum m_i \quad (1.3.)$$

Vektorem magnetizace \mathbf{M} je dána magnetizace materiálu, kterou charakterizuje objemová hustota magnetických momentů. [2]

$$M = \lim_{\Delta V} \frac{1}{\Delta V} \sum m_i = \lim_{\Delta V} \frac{1}{\Delta V} m \quad (1.4.)$$

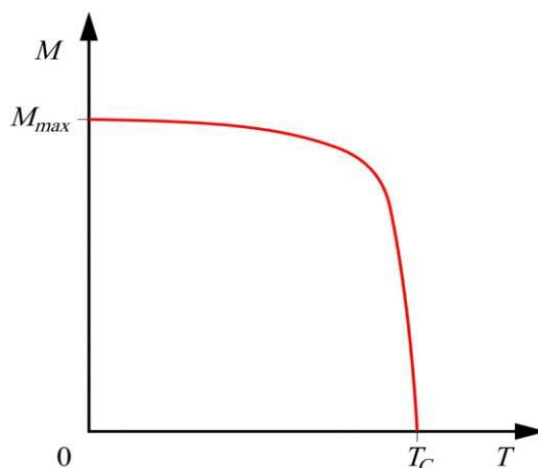
Síla s magnetickým momentem m působí na magnetický dipól uvnitř vnějšího magnetického pole s indukcí \mathbf{B} , a snaží se ho otočit tak, aby byl paralelně s magnetickou indukcí a měl i stejný směr. [2]

Magnetická indukce \mathbf{B} je složena ze dvou částí. Jedna z těchto částí je magnetická indukce vakua, $\mathbf{B}_0 = \mu_0 \mathbf{H}$, kde μ_0 je permeabilita vakua ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m). Druhá část je příspěvek magnetizace materiálu $\mu_0 \mathbf{M}$. U magnetických materiálů je vztah mezi intenzitou magnetického pole \mathbf{H} a magnetizací \mathbf{M} v lineární oblasti dán magnetickou susceptibilitou $\mathbf{M} = \chi \mathbf{H}$. Vztah mezi magnetickou indukcí a intenzitou magnetického pole je vyjádřen pomocí relativní permeability $\mu_r = 1 + \chi$. [2]

$$B = \mu_0 H + \mu_0 M = \mu_0 H + \mu_0 \chi H = \mu_0 (1 + \chi) H = \mu_0 \mu_r H \quad (1.5.)$$

1.3.1 Vliv teploty

Každý atom krouží kolem své střední polohy v krystalové mřížce za zvyšování teploty materiálu. Toto kroužení narušuje seřazení magnetických momentů. Z toho je jasné, že s rostoucí teplotou feromagnetického materiálu klesá jeho magnetizace. [2]



Obr. 1.4. Snižování magnetizace v závislosti na teplotě [3]

Vliv teploty na feromagnetické vlastnosti železa není velký, protože většina elektrických strojů má pracovní teplotu menší než 150 °C a Curieova teplota železa je 770 °C. U niklu je vliv teploty mnohem důležitější, protože jeho Curieova teplota je 348 °C. Největší je vliv teploty u prvků ze vzácných zemin, protože jejich Curieova teplota může být až pod běžnou pokojovou teplotou. [2]

1.4 Magnetostrikce

Pojmem magnetostrikce se rozumí změna tvarů a rozměrů feromagnetických těles vznikající při jejich magnetizaci. Magnetostrikce má tři druhy, podélnou, příčnou a objemovou. Určuje se podle toho, o jakou změnu se jedná. Může se jednat o změnu délky, šířky a objemu. Magnetostrikce se rozlišuje dále podle toho, jestli je kladná nebo záporná. Při kladné magnetostrikci dochází k prodloužení tělesa ve směru pole a při záporné naopak k jeho zkrácení. Během podélné magnetostrikce dochází také k příčné, to je způsobeno tím, že když se těleso prodlouží, tak dojde k jeho zúžení. Podélná a příčná magnetostrikce působí bez objemových změn. Objemová magnetostrikce se objevuje pouze při velmi vysokých intenzitách magnetického pole. Magnetostrikce je posuzována dle relativního prodloužení nebo zkrácení feromagnetického tělesa v magnetickém poli.

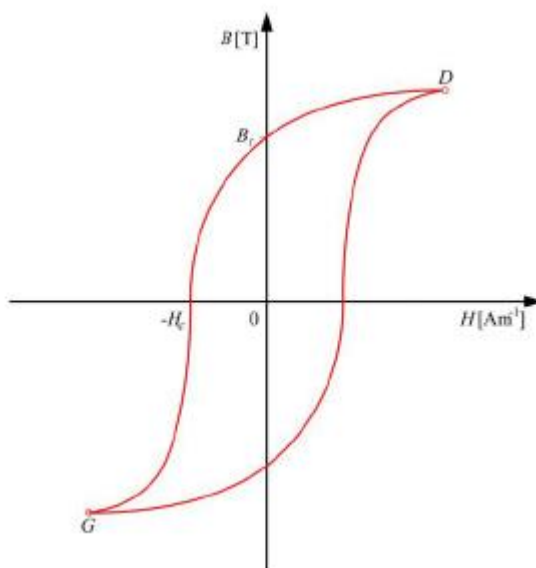
Toto relativní prodloužení nebo zkrácení je vyjádřeno pomocí koeficientu magnetostrikce λ . [6]

$$\lambda = \frac{\Delta l}{l} \quad (1.6.)$$

Tento koeficient nabývá u feromagnetických látek hodnot od 10^{-6} do 10^{-5} . Závisí převážně na hodnotě intenzity magnetického pole, při určité hodnotě intenzity se dosáhne nasycení a koeficient se dále nemění. [6]

1.5 Permanentní magnetismus

Magnetický tok ve vzduchové mezeře elektrického stroje může být vytvořen budícím vinutím, kterým protéká proud nebo permanentním magnetem. Permanentní magnet má veliké výhody v přeměně energie, protože nepotřebuje budící cívky, takže nezpůsobuje žádné ztráty v budícím vinutí. Tyto ztráty jsou v případě stroje s budícím vinutím způsobeny přeměnou elektrické energie na tepelnou. Permanentní magnetismus může mít každý feromagnetický materiál, který vykazuje určitou hodnotu remanentní indukce B_r , stačí ho jen podrobit cyklu magnetizace. Při zmenšování hodnoty intenzity magnetického pole H , dochází k pomalejšímu snižování hodnoty magnetické indukce B a nesleduje tak zpětně křivku prvotní magnetizace. Při odstranění intenzity magnetického pole zůstane magnetická indukce na hodnotě remanentní indukce. Tento proces je způsoben nevratnými změnami Blochových stěn. Pro zpětné získání nulové hodnoty magnetické indukce je potřeba záporné hodnoty intenzity magnetického pole $-H_c$. Této hodnotě se říká koercitivní síla. Magnetická hystereze je zpoždění magnetické indukce za magnetickou intenzitou. Hysterezní smyčka je vytvořena střídavou změnou magnetování a odmagnetování materiálu. Při tomto procesu vznikají ve feromagnetickém materiálu tepelné ztráty energie. Tyto ztráty jsou tzv. hysterezní ztráty a jsou úměrné ploše hysterezní smyčky. [2]

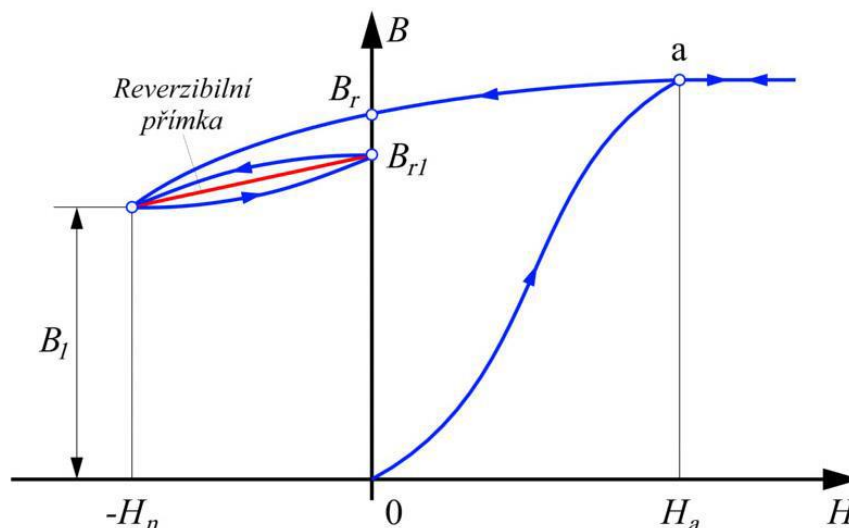


Obr. 1.5. Hysterezní smyčka [3]

Některé materiály mají mnohem trvanlivější permanentní magnetismus než železo. Jsou to slitiny železa, niklu a kobaltu. Tyto materiály jsou obvykle tepelně zpracovány, toto tepelné zpracování má za následek mechanickou tvrdost výsledného permanentního magnetu. Z tohoto důvodu se permanentní magnety dělí na materiály měkké a tvrdé. [2]

V měkkých materiálech se počáteční magnetizace při nízkých hodnotách magnetické intenzity vytvoří vlivem pohybu doménových stěn. U magneticky tvrdých materiálů vzniká struktura s velmi malými prodlouženými krystaly, tato struktura brání v pohybu doménových stěn. Tato struktura vzniká složením a tepelným zpracováním. V magneticky tvrdých materiálech se největší přírůstek magnetizace objeví při náhlé nevratné změně natočením domén o 180°. Tím, že domény zůstanou v této pozici i po odstranění magnetické intenzity se vytvoří vysoká remanence permanentních magnetů a koercivita, která je více než tisíckrát větší než u měkkých materiálů. [2]

Pro použití permanentních magnetů je velmi důležitý druhý kvadrant hysterezní smyčky. Tato část je označována jako demagnetizační křivka neboli demagnetizační charakteristika. Demagnetizační křivka se používá při popisování vlastností různých materiálů permanentních magnetů. Použití této křivky má opodstatnění při konstrukci a výrobě elektrických strojů. [2]



Obr. 1.6. Demagnetizace a reverzibilní přímka [3]

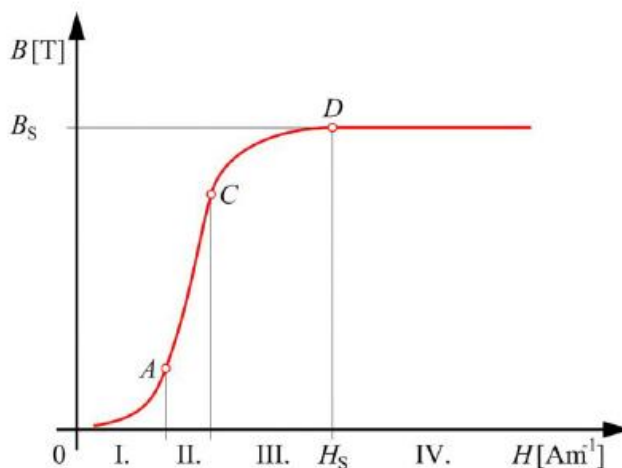
Reverzibilní úsečka, která je vidět na Obr. 1.6, vznikla jako náhrada elementární smyčky vzniklé opětovným působením magnetické intenzity \mathbf{H}_n . Elementární smyčka vznikne tím způsobem, že se odstraní působení magnetické intenzity \mathbf{H}_n a magnetická indukce se změní z hodnoty \mathbf{B}_l na hodnotu \mathbf{B}_{r1} . Tato hodnota je menší než hodnota původní remanentní indukce \mathbf{B}_r . Takto vzniklá reverzibilní přímka, resp. směrnice přímky, určuje reverzibilní permeabilitu. [2]

1.5.1 Křivka prvotní magnetizace

Feromagnetické látky mají výsledné momenty atomů se souhlasnou orientací obsaženy v doménách. Směr magnetických momentů v doménách závisí na krystalografických osách krystalu. Velikost domén je v rozmezí od 10^{-3} po 10^{-6} cm³. Domény mají mezi sebou tzv. Blochovy stěny, ty umožňují přechody magnetických momentů. Blochova stěna má tloušťku od 10^{-8} po 10^{-6} m. Pokud je feromagnetický materiál vystaven působení vnějšího magnetického pole a jeho intenzita bude postupně navyšována, tak bude narůstat i magnetická indukce podle křivky prvotní magnetizace. [15]

Bez přítomnosti vnějšího magnetického pole jsou momenty jednotlivých domén orientovány neuspořádaně. Momenty s neuspořádanou orientací se vzájemně vyruší a výsledný magnetický moment je tedy nulový. Při působení vnějšího magnetického pole a při zvyšování jeho intenzity se domény se shodným směrem magnetického momentu začnou zvětšovat. Tento proces lze ještě označit jako vratný. Při dalším zvyšování intenzity

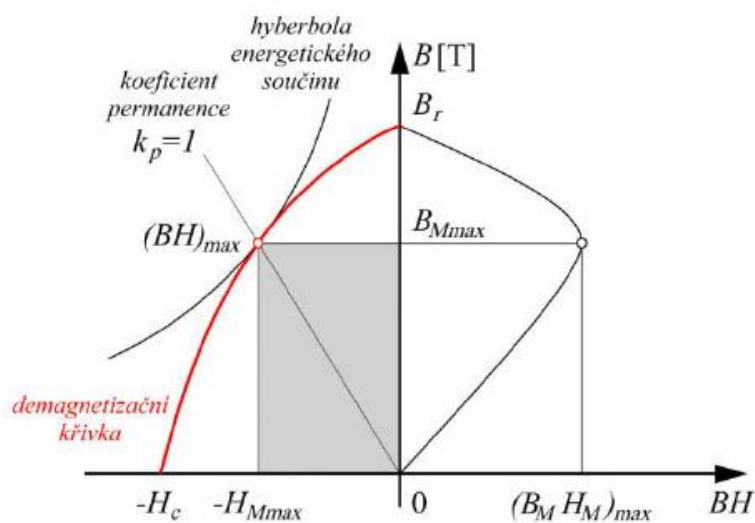
vnějšího magnetického pole se začínají doménové stěny přemísťovat a natáčet do směru, kterým působí vnější magnetické pole. Tento proces již nelze vrátit. Nevratný posuv probíhá po skocích. Při dané velikosti intenzity magnetického pole již budou všechny domény natočeny ve směru vnějšího magnetického pole a materiál se stane nasyceným. Při dalším zvýšení intenzity vnějšího magnetického pole dojde pouze k nepatrné změně. [2]
[15]



Obr. 1.7. Křivka prvotní magnetizace [3]

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

Maximální energetický součin je bod na demagnetizační křivce, který je velmi důležitý pro porovnání vlastností permanentních magnetů. Nachází se tam, kde má absolutní hodnota magnetické indukce a magnetické intenzity své maximum, což můžeme vidět na Obr. 1.8. [2]



Obr. 1.8. Energetický součin $(BH)_{max}$ a demagnetizační charakteristika [3]

Díky tomuto bodu můžeme zjistit maximální vnější energii, kterou vytvoří jednotkový objem materiálu magnetu. Tato energie nemusí být v magnetu přímo uložena, je to jen míra uložení energie. Maximální energetický součin dále ukazuje odolnost permanentního magnetu proti demagnetizačním účinkům vnějšího magnetického pole. [2]

1.6 Magnetizace permanentních magnetů

Permanentní magnety se vyrábějí převážně v nezmagnetizovaném stavu. Před jeho použitím se musí magnet vystavit silnému působení vnějšího magnetického pole. Tento proces se nazývá magnetizace. Ta nastane okamžitě po přiložení dostatečně velkého magnetického pole k magnetu. Kvůli tomu se začaly rozvíjet metody impulzové magnetizace, díky které je možné vytvořit dostatečně silné magnetické pole. Magnet je umístěn do cívky, kterou protéká krátký, ale velmi silný impulz dostatečně vysokého proudu, který je získán vybitím sady kondenzátorů přes cívku. [2]

Magnet může být zmagnetován před, nebo po vložení do obvodu kam patří, to záleží na konkrétní situaci. V některých aplikacích je přímka zátěže na konečném místě mnohem strmější, než u volného magnetu. Magnetizace na místě je tedy jediným řešením, jak dosáhnout dané hodnoty. Avšak u některých aplikací je zmagnetování na místě nemožné a to u částí, které jsou blízko sebe a mají být zmagnetovány v opačném směru. Magnetizace na místě často vyžaduje speciální cívky a šablony, které jsou velmi nákladné. Materiály, které mají demagnetizační charakteristiku jako přímku, mohou být předmagnetizované, protože jejich zpětná přímka leží v blízkosti demagnetizační charakteristiky. Při montáži se však musí dávat velký pozor na to, že velké předmagnetizované části mohou vytvořit velké síly, které by mohly zapříčinit poškození zařízení, nebo poranění osob. Pro úplnou magnetizaci je za potřebí velmi vysoká hodnota magnetické intenzity převážně u magnetů, které mají vysokou hodnotu koercitivní síly. [2]

1.7 Stabilizace permanentních magnetů

Když je magnetický systém s permanentním magnetem vystavený demagnetizující intenzitě, jako je tomu u točivých elektrických strojů, tedy u motorů, kde je permanentní magnet vystaven účinkům reakce kotvy, tak magnet nebude pracovat na demagnetizační křivce, ale na reverzibilní přímce. Tato přímka je určena stabilizováním magnetu, tedy tak, že se magnet vystaví stejným demagnetizujícím účinkům jako při provozování. [2]

1.8 Magnetické kapaliny

Tyto kapaliny se zdánlivě jeví jako nemagnetické do té doby, dokud nepůsobí v jejich blízkosti vnější magnetické pole. Byly vyvinuty v NASA v 60. letech 20. století a používaly se k řízení toku tekutého paliva kosmických raket magnetickým polem za stavu beztláče. V současné době se již k tomuto účelu nepoužívají, ale jsou pro ně nové způsoby využití. Magnetické kapaliny se dělí na ferokapaliny a na magnetoreologické kapaliny. [8]

Ferokapaliny (ferrofluidy) jsou magnetické kapaliny, které jsou tvořeny malými feromagnetickými částicemi kulovitěho tvaru. Tyto částice mají v průměru 3 až 15 nm a nacházejí se v nosné kapalině, tou může být voda, glykol, nebo syntetický či minerální olej. V této kapalně suspenzi se vedle magnetických nanočástic a nosné kapaliny nacházejí také povrchově aktivní látky, těmi jsou surfaktanty, které snižují povrchové napětí kapaliny. Když je ferokapalina přitahována k permanentnímu magnetu, tak dochází ke změně jejího skupenství z kapalného na pevné. V tom okamžiku, kdy dojde k oddálení magnetu, se ferokapalina změní zpět z pevného skupenství na kapalně. Uplatnění této kapaliny se nachází jako ochrana hardwaru proti prachu, jako mazací a utěšující suspenze ložisek hřídelí, nebo jako chladivo ve strojním obrábění. Dále se využívá jako chladivo u cívek reproduktorů proto, že se jako jediná dokáže udržet mezi mezerou cívky a nástavci, ale pouze za stálého působení magnetického pole. Ferokapaliny jsou dále zkoumány v medicíně, kde by mohli vést ke snadnějšímu diagnostikování a léčby rakoviny. [8]

Magnetoreologické kapaliny mají třikrát větší hustotu, než voda. Jejich částice obsahují povrchově aktivní látky a nekolidní suspenze feromagnetických mikročástic, které mají velikost kolem 5 μm . Tyto feromagnetické mikročástice jsou často obsaženy ve vodě, či oleji. [8]

2 Permanentní magnety

Permanentní magnet je objekt, který tvoří ve svém okolí magnetické pole. K jeho vytvoření nepotřebuje žádné vnější vlivy. Objevují se přirozeně v některých nerostech, ale dají se i vyrobit. Veškeré magnety mají minimálně dva póly, alespoň jeden severní a alespoň jeden jižní pól. Pól není věc na, nebo uvnitř magnetu. Je to pouze pojem sloužící k popisu magnetu. Severní a jižní pól se zdají jako dvě oddělené oblasti, ale není tomu tak. Magnet nemá místo, kde by byl jen severní, nebo jižní pól. Když se magnet rozlomí, vzniknou dva magnety a každý bude mít svůj severní i jižní pól. Pokud budeme lámat magnety dál, může se stát, že bude magnet tak malý, že si neudrží své magnetické pole. Některé magnety si udrží magnetické pole i po jejich rozdělení na molekulární úroveň. [11]

Permanentní magnety silně přitahují, nebo odpuzují jiné materiály. Materiál, jehož permeabilita (propustnost) je vysoká, je přitahován k magnetu velkou silou. Materiál s vysokou permeabilitou je například železo a ocel. Naopak voda má permeabilitu tak malou, že jí magnetické pole mírně odpuzuje. Permeabilita se dá změřit prakticky u všeho, například u lidí, vakua a plynů. [11]

2.1 Feritové permanentní magnety

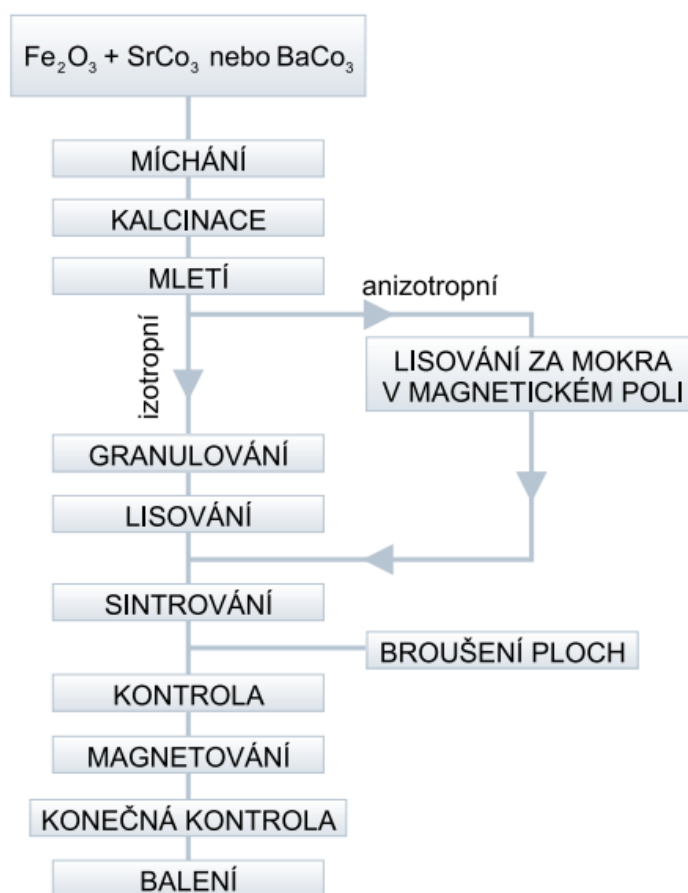
Feritové magnety jsou dnes nejvíce používanou skupinou magnetů. Jejich celková spotřeba je větší jak 300 000 tun za rok a ta nadále stoupá. Neustálý pokrok je nejen v kvalitě, ale i v sortimentu. Tyto magnety mají největší rozměrový i tvarový výběr a nejnižší cenu za kilogram, což je také jejich největší výhodou. Vedle těchto permanentních magnetů se v praxi často používají i magneticky měkké ferity jako jádra cívek transformátorů. [4]

Tyto magnety se používají při výrobě elektromotorů, magnetických separátorů a reproduktorů. Jsou to běžné černé magnety, které se nejčastěji používají jako přídržné magnety na lednici, nebo na kancelářských nástěnkách. [5]

Feritové permanentní magnety se vyrábějí práškovou metalurgií. Tento materiál má povahu keramického materiálu, proto se jim často říká keramické permanentní magnety. Jejich hlavními vlastnostmi je tvrdost a křehkost. Proto musíme být při manipulaci se

zmagnetovanými výrobky v blízkosti jiných magnetů nebo feromagnetických materiálů velmi opatrní. Feritové magnety se vyrábí v předem daných provedeních, které je možné upravit pomocí jemného broušení. Musí se ale dávat pozor, aby se u broušené plochy příliš nezvýšila teplota. U těchto magnetů není potřeba povrchové úpravy, protože nejsou náchylné na korozi. [4] [5]

Chemický vzorec těchto materiálů je $XO \cdot 6(Fe_2O_3)$, kde X může být prvek barya (Ba), nebo stroncia (Sr), ale také olova (Pb). Surový materiál se jako první rozemele na prášek o velikosti zrnka okolo 1 μm . Namletý prášek je lisovaný pod neustálým působením magnetického pole o velikosti 500 kA/m a to může být suchou, nebo mokrou cestou. Slisované těleso je poté spékáno (sintrováno) po dobu dvou hodin na vzduchu o teplotě 1300 °C, při tomto spékání se jeho velikost zmenší asi o 15 %. [2]



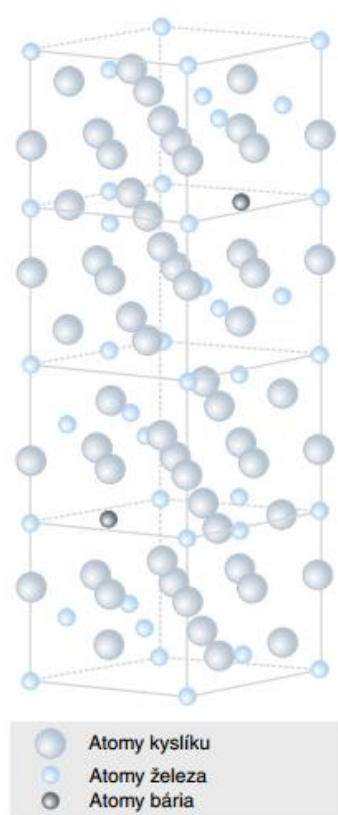
Obr. 2.1. Blokové schéma výroby feritového permanentního magnetu [1]

Feritové magnety se mohou rozdělit podle postupu výroby na slabší izotropní a silnější anizotropní. Izotropní magnety se vyrábějí lisováním, neboli suchou cestou a potom dochází k magnetování v magnetickém poli. Jejich výhodou je možnost magnetovat magnety v libovolných směrech. Anizotropní magnety se vyrábějí vstřikováním do výrobní

formy při stálém působení magnetického pole, tento proces se nazývá mokrá cesta. Jejich magnetování je na rozdíl od izotropních možné pouze ve směru, který byl zvolen při výrobním procesu. [5]

Izotropní magnety mají stejné vlastnosti ve všech směrech díky lisování bez působení magnetického pole. Izotropní magnety jsou levnější než anizotropní. Pracovní teplota feritových magnetů se pohybuje od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+250\text{ }^{\circ}\text{C}$. [1]

Krystalické vlastnosti



Strontnaté ferity jsou stále více používanou skupinou permanentních magnetů. Jejich chemický vzorec je $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$. Strontnaté ferity mají vysokou hodnotu koercivity, čímž se také liší od barnatých feritů. [1]

Barnaté ferity jsou nejpoužívanější skupinou magneticky tvrdých feritů. Jejich chemický vzorec je $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$. [1]

Krystalické buňky barnatých i strontnatých feritů mají hexagonální strukturu, jedna buňka obsahuje 2 molekuly, což je dohromady 68 atomů, 34 atomů na jednu molekulu. Dochází zde k umístění dvou atomů baria, nebo stroncia na místa atomů kyslíku. [1]

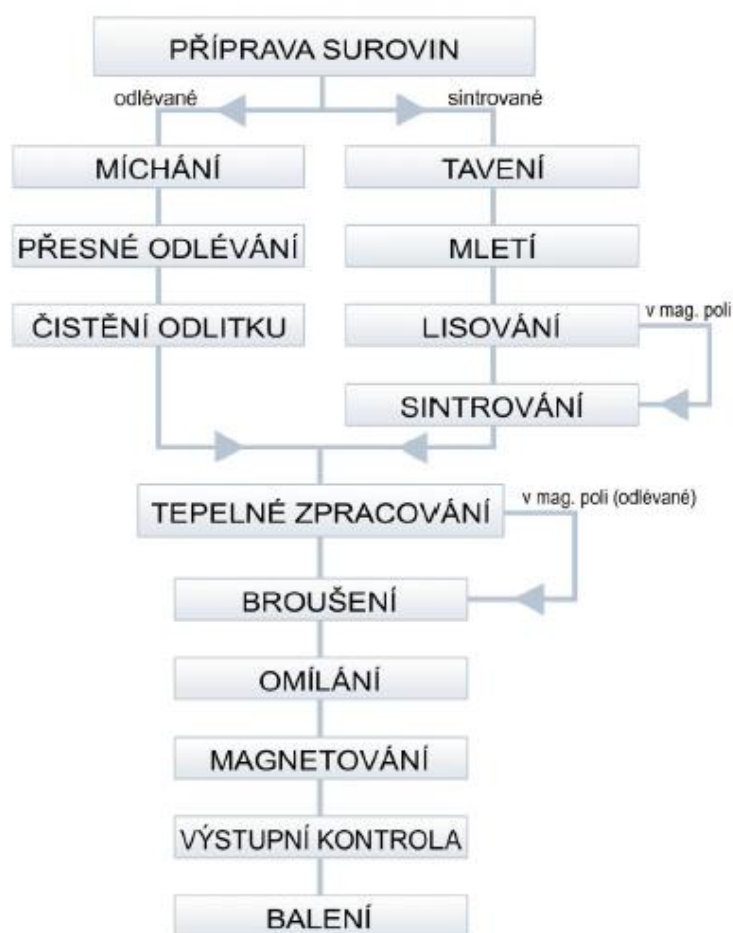
Obr. 2.2. Krystalická buňka barnatého feritu [1]

2.2 AlNiCo magnety

AlNiCo jsou slitinové magnety obsahující hliník, nikl a kobalt. Dále obsahují železo, měď a titan. AlNiCo magnety jsou velmi silné. Síla těchto magnetů se dá srovnávat se silou neodymových magnetů. Největší výhodou těchto magnetů je vysoká tepelná odolnost. Jejich použití je možné až do teploty $525\text{ }^{\circ}\text{C}$, u neodymových magnetů je použití možné pouze do $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ a u SmCo do $300\text{ }^{\circ}\text{C}$. Další předností těchto slitinových magnetů

je jejich vysoká chemická odolnost. Vyznačují se vysokou remanentní indukcí a nízkou koercivitou. [5]

AlNiCo magnety můžeme řadit mezi materiály s dlouhou tradicí. Přestože magnety na bázi vzácných zemin pomalu vytlačují ostatní magnety, tak si AlNiCo magnety stále drží svou pozici na trhu. Během jejich vývoje se značně zlepšily magnetické parametry a to díky tomu, že byly vyvinuty anizotropní magnety. Dnes je možné vyrobit různé tvary díky metodě přesného odlévání. [4]



Obr. 2.3. Blokové schéma výroby AlNiCo magnetu [1]

Rychle se zjistilo, že ochlazováním odlitků v magnetickém poli je možné dosáhnout mnohem vyšší magnetické energie, v případě že se magnetování provádělo ve stejném směru, jako působilo magnetické pole při chladnutí materiálu. Změřily se magnetické vlastnosti ve směru magnetizace a v kolmém směru na směr magnetizace a zjistilo se, že ve směru magnetizace jsou magnetické vlastnosti mnohem silnější. Protože se všeobecně vyžadují vlastnosti permanentních magnetů jen v jednom směru, tak se většina z nich vyrábí právě tímto způsobem. [2]

Jako jiné speciální oceli jsou i tyto slitinové magnety vyráběny slévárenskými technologiemi. Materiál AlNiCo magnetů je tvrdý, a proto je jejich obrábění velmi náročné. Jejich magnetická energie je po magnetech ze vzácných zemin nejsilnější. Díky vysoké Curieově teplotě se tyto magnety nasazují při vyšších teplotách. Používají se například v elektromotorech středních velikostí, generátorech, reproduktorech a v mnohém dalším. [4]

Mechanické vlastnosti těchto slitin jsou velice nevhodné. Jsou, jak již bylo zmíněno velice tvrdé a křehké. Odlitky se během chladnutí zmenšují, takže je potřeba broušením upravit na požadovaný tvar a velikost. [2]

2.3 Permanentní magnety ze vzácných zemin

Permanentní magnety na bázi vzácných zemin jsou velmi výkonné a kvalitní. Jsou k dispozici tři různé typy magnetických materiálů (Sm, Nd) a přechodového kovu (Co, Fe). Jejich základem jsou příslušné intermetalické fáze SmCo_5 , $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ a $\text{Nd}_2\text{Ne}_{14}\text{B}$. [1]

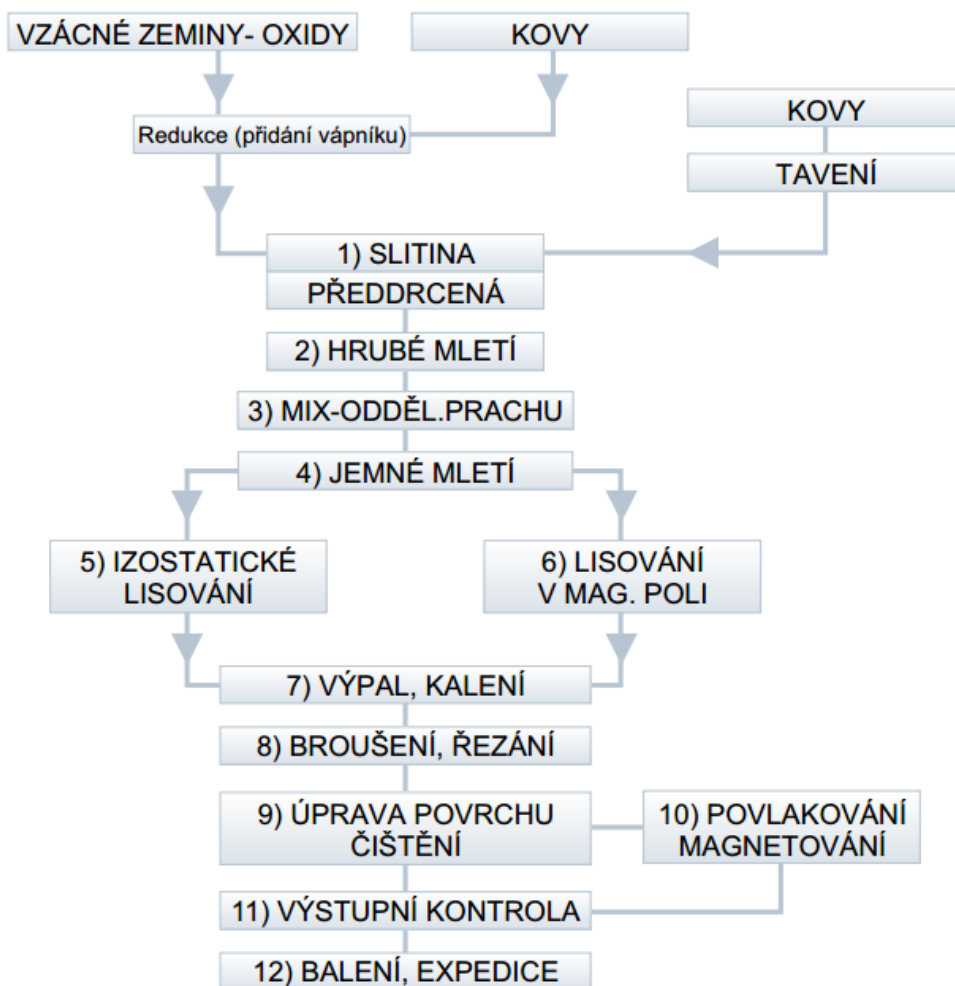
Tyto permanentní magnety mají výrazně vyšší hodnoty koercivity (H_{cJ}) a remanence (B_r) nežli AlNiCo a feritové permanentní magnety. Magnety ze vzácných zemin se považují za kovové materiály, které mají podobné vlastnosti. Po opracování se tyto magnety lesknou. [1]

Permanentní magnety jsou řezány z izostaticky lisovaných surových magnetů, nebo jsou lisovány v příčném, nebo axiálním poli a to podle velikosti, tvaru a tolerancí. Lisováním v příčném poli vzniká H-materiál a v axiálním poli vzniká W-materiál. Každý z těchto materiálů má rozdílné magnetické vlastnosti, to je způsobeno různými výrobními procesy. H-materiály mají vyšší remanenci (B_r). Koercivita (H_{cJ}) je u obou materiálů téměř identická. [1]

Pro magnetizaci potřebují permanentní magnety ze vzácných zemin ve srovnání s feritovými permanentními magnety přibližně trojnásobnou velikost intenzity magnetického pole. Této intenzity magnetického pole však nelze dosáhnout klasickými systémy pro magnetizaci, ale musí se využít systému magnetovacích cívek s vysokým výkonem. [1]

2.3.1 Neodymové permanentní magnety

Neodymové permanentní magnety mají složení NdFeB (neodym-železo-bór). Jejich výroba se provádí spékáním, neboli sintrováním z práškových kovů se vzácným prvkem neodymem, který byl objeven v roce 1885. [7]

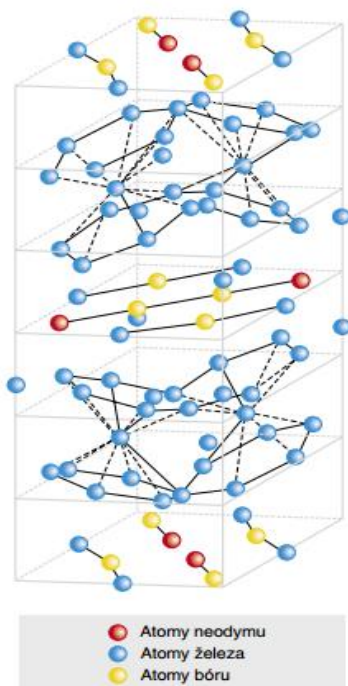


Obr. 2.4. Blokové schéma výroby permanentních magnetů ze vzácných zemin [1]

Síla neodymového magnetu je několikrát větší než u klasických feritových magnetů. Jsou to nejsilnější magnety, které známe. Ferit například z reproduktoru zvedne pouze několik gramů, ale neodym o stejné velikosti zvedne až 10krát více. Velkou nevýhodou těchto magnetů je nízká provozní teplota, jejich magnetické vlastnosti se zhoršují již při teplotě nad 130 °C. Záleží na materiálu, který je použit při výrobě. Neodymové magnety s vyšším koeficientem permanence zvládají vyšší teploty bez změn magnetických vlastností. Tyto magnety jsou křehké, ale ne tak, jako feritové, nebo SmCo. Obrábění je možné pouze před magnetizací a za použití diamantových nástrojů. Po magnetizaci je možné pouze jemné broušení pomocí diamantového kotouče za stálého chlazení.

Neodymové magnety jsou velice náchylné na korozi, a proto se musí jejich povrch pokrývat tenkou ochrannou vrstvou, tomuto procesu se říká povlakování. To může být prováděno kovem, nebo plastem. Při kovovém povlakování se nanáší tenká vrstva korozivzdorného kovu, nejčastěji se využívá galvanického pokovení. Tímto pokovením dochází ke snížení magnetické indukce až o 5 %. Při povlakování plastem se nejčastěji používá parylen, nebo epoxidová pryskyřice. Toto povlakování je vhodné pro všechny feromagnetické materiály a vytváří těsný a uzavřený povlak. Je prováděno při pokojové teplotě, tím se zamezí termickému poškození permanentního magnetu. Jejich hmotnost je o 13 % menší, než u SmCo a feritových magnetů. Magnetizaci lze provádět na mnoho způsobů, záleží na jejich použití. [1] [7]

Neodymové magnety mají mnoho využití především tam, kde je za potřebí velká přídržná síla, nebo malé rozměry. Nepostradatelné jsou převážně v automobilovém a elektrotechnickém průmyslu, či strojírenství. Používány jsou převážně k výrobě elektronických a mechanických částí do počítačů a mikrovlnných trub. Dále se používají na příklad v rotorech, statorech, lineárních motorech, magnetických spojkách, separátorech, detektorech kovů, ale i v systémech proti zlodějům. Neodymové magnety se využívají i v oblastech jako je nábytkářství, kde se používají v zavíracích mechanismech skříněk a zásuvek. Neodymy jsou také součástí některých mechanických hraček. [4] [8]



Krystalické vlastnosti

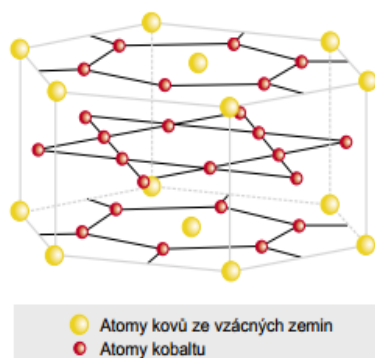
Krystalická buňka krystalu $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ je svým strukturním typem podobná CaCu_5 . Hlavní buňku tvoří čtyři podjednotky, které jsou složeny z 68 atomů. Krystalická struktura je tetragonální, i když atomy železa zde mohou tvořit hexagonální švy. Do neodymových permanentních magnetů se často přidávají další legující prvky. Na příklad částečným nahrazením neodymu dysprosiem zvyšuje koercitivní sílu. Hlavní magnetizační osa je rovnoběžná s osou c a je kolmá k základní ploše. [1]

Obr. 2.5. Krystalická buňka $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ [1]

2.3.2 Samariové permanentní magnety

Kolem roku 1960 byl vynalezen samariový permanentní magnet, který spojuje výhody vysoké remanence a koercivity, která je lehce nižší než u NdFeB. [2]

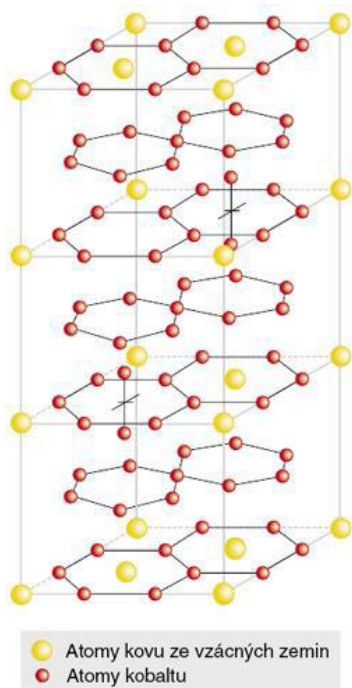
Chemický vzorec těchto permanentních magnetů tvoří samarium a kobalt v poměru SmCo_5 , nebo $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$. Jsou vyráběny podobně jako neodymové permanentní magnety spékáním velmi jemně rozemletých substancí neboli sintrováním z práškových kovů. Jejich přímé slévání není možné. Samariové magnety mají velkou přídržnou sílu při malých rozměrech. Samariové magnety jsou tvrdé a poměrně křehké. Je důležitá opatrnost při manipulaci se zmagetovanými výrobky v blízkosti feromagnetických materiálů a dalších magnetů, protože by mohlo dojít k jejich poškození. Tyto magnety jsou vyráběny již v hotových tvarech, které lze upravit broušením. Při broušení se musí hlídat teplota ploch, aby nebyla překročena maximální povolená teplota. Samariové permanentní magnety mají nižší přídržnou sílu, než neodymové permanentní magnety. Výhodou proti NdFeB magnetům je jejich vyšší teplotní odolnost a to až do 300 °C, neodymy mají teplotní odolnost maximálně do 200 °C. Další velkou výhodou je odolnost proti korozi, takže nemusí být jako NdFeB magnety pokrývány ochrannou povrchovou vrstvou. Dříve byla cena samariových magnetů mnohem vyšší než u neodymových, dnes se rozdíly v cenách těchto magnetů podstatně snížily. Samariové permanentní magnety se používají tam, kde je za potřeby vysoký výkon a odolnost vůči vyšším teplotám. Použití těchto magnetů je v podobných aplikacích jako neodymy a to na příklad ve výkonných generátorech, dynamech, elektromotorech, magnetických spojkách, brzdách a elektromobilech. Dále se využívají v mikrofonech, reproduktorech, sluchátkách a v autodráhách. [4] [8]



Krystalické vlastnosti

Krystal SmCo_5 je základní krystalický typ permanentních magnetů na bázi vzácných zemin s přechodovým kovem. Krystalická buňka tohoto krystalu má hexagonální strukturu s mřížkovými parametry. Jsou v ní tvořeny hexagonální podmřížky atomy kobaltu a samaria. Hlavní magnetizační osa je kolmá k základní ploše. [1]

Obr. 2.6. Krystalická buňka SmCo_5 [1]



Krystal $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ je složen ze dvou atomů samaria a 17 atomů přechodného kovu. Přechodný kov obsahuje velké množství kobaltu, ale i další prvky jako je železo, měď, zirkonium. Slitina obsahuje 25 % samaria. Nečistoty uvnitř magnetu brání v pohybu doménovým stěnám a tím dochází k zlepšení odolnosti proti přepólování. Možné krystalické struktury jsou romboedrické, nebo jako u SmCo_5 hexagonální. Přednostní osa magnetizace je kolmá k základní rovině. [1]

Obr. 2.7. Krystalická struktura $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ [1]

2.4 Pryžové permanentní magnety

Většina klasických permanentních magnetů mají špatné mechanické vlastnosti, které omezují jejich použití, je to především jejich tvrdost a většinou i křehkost. Tyto vlastnosti vyplývají z podstaty struktury magneticky tvrdých materiálů. Kvůli těmto vlastnostem musíme magnety chránit před tvrdými nárazy, protože by mohlo dojít k mechanickému poškození. Další vyplývající nevýhodou je velmi omezená úprava tvaru. [4]

Protože požadavky na magnety narůstaly, bylo nutné vytvořit takový magnetický materiál, který nebude křehký. Díky tomu vznikly pryžové permanentní magnety, které jsou pružné, ohebné, ale hlavně nejsou křehké. V dnešní době se těmto permanentním magnetům říká také magnetická pryž. Je vyráběna z jemného prášku magneticky tvrdého materiálu, který je pojen s elastoplastickou hmotou. Materiál připomíná svým vzhledem tvrdou pryž většinou hnědé barvy. Čím vyšší má materiál obsah magnetického prášku, tím nižší je jeho elasticita a vyšší magnetická síla. Tento materiál se vyrábí jako tenké fólie s tloušťkou od 0,3 do 4 mm. Také se vyrábí jako pruhy, pásy, silnější desky a různé tvarové profily. Magnetizace se provádí stejně jako u klasických permanentních magnetů buď dipólová, nebo multipólová. Použití magnetické pryže se dnes nachází převážně

v reklamních oblastech, při výrobě držáků drobných předmětů, ale i v průmyslových oblastech. [4]

2.5 Plastické permanentní magnety

Plastickým permanentním magnetům se také často říká magnetoplasty čili plastové magnety. Tento druh permanentních magnetů je pojen plastem. Mechanické vlastnosti jsou ovlivňovány použitým plastem. První plastový magnetický materiál byl vyroben v roce 2001 v USA. Ve srovnání s klasickými permanentními magnety jsou magnetoplasty poměrně mladé. Tento materiál však vykazoval magnetické vlastnosti pouze při teplotě kolem $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$. První plastický magnet, který vykazoval magnetické vlastnosti při pokojové teplotě, byl vyroben ve Velké Británii. K vytvoření tohoto magnetu byl použit polymer, který tvořily dvě složky PANi a TCNQ. Magnetické pole těchto magnetů tvoří volné radikály. [8]

Běžné permanentní magnety jsou vyráběny sintrováním, nebo odléváním kovů. Obě metody mají omezenou tvarovou složitost a hlavně rozměrovou přesnost. Kvůli zvýšeným nárokům na produktivitu a rozměrovou přesnost bylo nutné vytvořit speciální technologii výroby permanentních magnetů. Vznikl materiál, který je technologií výroby podobný plastům. Práškový magnetický materiál je smíchán s práškovým pojivem na bázi pryskyřice a následně je slisován a teplem vytvrzen, nebo se vstříkuje za zvýšené teploty v polotekutém stavu. Díky tomuto výrobnímu způsobu se mohou vyrábět složitější tvary permanentních magnetů s přesností až $0,01\text{ mm}$. Dnes je možné vyrobít najednou například magnet se zalisovanou hřídelí, což výrazně zvyšuje produktivitu při výrobě. [4]

Plastické permanentní magnety jsou vyráběny většinou na zakázku. Při výběru tohoto typu magnetu je nutné počítat s tím, že má poněkud nižší magnetické vlastnosti, než ekvivalentní klasický magnet. Je to způsobeno obsahem magnetického prášku, který dosahuje 60 až 80 %. Díly, které nejsou tvarově náročné, se vyrábějí lisováním, tyto díly dosahují vyšších magnetických parametrů. Pro tvarově náročnější díly se používá levnější metoda vstřikování při vyšších teplotách. Použití těchto permanentních magnetů je převážně v sériové průmyslové výrobě. Jejich ekonomická přínosnost je znatelná při sériích nad 10 000 kusů. [4]

3 Způsoby testování permanentních magnetů

Permanentní magnety můžeme testovat různými způsoby, hlavní z nich jsou měření magnetických vlastností, měření přídržné síly, teplotní zkoušky a měření mechanické odolnosti.

3.1 Měření magnetických vlastností

3.1.1 Měření hystereziografem

Důležité magnetické parametry permanentních magnetů jsou vnitřní. To znamená, že se samy neprojevují, jako hmotnost, nebo teplota, ale musí být měřeny v daném systému. Změny systému vlivem měřeného magnetu pak udávají jeho magnetické parametry. Pro měření charakteristiky se používá hystereziograf. Je to elektromagnetický obvod se vzduchovou mezerou, ve které je uložen měřený magnet. Plynule se mění proud cívku elektromagnetu a najednou se odečítá intenzita magnetického pole H a magnetická indukce B v měřeném magnetu. Z těchto hodnot se sestaví hysterezní křivka, ze které můžeme odečíst důležité parametry, jako je koercivita, remanence a maximální součin. Změřením více hysterezních křivek při různých teplotách můžeme získat důležité informace o teplotním chování permanentního magnetu. [9]

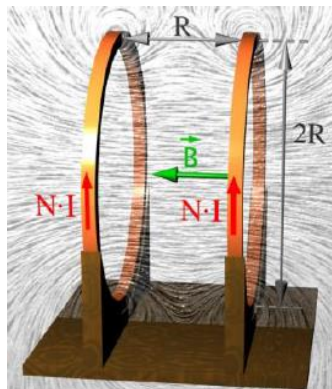
3.1.2 Měření magnetické indukce teslametrem

Měření teslametrem je proti hystereziografu velice jednoduché. Před začátkem měření je nutná kalibrace přístroje. Využívá se měřící sondy, která se umísťuje v dané vzdálenosti od magnetu. Obvykle se magnetická indukce měří na povrchu magnetu, nebo v takové vzdálenosti, jako bude použit v magnetickém obvodu. Získaná hodnota se může ověřit podle parametrů výrobce, hystereziografem, nebo početní metodou. [9]

3.1.3 Měření Helmholtzovou cívku

Měřením pomocí Helmholtzovy cívky můžeme získat hodnoty koercitivní intenzity H_c , remanentní indukce B_r , maximálního energetického součinu BH_{max} a orientace úhlu magnetické osy. Tato cívka se skládá ze dvou totožných kruhových cívek, které jsou umístěny v dané vzdálenosti. Měřený permanentní magnet je umístěn ve středu mezi cívkami, ve kterých protéká proud stejné velikosti i směru. Ve středu mezi cívkami

se vytvoří stacionární magnetické pole. Permanentní magnet se v tomto poli začne pohybovat. Tímto pohybem je způsobena změna magnetického indukčního toku a tím je vytvářeno napětí v cívce. Když známe pohyb, objem magnetu, permeabilitu a koeficient remanence, tak můžeme určit potřebné hodnoty. [10]



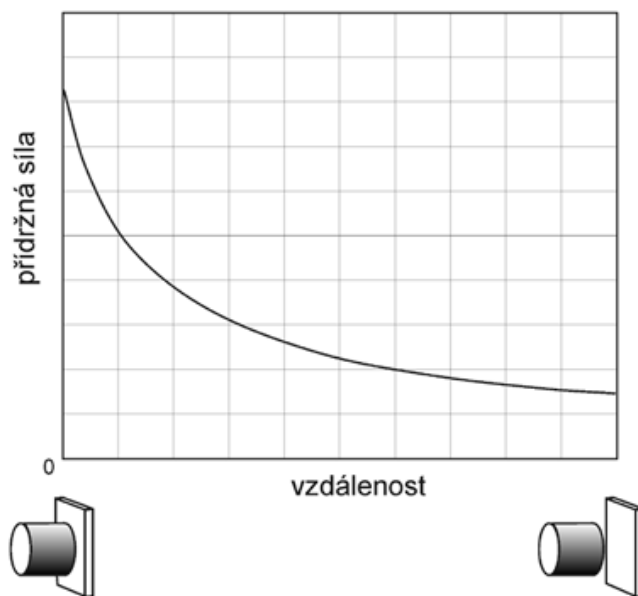
Obr. 3.1. Stacionární magnetické pole mezi Helmholtzovými cívkami [13]

3.1.4 Měření Fluxmetrem

Tímto měřením se zjišťuje celková velikost magnetického toku, který vychází z magnetu. Fluxmetr je složen z cívky, u které je známý počet závitů. Tato cívka je obtočena okolo permanentního magnetu a je připojena k měřicímu zařízení. Při pohybu magnetu uvnitř cívky dochází k indukci proudu v cívce. Pomocí fluxmetru dochází k integraci indukovaného proudu a tím je umožněno zobrazení celkového magnetického toku, který vychází z magnetu. Fluxmetr se dále využívá na ověření nasycenosti magnetu při jeho magnetizaci. [10]

3.2 Měření přídržné síly

Tato zkouška je důležitá, protože u permanentních magnetů se velmi často využívá jejich přídržné síly k feromagnetickým materiálům. Přídržnou sílu magnetu není snadné určit, závisí totiž nejen na velikosti, tvaru a typu permanentního magnetu, ale také na materiálu, ke kterému se magnet přitahuje. U tohoto materiálu je důležitá tloušťka a povrchová úprava. Přídržná síla permanentního magnetu se výrazně zmenšuje při oddálení od podložky. Před měřením se musí definovat všechny parametry. Samotné měření se provádí pomocí siloměru, při kterém je magnet upnut na testovací desku. Testovací zařízení plynule zvyšuje svou sílu a zaznamenává hodnoty. [5] [9]



Obr. 3.2. Přidržná síla permanentních magnetů vůči ocelové podložce [9]

3.3 Teplotní zkoušky

Při těchto zkouškách se musí dávat pozor na fakt, že různé druhy magnetů mají různou teplotní odolnost. Pokud dojde k překročení mezní hodnoty teploty, začíná se pomalu snižovat magnetizace. Proces snižování magnetizace má dvě složky vratnou a nevratnou, které nemají charakter ostré hrany. Curieova (kritická) teplota určuje hodnotu, při které klesne magnetizace na nulu. Maximální (pracovní) teplota udává hodnotu, do které lze magnet použít. [9]

Tab. 1 Maximální a Curieovy teploty permanentních magnetů [16]

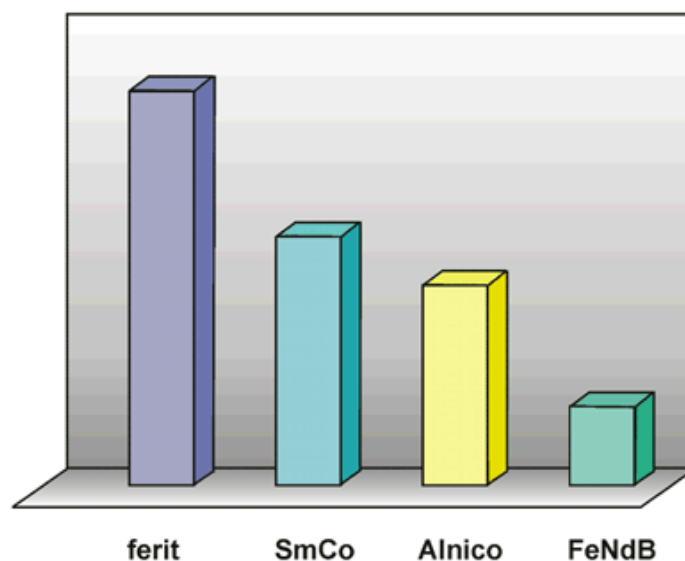
Druh magnetu	Maximální teplota [°C]	Curieova teplota [°C]
Neodymový magnet	220	310
Strontnatý ferit	300	460
Samariové magnet	350	750
AlNiCo magnet	540	860

Pro běžnou kontrolu teplotní odolnosti se používá měření magnetického toku a magnetické indukce. Magnet se postupně zahřívá z pokojové teploty T_0 až po kritickou teplotu T_k . Doba, za kterou by se měl magnet zahřát na kritickou teplotu, se stanoví dle jeho velikosti. Avšak tato teplota nesmí být menší než 20 minut. Následně se teplota magnetu nechá ustálit zpět na pokojovou teplotu. Porovnávají se hodnoty před teplotním procesem a po něm. Největší povolený pokles těchto parametrů je 5 %. Přítomnost magnetického pole ovlivňuje teplotní chování magnetů. V případě stejné orientace

magnetického pole a vektoru vnitřní magnetizace jsou účinky teploty mírně zeslabeny, v opačném případě jsou její účinky zesíleny. [9]

3.4 Korozní zkoušky

Každý typ permanentního magnetu má jinou korozní odolnost. V případě neodymového magnetu je jeho odolnost proti korozi tak slabá, že je nutná jeho povrchová úprava. Povrch těchto magnetů se pokrývá tenkou vrstvou niklu, stříbra, zlata, nebo epoxidu. [9]



Obr. 3.3. Korozní odolnost permanentních magnetů [9]

Pro tuto zkoušku se používají dva způsoby, zkouška solnou mlhou a tlakovou parou. Korozní odolnost permanentních magnetů je vidět na Obr. 3.3. [9]

3.4.1 Zkouška solnou mlhou

Zkouška solnou mlhou probíhá tak, že se permanentní magnet ponechá v solné mlze s 5 % koncentrací NaCl. Teplota se pohybuje okolo 35 °C a potřebná doba pro tuto zkoušku se určí dle povrchové úpravy magnetu, tato doba se pohybuje mezi 24 a 72 hod. Po této zkoušce permanentní magnet nesmí jevit viditelné známky koroze. [9]

3.4.2 Zkouška v tlakové páře

Zkouška v tlakové páře probíhá tak, že se permanentní magnet ponechá v páře o tlaku 270 kPa, při relativní vlhkosti 100 %, za těchto podmínek se magnet ponechá 7 dnů.

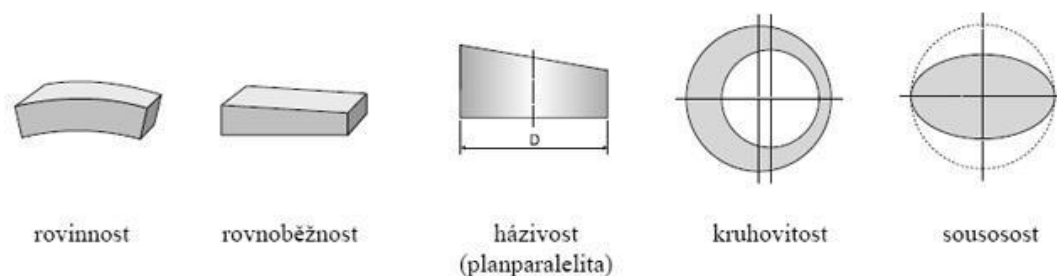
Maximální povolený úbytek hmotnosti permanentního magnetu je stanoven na 5 mg/cm^2 . [9]

3.5 Toxikologická měření

Toxikologická měření se nejčastěji provádí u magnetů, které se používají ve zdravotnictví. Z feritových magnetů je bezpečnější používat strontnaté ferity, protože v kyselém prostředí může dojít k uvolňování baria. U některých druhů magnetů se musí dbát na bezpečnost osob při jejich výrobě, může dojít k vdechnutí prachu s obsahem kobaltu. Ten je obsažen v AlNiCo magnetech, ale může být i v magnetech ze vzácných zemin. [1]

3.6 Měření rozměrů

Tato zkouška je velice jednoduchá, patří ke každé výstupní zkoušce. Spočívá v měření rozměrů pomocí měřicího přístroje, kterým může být na příklad posuvné měřítko, nebo mikrometr, který může být vybaven digitálním ukazatelem. Tyto přístroje nesmí být citlivé na působení magnetického pole permanentního magnetu. Permanentní magnety mohou mít různé tvary, v některých případech je nutné měřit jejich rozměry a geometrii na speciálních trojrozměrných měřicích přístrojích, výsledné hodnoty jsou zpracovány počítačem. Konkrétní rozměrové tolerance a odchylky geometrického tvaru a ploch permanentních magnetů jsou definovány vždy pro konkrétní zakázku. Nároky na dodatečné opracování jsou velmi vysoké, proto se klade důraz na kvalitu výroby, aby odchylky byly co nejmenší. [9]



Obr. 3.4. Geometrické odchylky permanentních magnetů [1]

3.7 Měření mechanické odolnosti

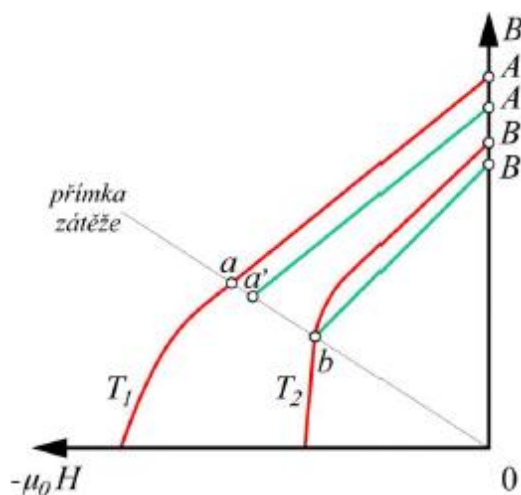
Tato zkouška se provádí převážně pro aplikace, ve kterých dochází k mechanickému namáhání. Permanentní magnet je podroben mechanickému namáhání tahem, tlakem a střihem. Toto namáhání musí magnet vydržet bez viditelného poškození. Nejhorší

mechanickou odolnost mají feritové permanentní magnety, jelikož jsou svou povahou velmi křehké. Poškození těchto magnetů vzniká již při výrobě a nelze se jich vždy úplně vyvarovat. Při testování nových vzorků dochází ke zvyšování namáhající síly až do doby, než dojde k jeho destrukci, poté se můžou tyto vzorky bezpečně dimenzovat. Tato metoda tedy patří do skupiny destruktivních testovacích metod. [1]

4 Tepelná závislost permanentních magnetů v magnetickém obvodu

V případě, že je materiál na delší dobu vystaven vysokým teplotám, můžou v něm nastat změny, které omezují schopnost materiálu zmagnetovat se. V některých případech se materiál může stát nemagnetickým. Důležitou hodnotou je Curieova teplota, při které dochází k úplné ztrátě magnetizace. Další hodnotou je teplota, při které dochází k metalurgickým změnám. Při nižší Curieovo teplotě, než je teplota, při které nastávají metalurgické změny lze materiál opět zmagnetizovat a vrátit mu tak jeho původní vlastnosti. To je na příklad ferit, který lze na krátký čas vystavit vyšší teplotě, než je Curieova a tím jej odmagnetovat. Tento proces se často využívá v průmyslových aplikacích pro snazší manipulaci. [2]

Vratné změny jsou v určitém rozsahu lineární, takže k určení nové remanentní indukce a koercivity stačí použít tepelné koeficienty. Hysterezní smyčka mění svůj tvar v závislosti na teplotě. Při zvyšování teploty dochází u všech permanentních magnetů ke ztrátě remanence. Při teplotě nad 70 °C na příklad feritový magnet ztratí 10 % remanence, po jeho ustálení na pokojové teplotě se opět zotaví. [2]



Obr. 4.1. Nevratné změny magnetického toku permanentního magnetu [3]

Nevratné změny neboli nevratné ztráty magnetického toku permanentního magnetu nastanou, když se remanentní indukce po tepelném procesu změní na nižší hodnotu, než je původní hodnota při pokojové teplotě. Z Obr. 4.1. je patrné, že provozní teplotě T_1 odpovídá bod a. Remanentní indukce se nachází v bodě A. Při zvýšení teploty na hodnotu

T_2 se přesune pracovní bod do bodu b a tomuto bodu odpovídající remanentní indukce se nachází v bodě B'. Skutečná remanentní indukce se však nachází v bodě B, protože koleno smyčky je nad bodem b. Při klesnutí teploty na T_1 se pracovní bod přesune do bodu a'. Po opakování cyklu se remanentní indukce stabilizuje v bodě A'. Došlo k nevratné změně. Na původní hodnotu remanentní indukce se lze dostat pouze opětovnou magnetizací za nižší teploty. [2]

Velmi dobrou teplotní stabilitu mají permanentní magnety slitiny AlNiCo, viz Tab. 1. Podobně jsou na tom magnety SmCo u kterých je materiálový vývoj téměř ukončen a výrobci mají materiály již zcela sjednocené. Takže jejich teplotní koeficienty od různých výrobců jsou celkem identické. Ovšem neodymové permanentní magnety mají nízký rozsah pracovních teplot, takže jejich magnetické vlastnosti jsou velmi závislé na teplotě. [7] [8]

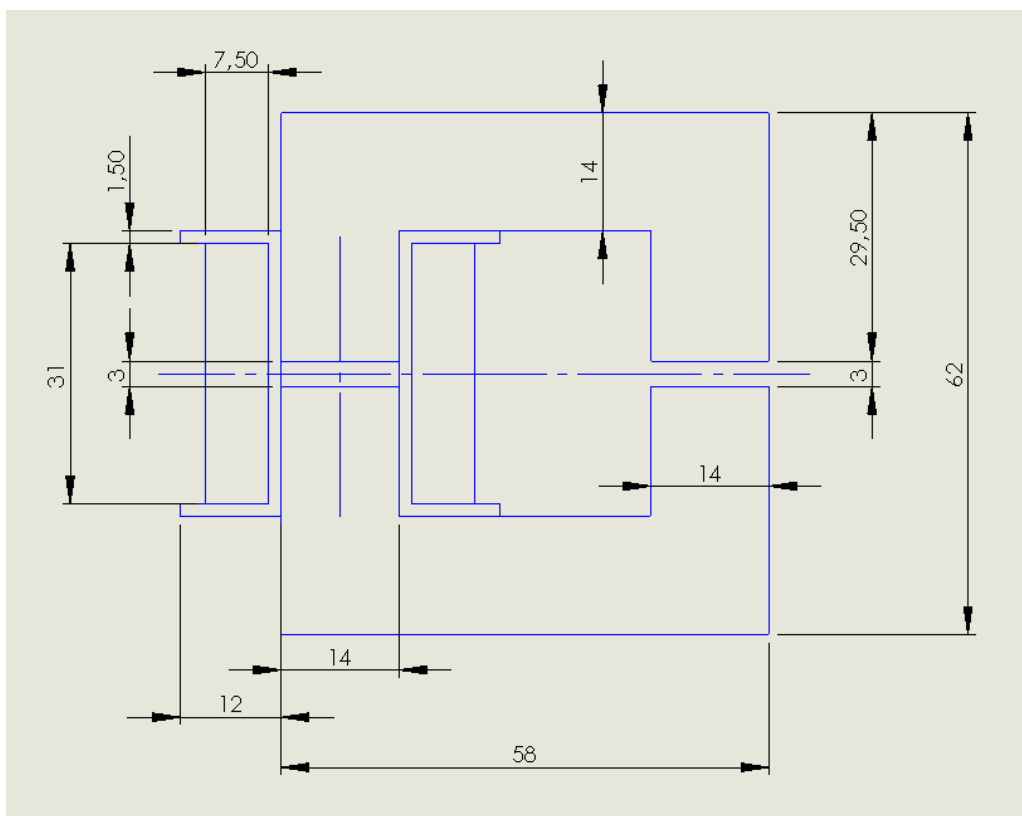
4.1 Magnetický obvod

Pro měření magnetických vlastností v závislosti na teplotě byl zvolen neodymový magnet N38SH, jeho rozměry jsou 42x14x3 mm. Parametry magnetu viz Tab. 2.

Tab. 2 Magnetické vlastnosti permanentního magnetu N38SH [7]

Br [T]	H_{cb} [kA/m]	H_{cj} [kA/m]	$(BH)_{max}$ [kJ/m ³]	Prac. Teplota [°C]
1,23 - 1,27	> 907	> 1972	287 - 310	150

Magnetický obvod je tvořen z plechů M350-50A o tloušťce 0,5 mm (ostatní rozměry viz Obr. 4.2). Šířka vzduchové mezery je 3 mm. Okolo permanentního magnetu je namotána cívka z mědi o průměru 0,5 mm, která má 280 závitů. Materiál na kostru cívky byl zvolen sklotextit.



Obr. 4.2. Rozměry magnetického obvodu

4.2 Teoretický výpočet

Pro zajištění ohřevu magnetu bylo potřeba navrhnout vhodnou cívku. Její odpor byl důležitý pro zjištění Joulových ztrát. Ty se počítaly, aby bylo ověřeno, že cívka dokáže prohrát obvod na požadovanou teplotu. Pro výpočet elektrického odporu byl použit vztah 4.1, kde ρ je měrný elektrický odpor (rezistivita) materiálu, l_s je střední délka závitů cívky a S_v je plocha vodiče.

$$R = \frac{\rho \cdot l_s}{S_v} = \frac{0,0169 \cdot 10^{-6} \cdot 0,195}{1,257 \cdot 10^{-7}} = 0,0262 \Omega \quad (4.1.)$$

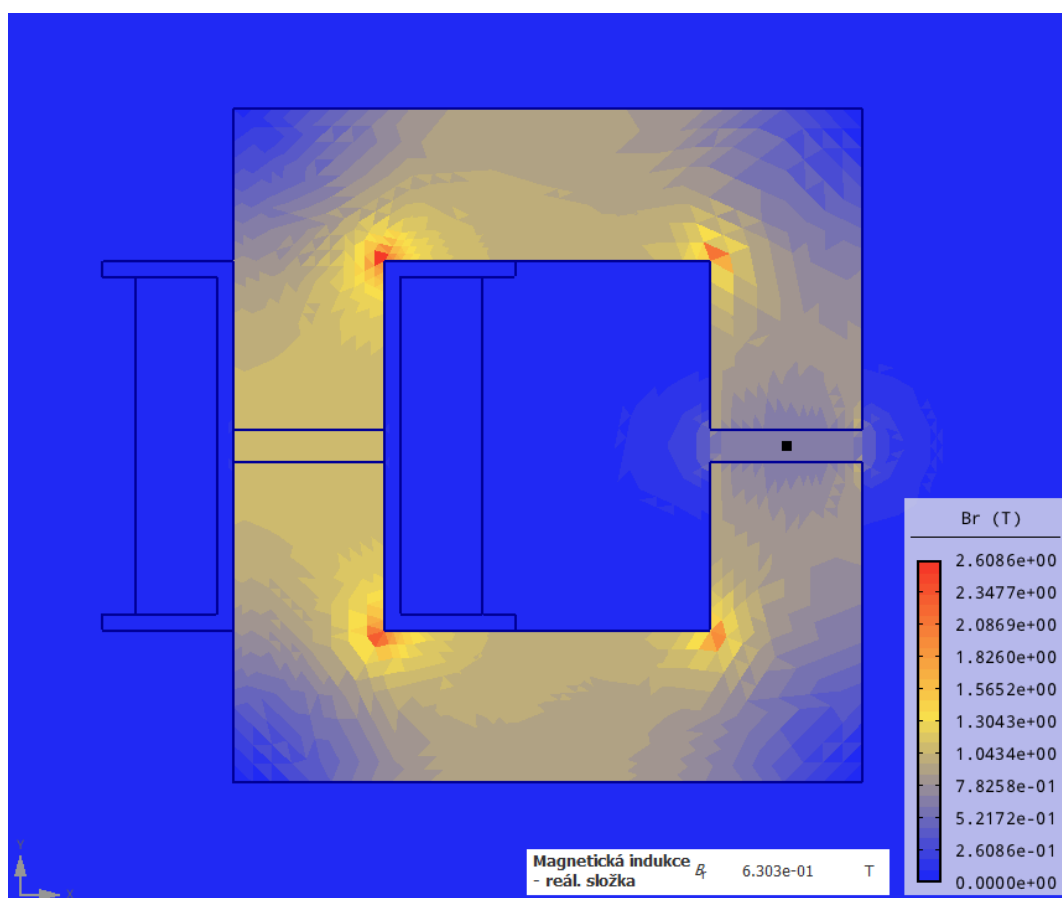
Magnetická indukce ve vzduchové mezeře při pokojové teplotě je vypočtena ve vztahu 4.2, kde μ_0 je permeabilita vakua, H_C je koercitivní síla, h_m je výška magnetu, μ_r je relativní permeabilita permanentního magnetu a δ je šířka vzduchové mezery. Hodnoty byly zvoleny dle katalogu výrobce, viz příloha E.

$$B_\delta = \frac{\mu_0 \cdot H_C \cdot h_m}{\mu_r \cdot \left(\frac{h_m}{\mu_r} + \delta \right)} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 987000 \cdot 3}{1,1 \cdot \left(\frac{3}{1,1} + 3 \right)} = 650 \text{ mT} \quad (4.2.)$$

4.3 Model oteplování v magnetickém obvodu

Model oteplování permanentního magnetu byl vytvořen v programu Agros2D. Tento program pracuje s metodou konečných prvků. Jedná se o program pro numerické řešení fyzikálních polí, které se mohou vzájemně sdružovat. Díky tomuto programu můžeme řešit nelineární problémy, realizovat analýzu ustáleného stavu, harmonickou analýzu ustáleného stavu a přechodovou analýzu. V elektrostatickém poli se dá využít funkce sledování pohybu částic. Program Agros2D podporuje skriptování pomocí jazyka Python. [14]

Pomocí programu Agros2D byla vytvořena simulace magnetického obvodu k ověření dat získaných teoretickým výpočtem před provedením praktického měření. V simulaci je nutné počítat s jistou chybou, protože magnetický obvod je v simulaci pouze ve 2D. Tím se nezapočítá působení cívky z přední a zadní strany. U plechů byla zvolena nelineární charakteristika z knihovny Agrosu, která se nejvíce podobá charakteristice, kterou udává výrobce. Cívka byla realizována zjednodušením v podobě obdélníku.

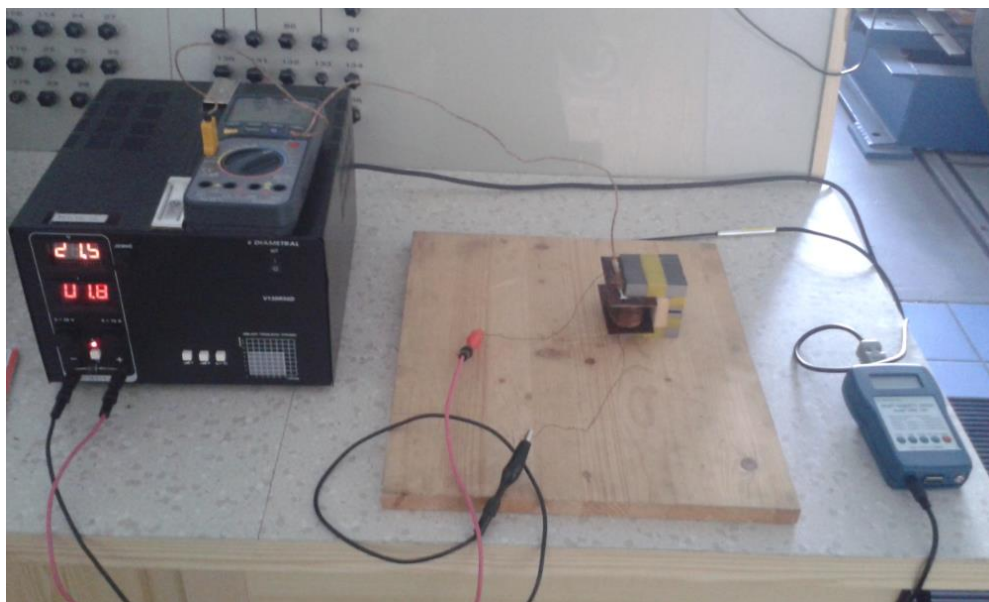


Obr. 4.3. Rozložení magnetické indukce v magnetickém obvodu při teplotě 26 °C

4.4 Měření

Pro měření magnetických vlastností v závislosti na teplotě bylo za potřebí vhodného zdroje a teslametru model SMS 102. Ten se používá pro měření magnetické indukce. Musel obsahovat vhodnou sondu, kterou bylo možné měřit magnetickou indukci ve vzduchové mezeře. Dále bylo potřeba multimetru METEX M-3860M s funkcí měření teploty.

Před začátkem měření bylo nutné kalibrovat teslametr. To se provádí tím způsobem, že se na měřicí sondu nasadí kovový váleček, který má funkci odstínění a spustí se kalibrace. Po zapojení měřícího obvodu bylo možné odečíst první hodnotu magnetické indukce za pokojové teploty. Zapojení měřícího obvodu viz Obr. 4.4. Po odečtení první hodnoty se mohl zapnout zdroj a postupně zvyšovat hodnotu proudu. Při každé hodnotě bylo nutné vyčkat na ustálení teploty a nechat magnetický obvod dokonale prohrát. Tyto tepelné procesy jsou časově náročnější, takže na ustálení jedné hodnoty se čekalo i více než 10 minut. Před každým odečtením hodnoty z teslametru bylo nutné odpojit zdroj, který by jinak zanášel relativně velkou chybu do měření. Hodnoty byly odečítány od pokojové teploty do 205 °C. Naměřené hodnoty viz Tab. 3. Po změření všech hodnot se magnetický obvod nechal dokonale vychladnout a opět se změřila hodnota magnetické indukce, která byla 646 mT (původní hodnota byla naměřena 664 mT).

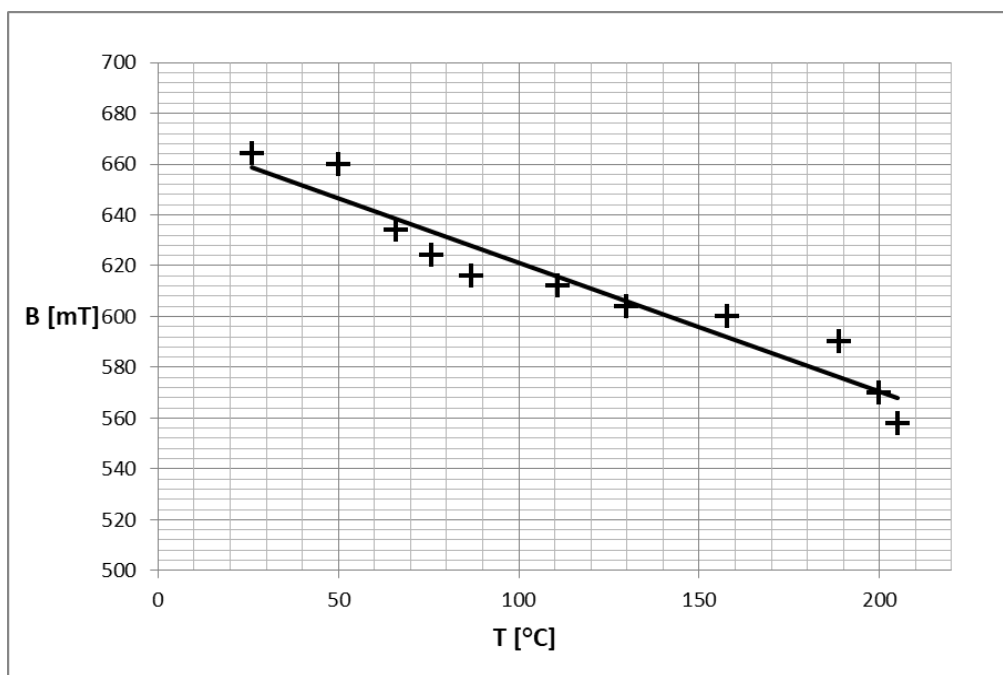


Obr. 4.4. Měřící pracoviště při měření tepelné závislosti permanentních magnetů

Naměřené hodnoty byly zpracovány tabelárně, viz Tab. 3 a graficky viz Obr. 4.5. Jednotlivé body v grafu byly proloženy lineární úsečkou. Pokles magnetické indukce během měření byl 0,51 mT na 1 °C.

Tab. 3 Naměřené hodnoty magnetické indukce v závislosti na teplotě

B [mT]	T [°C]	I [A]
664	26	0
660	50	1
634	66	1,4
624	76	1,6
616	87	1,8
612	111	2
604	130	2,2
600	158	2,4
590	189	2,6
570	200	2,8
558	205	3



Obr. 4.5. Závislost magnetické indukce na teplotě

Závěr

V první části byl popsán magnetismus, uvedeny magnetické veličiny a druhy magnetických materiálů. Popis vlastností a postupu výroby všech dostupných permanentních magnetů obsahuje druhá část. Ve třetí části jsou uvedeny všechny známé zkoušky permanentních magnetů. U permanentních magnetů dochází neustále k vývoji a vylepšování jejich parametrů. AlNiCo magnety jsou pomalu vytlačovány permanentními magnety na bázi vzácných zemin. K tomu přispívá stále se snižující cena těchto magnetů, ale především jejich bez pochyb lepší magnetické vlastnosti. Feritové magnety se vyplatí použít v aplikacích, kde se nepředpokládá rozpojení magnetického obvodu, jako je tomu u reproduktorů.

Poslední část byla zaměřena na ověření tepelné závislosti neodymového magnetu. Teoretický výpočet magnetické indukce při pokojové teplotě ve vzduchové mezeře byl vypočten ve vztahu 4.2. Výsledná hodnota je 650 mT, což odpovídá naměřené hodnotě. Simulace tepelné závislosti magnetu N38SH byla řešena v programu Agros2D. Výsledné hodnoty magnetické indukce ve vzduchové mezeře vyšly dle teoretického předpokladu o 5 % nižší, to je způsobeno skutečností, že magnetický obvod je simulován pouze ve 2D. Magnetická indukce ve vzduchové mezeře, po ustálení teploty magnetického obvodu na pokojové, byla naměřena 646 mT, kdežto původní hodnota byla naměřena 664 mT. Tato skutečnost může být zapříčiněna poněkud vyšší teplotou. U neodymového magnetu mohlo dojít k mírné demagnetizaci (viz nevratné změny kapitola 4). Dle měření tepelné závislosti byla zjištěna hodnota poklesu magnetické indukce o 0,51 mT za 1 °C, což je 0,086 %/°C. Výrobce udává hodnotu 0,12 %/°C, tato hodnota je maximální pokles, který je garantován výrobcem. Naše hodnota je nižší, takže odpovídá parametrům výrobce.

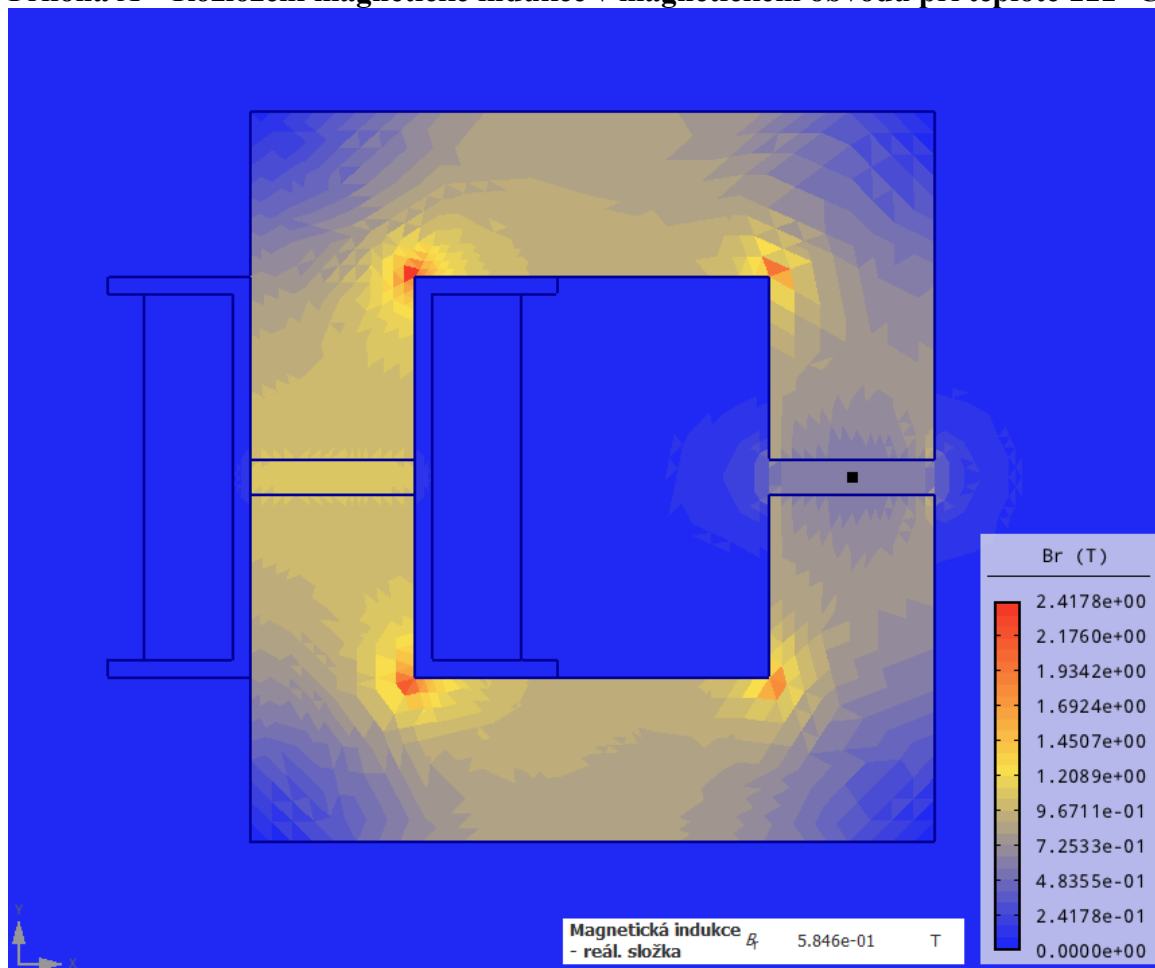
Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] SINOMAG, s.r.o. [online]. *Magnety a teorie: Co je třeba vědět o magnetech*. ©2017. [cit. 2017-05-20] Dostupné z: <http://www.sinomag.cz/sinomag.cz/?c=o-magnetech-slovník>
- [2] HRABOVCOVÁ V., L. JANOUŠEK, P. RAFAJDUS, a M. LIČKO. *Moderné elektrické stroje*. Žilina: Žilinská univerzita v Žilině, 2000. ISBN 80-7100-809-5.
- [3] KUŘIL, Pavel. *Permanentní magnety pro PMSM*. Plzeň, 2014. Bakalářská práce. ZČU v Plzni. Vedoucí práce Ing. Pavel Světlík.
- [4] ABC MAGNET s.r.o. [online]. *O magnetech*. ©2017. [cit. 2017-05-20] Dostupné z: <http://www.abcmagnet.cz/o-magnetech.php>
- [5] MAGSY, s.r.o. [online]. *Magnety*. ©2017. [cit. 2017-05-20] Dostupné z: <http://www.magsy.cz/24670-magnety>
- [6] DUBSKÝ J. a Z. KRAUS. *Kovy a magnetické materiály*. Plzeň: VŠSE, 1965.
- [7] NEOMAG-MAGNET, s.r.o. [online]. *Neodymové magnety*. ©2017. [cit. 2017-05-20] Dostupné z: <http://www.neomag.cz/>
- [8] PZK BRNO, a.s. [online]. *Druhy permanentních magnetů*. ©2017. [cit. 2017-05-20] Dostupné z: <http://www.magnet-magnety.cz/permanentni-magnety>
- [9] ABC MAGNET s.r.o. [online]. *Kontrola kvality: Testy*. ©2017. [cit. 2017-05-20] Dostupné z: <http://www.abcmagnet.cz/testy.php>
- [10] INTEGRATED MAGNETICS, [online]. *Magnet Testing*. ©2017. [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: http://www.intemag.com/magnetic_testing.html
- [11] ADREMOT Technologies, s.r.o. [online]. *Permanentní magnety*. ©2017. [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://www.adremot.cz/vyrobní-sortiment/divize-magneticke-systemy/permanentni-magnety>
- [12] MAGMA MAGNETIC TECHNOLOGIES, LTD. [online]. ©2017. [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://www.magmamagnets.com/magnets-technical-information/permanent-magnet-stability>
- [13] LOOSER, H. [online]. ©2017. [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://www.hlooser.ch/seite%201.html>
- [14] RICE. [online]. *Agros2D*. ©2017. [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <https://rice.zcu.cz/cz/services/modeling/services/agros2d.html>
- [15] 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.

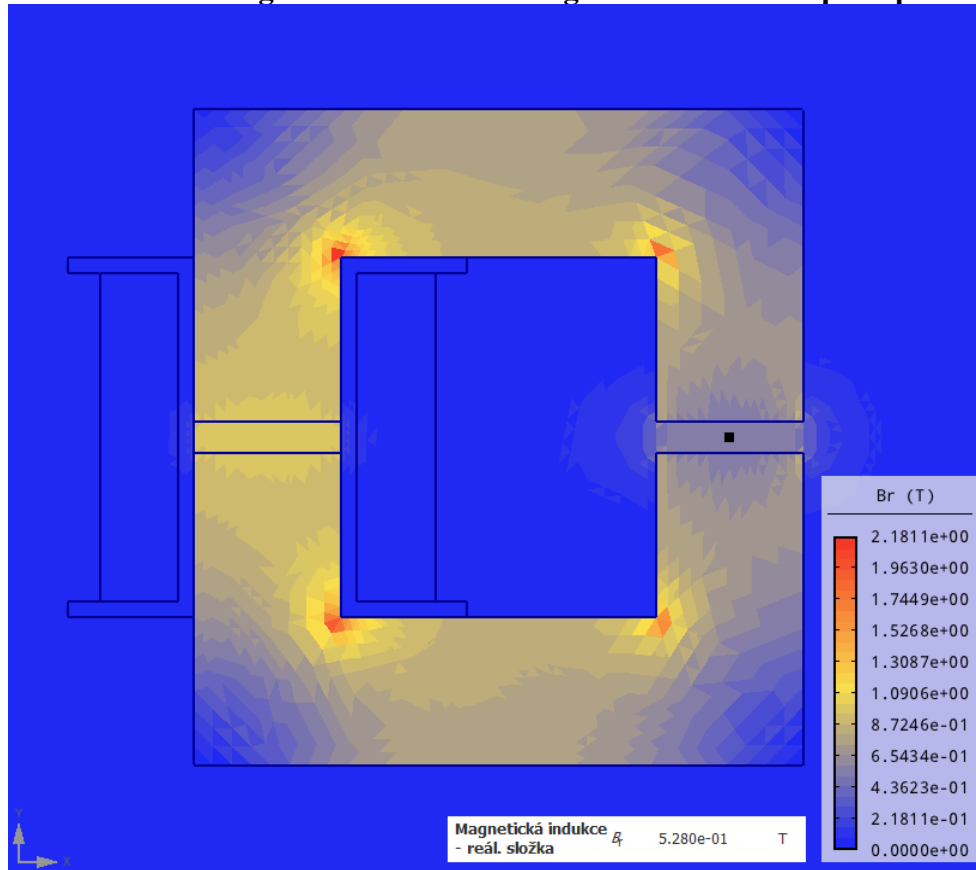
- [16] ARNOLD MAGNETIC TECHNOLOGIES, [online]. *Products*. ©2017. [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://www.arnoldmagnetics.com/en-us/Products>

Přílohy

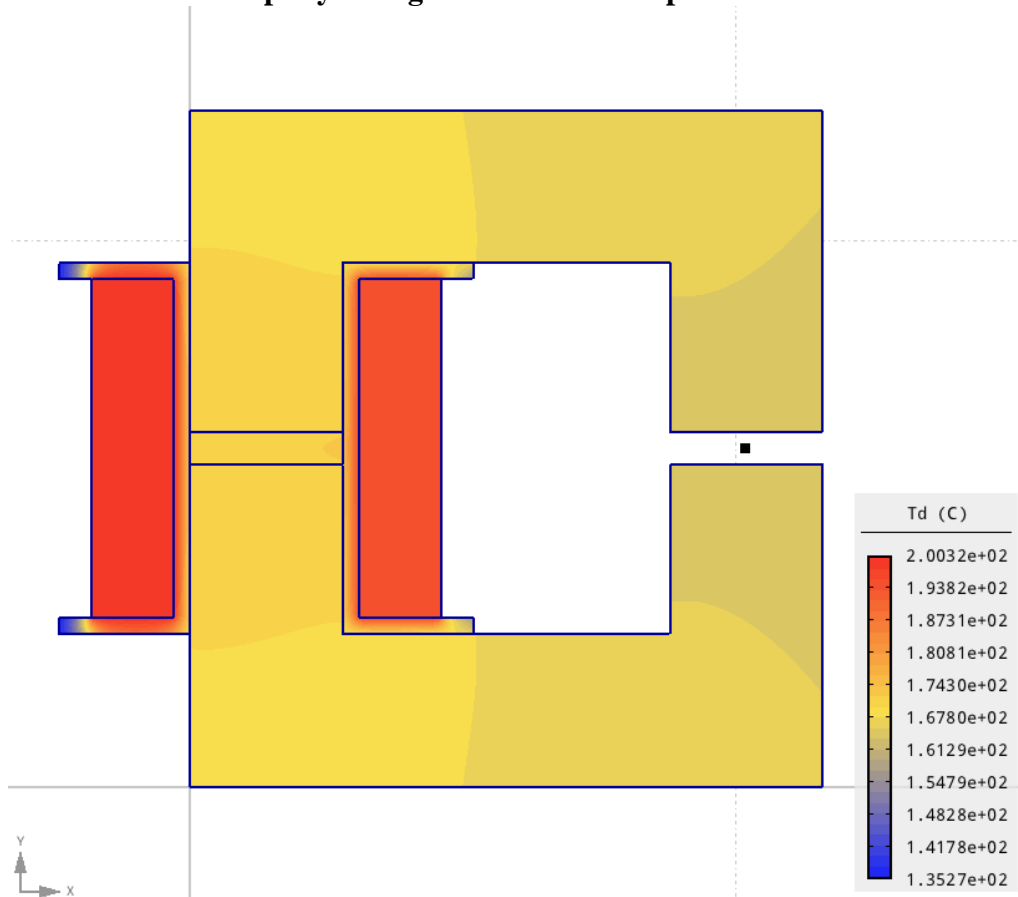
Příloha A – Rozložení magnetické indukce v magnetickém obvodu při teplotě 111 °C



Příloha B – Rozložení magnetické indukce v magnetickém obvodu při teplotě 205 °C



Příloha C – Rozložení teploty v magnetickém obvodu pro 3 A



Příloha D – Parametry neodymových magnetů od výrobce Neomag

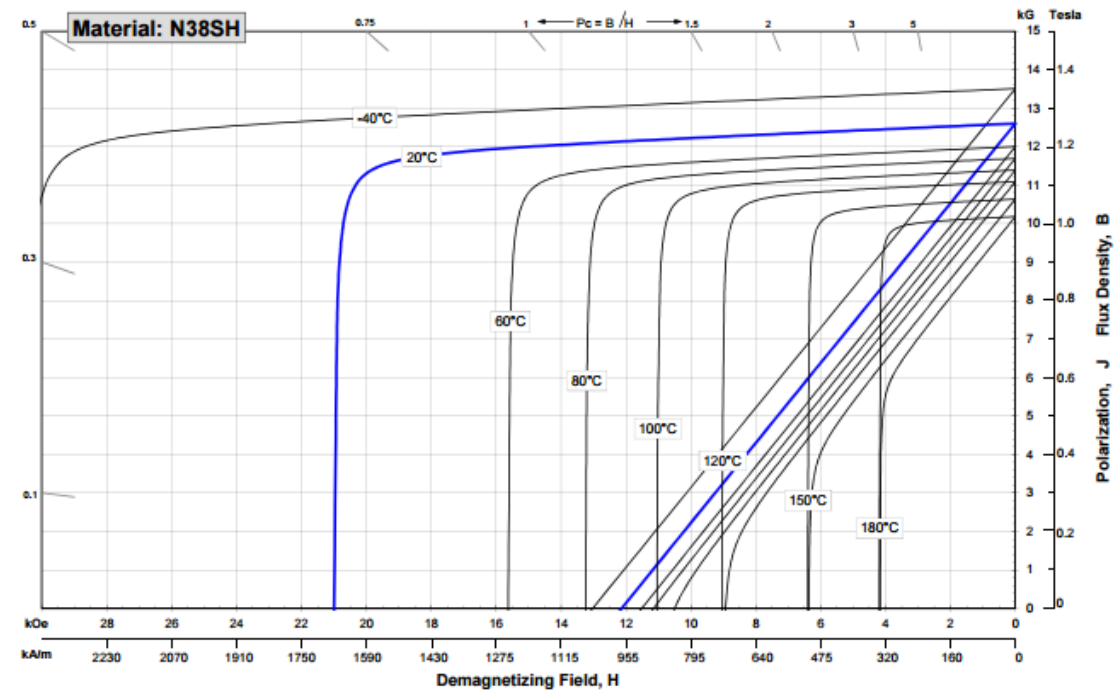
Typ materiálu	Remanence Br		Koercivita Hcb		Vnitřní koercivita Hci		Hustota energie (BH) max		Maximální pracovní teplota	
	KG	T	KOe	KA/m	KOe	KA/m	MGOe	KJ/m ³	°C	°F
N35	11.4-11.8	1.18-1.28	≥ 10.8	≥ 836	≥ 12	≥ 955	33-36	263-287	80	176
N38	11.8-12.3	1.18-1.28	≥ 10.8	≥ 860	≥ 12	≥ 955	36-39	287-310	80	176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

Příloha E – Parametry neodymového magnetu N38SH od výrobce ARNOLD

Characteristic	Units	min.	nominal	max.
B_r , Residual Induction	Gauss	12,200	12,600	13,000
	mT	1220	1260	1300
H_{cB} , Coercivity	Oersteds	11,400	11,900	12,400
	kA/m	907	947	987
H_{cJ} , Intrinsic Coercivity	Oersteds	20,000		
	kA/m	1,592		
BHmax , Maximum Energy Product	MGOe	36	39	41
	kJ/m ³	287	307	326

Characteristic	Units	C //	C ⊥	
Thermal Properties	Reversible Temperature Coefficients ⁽¹⁾			
	of Induction, α(B _r)	%/°C	-0.120	
	of Coercivity, α(H _{cJ})	%/°C	-0.535	
	Coefficient of Thermal Expansion ⁽²⁾	ΔL/L per °C × 10 ⁻⁶	7.5	-0.1
	Thermal Conductivity	W / (m · K)	7.6	
Specific Heat ⁽³⁾	J / (kg · K)	460		
Curie Temperature, T _c	°C	310		
Other Properties	Flexural Strength	psi	41,300	
		MPa	285	
	Density	g/cm ³	7.5	
	Hardness, Vickers	Hv	620	
	Electrical Resistivity, ρ	μΩ · cm	180	

Notes: (1) Coefficients measured between 20 and 150 °C
 (2) Between 20 and 200 °C (3) Between 20 and 140 °C



1 kA/m = 12.566 Oe 1 kOe = 79.577 kA/m

Příloha F – Parametry materiálu M350-50A

T	W/kg at 50 Hz	VA/kg at 50 Hz	A/m at 50 Hz	W/kg at 100 Hz	W/kg at 200 Hz	W/kg at 400 Hz	W/kg at 1000 Hz	W/kg at 2500 Hz
0,1	0,02	0,08	36,4	0,06	0,17	0,48	2,02	8,34
0,2	0,09	0,20	48,1	0,24	0,62	1,75	7,15	29,0
0,3	0,18	0,36	56,1	0,50	1,30	3,62	14,7	60,1
0,4	0,30	0,54	63,2	0,81	2,15	6,02	24,6	104
0,5	0,44	0,75	70,2	1,18	3,17	8,96	37,2	162
0,6	0,59	0,99	77,5	1,60	4,36	12,5	53,1	241
0,7	0,76	1,27	85,6	2,08	5,73	16,6	72,7	343
0,8	0,95	1,58	94,8	2,62	7,31	21,5	96,9	474
0,9	1,16	1,94	106	3,21	9,09	27,2	126	638
1,0	1,39	2,39	122	3,88	11,1	33,8	162	840
1,1	1,65	2,96	146	4,61	13,4	41,5	204	1079
1,2	1,95	3,76	185	5,43	16,0	50,4	254	1360
1,3	2,29	5,11	264	6,37	18,9	60,4	312	1679
1,4	2,75	8,40	481	7,53	22,3	72,1	378	2036
1,5	3,29	19,8	1200	8,99	26,6	85,7	456	2316
1,6	4,41	54,1	3025					
1,7	4,77	124	6186					
1,8	5,00	238	10720					