

Tehnološke primjene neodimijskih magneta

Jeličić, Mario-Livio

Undergraduate thesis / Završni rad

2015

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Chemical Engineering and Technology / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:149:735616>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-19**



Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Chemical Engineering and Technology University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

Mario-Livio Jeličić

ZAVRŠNI RAD

Zagreb, rujan 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

Mario-Livio Jeličić

TEHNOLOŠKE PRIMJENE NEODIMIJSKIH MAGNETA

ZAVRŠNI RAD

Voditelj rada: Prof. dr. sc. Vladimir Dananić

Članovi ispitnog povjerenstva:

1. Izv. prof. dr. sc. Vladimir Dananić
2. Izv. prof. dr. sc. Zvonimir Glasnović
3. Izv. prof. dr. sc. Stjepan Milardović

Zagreb, rujan 2015.

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Vladimiru Dananiću na predloženoj temi, stručnom vođenju i sugestijama prilikom izrade završnog rada.

SAŽETAK

U ovom radu upoznati ćemo se sa podrijetlom magneta, magnetizma, vrsta magnetizma te pojedino objasniti svakog od njih. Baviti ćemo se opisom pojava koje se dešavaju na razini elektrona u atomu koji su uzrok magnetskih pojava u materijalu kao i opisom pojava uzrokovanih magnetizmom. Najveću pažnju obratiti ćemo na permanentne magnete kao vrstu magneta u čiju skupinu pripadaju i neodimijski magneti.

Neodimijski magneti poznati kao najjači permanentni magneti na zemlji imaju svojstvo privlačenja i do 1300 puta veće mase od vlastite a njegova svojstva omogućila su mu široku primjenu u mnogim područjima moderne tehnologije.

Ključne riječi: magneti, magnetizam, permanentni magneti, neodimijski magneti.

SUMMARY

The aim of this work is to learn about origins of magnets, magnetism and types of magnetism. We are going to describe magnetic phenomena that occurs on the level of electrons in the atom and go into detailed explanation of permanent magnets as the most common magnets, for example neodymium magnets.

Neodymium magnets are more known as the strongest magnets on earth with the feature to raise 1300 times bigger mass than itself. Unique properties of neodymium magnets made them widely used in many fields of modern technologies.

Key words: magnets, magnetism, permanent magnets, neodymium magnets.

SADRŽAJ

1	UVOD	1
2	OPĆI DIO	2
2.1	Povijest magnetizma	2
2.2	Magnetizam i kvantnomehaničko tumačenje pojave magnetizma u tvarima	3
2.3	Magnetsko polje	5
2.4	Magnetske veličine	7
2.5	Vrste magnetizma	10
2.5.1	Dijamagnetizam	11
2.5.2	Paramagnetizam	12
2.5.3	Feromagnetizam	13
2.6	Elektromagnetska indukcija - Faradejev i Lenzov zakon	15
2.6.1	Faradejev zakon elektromagnetske indukcije	16
2.6.2	Lenzov zakon	17
2.7	Permanentni magneti	18
2.7.1	Keramički magneti	20
2.7.2	Alnico magneti	21
2.7.3	Samarij-kobalt (Sm-Co)	21
2.7.4	Neodimij-željezo-bor (NdFeB)	22
3	PREGLEDNI DIO	25
3.1	Tehnološke primjene NdFeB magneta	25
4	REZULTATI I RASPRAVA	29
5	ZAKLJUČAK	30
6	LITERATURA	31
7	ŽIVOTOPIS	32

1 UVOD

Legenda kaže da je magnet prvi otkrio pastir Magnes koji je vodio svoje stado na području sjeverne Grčke, te je u jednom trenu osjetio kako su mu se čavli u njegovim cipelama i metalni vrh njegova štapa "zalijepili" za kamen na kojem je stajao. Iz znatiželje je iskopao kamen koji je kasnije dobio naziv po njemu - Magnetit.

Danas se pouzdano zna se da je prvi prirodni magnet zapravo pronađen kao mineralna ruda u stijinama, te nazvan magnetit. Magnetizirane stijene bogate su magnetitom koji je po kemijskom sastavu željezni oksid (Fe_3O_4). U prirodi, prvi je magnet nastao udarom munje direktno u ili u neposrednu blizinu stijene bogate magnetitom, koja zbog visoke struje, reda veličine 10^6 ampera, proizvede snažno magnetsko polje koje ju namagnetizira. Jedno od zanimljivijih svojstva magneta osim da privlači druge metale je da mali štapići načinjeni od ovog materijala, ako im se dozvoli da se slobodno njišu, uvijek pokazuju sjever. Pronađeni su i tekstovi u kojima se spominje 'pokazivač sjevera', a ovo je otkriće bilo posebno značajno u najranijim sustavima za navigaciju brodova.^[1] Primjena magneta u modernoj tehnologiji i njenom razvoju vrlo široka. Magneti su svuda oko nas od televizora, kompjutera, zvučnika, mikrofona, tvrdih diskova, kompasa, kreditnih kartica, u medicini a i poznati moderni vlak Maglev lebdi nad tračnicama zahvaljujući magnetima i magnetskom polju.

2 OPĆI DIO

2.1 Povijest magnetizma

Prije nekoliko tisuća godina Grci su blizu grada Magnesia pronašli crni mineral koji privlači željezo i nazvali ga magnetit. Stoga se i cijela znanost oko magnetita naziva magnetizam. Grčki filozof Sokrat uočio je da se svojstvo magnetnog privlačenja prenosi i na obično željezo.

Prvi poznati primjer pokušaja primjene magneta bio je egipatskog arhitekta Kinokrata. On je prema Plinijevim navodima, započeo gradnju stropa od magnetnog materijala u jednom aleksandrijskom hramu. Tako je želio postići da magnetni strop privlači željezni kip kako bi kip lebdio u zraku.

Još u 2. st. Kinezi su znali da se ravni magnet postavlja u smjeru sjever-jug i da se tako postavljen može okretati. To je svojstvo bilo značajno te su ga kineski pomorci koristili za orijentaciju na moru. Prvi kompas napravili su upravo Kinezi u 11. st. Magnetski kompas je lagani magnet, najčešće oblika igle, koji se može slobodno kretati oko vertikalne osi. Pod utjecajem Zemljinog magnetskog polja postavi se u smjer magnetskih silnica i time pokazuje smjer magnetskih polova Zemlje. Takav uređaj međutim nije sasvim pouzdan zbog promjenjivih odnosa magnetskih i geografskih meridijana.

Prvi čovjek koji je detaljnije opisao navigaciju s pomoću magnetske igle bio je francuski znanstvenik iz 13.st. Petrus Peregrinus Maricurtensis. On je mjerio sile na površini kuglastog magneta s pomoću magnetne igle. Utvrdio je da crte koje prikazuju magnetnu silu izgledaju kao meridijani Zemlje. Zato je polove u kojima se sastaju analogno Zemljinim nazvao sjevernim i južnim magnetskim polovima. Uočio je i važnu činjenicu da se istoimeni polovi odbijaju, a raznoimeni privlače.

Magnetizam Zemlje otkrio je liječnik na dvoru engleske kraljice William Gilbert. Godine 1600. objavio je djelo "De magnete" u kojem je naglasio važnost pokusa pri istraživanjima i iznio svoja saznanja o magnetizmu. Spoznao je da se ukoliko se magnetna igla podijeli na dva ili više dijelova od svakog dijela se može napraviti nova magnetna igla.

Hans Christian Ørsted, danski kemičar i fizičar, uočio je da se magnetska igla zakreće okomito na smjer žice kojom teče istosmjerna struja i tako otkrio magnetski učinak električne

struje. To otkriće je objavio 1820. na latinskom. Po njemu je nazvana jedinica za mjerenje jakosti magnetskog polja (Oe).

Ørstedovim otkrićem na daljnja istraživanja bio je potaknut francuski fizičar, matematičar, kemičar i filozof André Marie Ampère (1775. - 1836.) On je Ørstedov rezultat iskazao matematički i otkrio pravilo desne ruke. Utvrdio je da se kružni tok električne struje ponaša kao magnet, kao i da se dva paralelna vodiča međusobno privlače kada kroz njih teče struja istog smjera, a odbijaju kad su struje suprotnih smjerova te objasnio magnetizam kao posljedicu unutarnjih struja u građi tvari. Njemu u čast jedinica jakosti struje nazvana je amper (A).

Nizozemski matematičar i fizičar Hendrik Antoon Lorentz (1853. – 1928.) postigao je niz otkrića na području elektromagnetizma. Vrlo je značajan pojam koji se prema njemu naziva Lorentzova sila, a koji je opisao kao djelovanje magnetskog i električnog polja na naboj u gibanju. ^[2]

2.2 Magnetizam i kvantnomehaničko tumačenje pojave magnetizma u tvarima

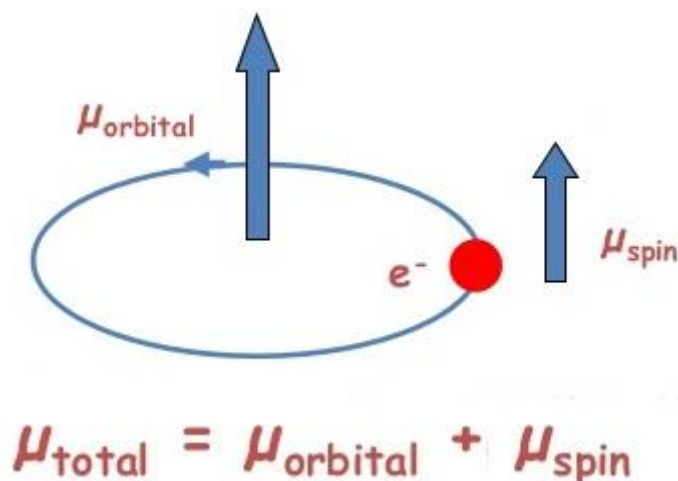
Magnetizam je pojava koju primjećujemo kao privlačenje ili odbijanje između magneta i sličnih materijala. Djelovanje magnetizma je puno raširenije od klasičnih primjera s permanentnim magnetima, njegova primjena je u brojnim aktivnostima ljudi: u transportu, zdravstvu, komunikaciji, zabavi itd. Znanstveno tumačenje je da je magnetizam sila međudjelovanja između električki nabijenih čestica u gibanju. Na atomskom nivou radi se o relativnom gibanju elektrona. Kao i planete u sunčevom sustavu, elektroni se gibaju i oko svoje osi i oko jezgre atoma. Oba vrsta gibanja proizvode magnetsko polje između elektrona, a elektroni poprimaju svojstva mikroskopskih štapićastih magneta sa sjevernim i južnim polom. Oko ovako 'beskonačno' malog magneta nalaze se magnetske silnice, koje izlaze iz sjevernog pola, te zakrivljuju u obliku elipse da bi završile u južnom polu. Magnetizam je jedna od četiri osnovne sile u prirodi (elektromagnetska, gravitacijska, slaba nuklearna i jaka nuklearna sila). Nekad se mislilo da su ove pojave neovisne jedna o drugoj no kroz povijest znanstvenici su došli do zaključaka da su te sile međusobno povezane. ^[1]

Pojava magnetskog polja posljedica je dvije vrste kretanja elektrona u atomu. Prva je kretanje elektrona po svojoj putanji oko jezgre atoma (poput planeta oko sunca), a druga je vrtnja elektrona oko svoje osi odnosno "spin" elektrona (poput vrtnje zemlje oko svoje osi).

Kretanje elektrona oko jezgre stvara orbitalni magnetski moment ($\mu_{\text{orbitalni}}$), dok vrtnja oko vlastite osi stvara spinski magnetski moment (μ_{spin}) te oni pojedinačno doprinose magnetskom momentu odnosno stvaraju ukupni magnetski moment koji se odnosi kao njihov zbroj.

$$\mu_{\text{ukupni}} = \mu_{\text{orbitalni}} + \mu_{\text{spin}} \quad (2.1)$$

Posljedica toga je da se elektroni počinju ponašati kao mali magneti. Magnetski je moment razmjeran kutnoj količini gibanja, odnosno spinu.

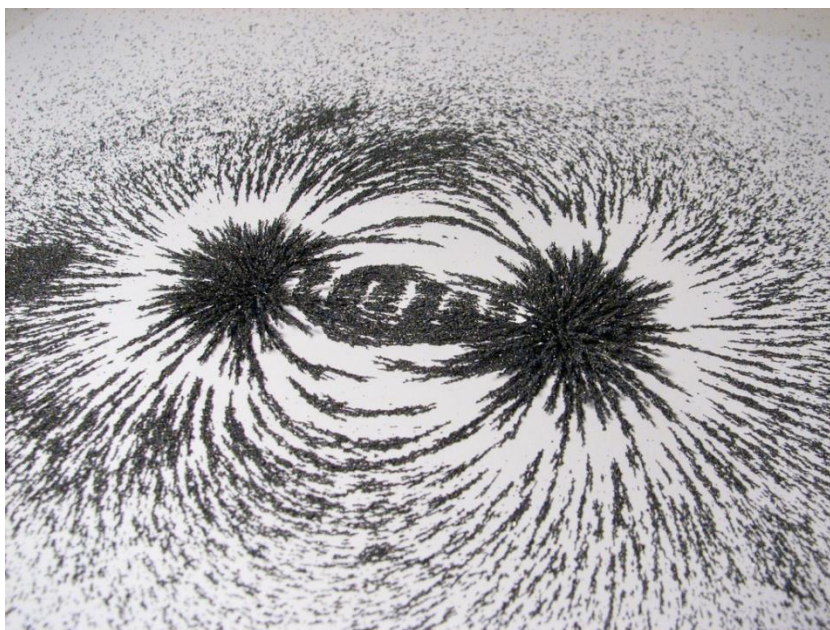


Slika 2.1. Smjer i doprinos orbitalnog i spinskog magnetskog momenta.

U većini atoma periodnog sustava elemenata magnetni moment elektrona se poništava zbog Paulijevog principa isključenja, koji nam govori kako dva elektrona ne mogu zauzimati isto kvantno stanje istovremeno, odnosno trebaju imati suprotan spin. No ima iznimaka u slučaju prijelaznih metala, poput željeza, kobalta i nikla koji posjeduju magnetski moment koji nije poništen, pa su zato oni najčešći primjeri magneta. U tim prijelaznim metalima magnetski moment proizlazi samo od spina elektrona. U skupini rijetkih metala odnosno u nizu lantanida doprinos orbitalnog magnetnog momenta nije isključen, stoga magnetskom momentu doprinose efekt i orbitalnog i spinskog magnetnog momenta. To su elementi poput neodimija cerija, samarija i europija. Uz same prijelazne i rijetke metale magnetski moment ostaje aktivan i u njihovim spojevima.^[3]

2.3 Magnetsko polje

Proučavanje magnetizma temelji se na uočavanju i mjerenju sila koje uzrokuju permanentni (trajni) magneti, koji se u prirodi nalaze najčešće u obliku ruda željeza, nikla i kobalta. Magnetsko djelovanje koncentrirano je na suprotnim krajevima magneta, odnosno polovima, koji se nazivaju "sjeverni" i "južni" pol. Istoimeni polovi međusobno se odbijaju, a raznoimeni se međusobno privlače. Imena su dobili prema geografskim polovima zemlje. Naš planet Zemlja, kao veliki prirodni magnet, usmjerava magnetizirane igle u pravcu sjever - jug, jer planet Zemlja također posjeduje svoje magnetske polove nedaleko od geografskih polova. Pol magnetske igle usmjeren na sjeverni geografski pol nazvan je sjevernim polom magneta (N), a suprotan južnim polom (S). Djelovanje magnetskog polja magneta na sitne čestice željezne piljevine stvara linije (Slika 2.2.) slične silnicama električnog polja. To nam govori o izravnoj povezanosti magnetizma i elektriciteta.

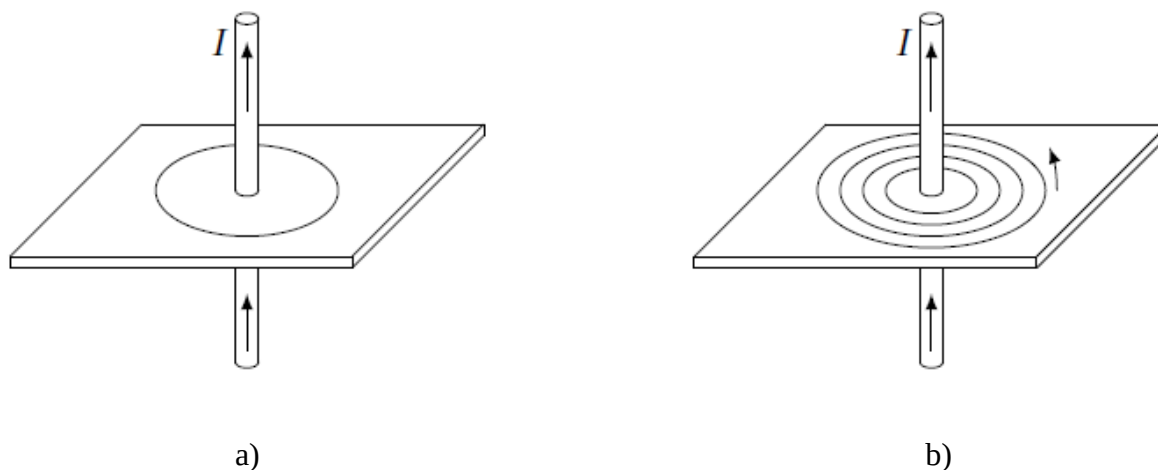


Slika 2.2. Željezna prašina u prisutnosti magnetskog polja (poprima oblik magnetskih silnica)

Poznato je da se pol magneta nikad ne pojavljuje samostalno. Ako magnetski štap presiječemo na pola, ne dobivamo jedan sjeverni i jedan južni pol, nego svaka polovica postaje magnet koji sadrži oba pola, jedan sjeverni i jedan južni. To ukazuje da ne postoji "magnetski naboj", već je pojava magneta prouzrokovana na drugi način. Godine 1820. H.C. Ørsted je otkrio da se u blizini električnog vodiča kroz koji teče struja stvara magnetsko polje.

Tako je dokazana veza između magnetizma i elektriciteta, postavljena je hipoteza o elementarnim strujama u molekulama i atomima po kojoj se objašnjava postojanje permanentnih magneta. Zbog mogućnosti stvaranja magnetskih polja uz prisutnost električne struje i dodatnih elektromagnetskih pojava nastalih njihovom promjenom, omogućeno je magnetima da dobiju veliku vrijednost u praksi.

Električna struja proizvodi oko sebe magnetsko polje. Njegovo postojanje može se dokazati uočavanjem i mjerenjem sile na male magnete u blizini vodiča kojim teče električna struja (Slika 2.3.a). Magnetsko polje je polje sile, pa se slično kao električno, može prikazati linijama polja ili silnicama. Čestice željezne prašine u ravnini okomitoj na vodič poredat će u obliku silnica magnetskog polja (Slika 2.3.b).



Slika 2.3. a) oblik magnetskog polja oko vodiča kojim teče struja, **b)** oblik koji poprimaju čestice željezne prašine uz prisutnost magnetskog polja oko vodiča

Veza između magnetskog polja i električne struje omogućava da se osnovne veličine magnetskog polja upoznaju upravo na primjeru najjednostavnijeg polja koje u svojoj okolini stvara ravni vodič kroz koji teče struja. U korištenju efekata magnetskih polja u praksi, polja koja su nastala prolaskom struje kroz vodič daleko su važnija i češća od onih koja su nastala djelovanjem trajnih magneta. Smjer magnetskog polja dogovorno je definiran smjerom sjevernog pola magnetske igle. Smjer magnetskog polja odgovara pravilu "desne ruke". Ako

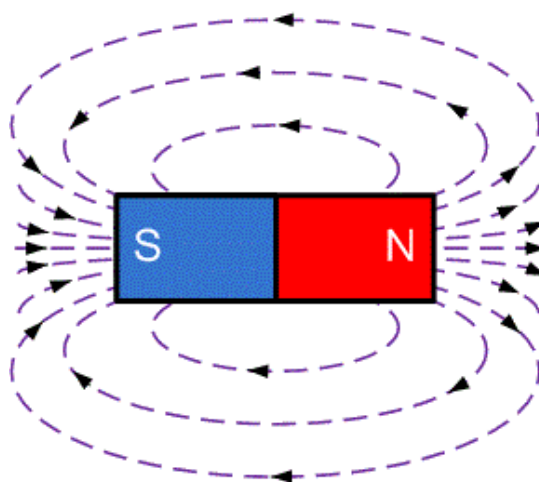
je smjer struje u pravcu palca desne ruke, smjer magnetskog polja odgovara smjeru preostalih prstiju pri zatvaranju šake. Promjenom smjera struje mijenja se i smjer magnetskog polja.

Jakost magnetskog polja koja se označava s H veća je što je struja jača (npr. dvaput jača struja daje dvaput jače magnetsko polje). Jakost magnetskog polja opada s udaljenosti od vodiča (npr. u dvostrukoj udaljenosti je polje dvostruko slabije).^[4]

2.4 Magnetske veličine

Magnetske silnice prikazuju smjer kretanja magnetskog polja a predočavaju se linijama koje izlaze iz sjevernog pola magneta i završavaju na južnom (Slika 2.4.), uvijek se nastavljaju kroz tijelo magneta od južnog do sjevernog pola.

Iz toga zaključujemo da su magnetske silnice zatvorene linije. Skup svih silnica naziva se magnetski tok, a označava se sa simbolom Φ . Jače magnetsko polje ima veći magnetski tok nego slabije polje. Jedinica magnetskog toka mjeri se u Wb (Weber).



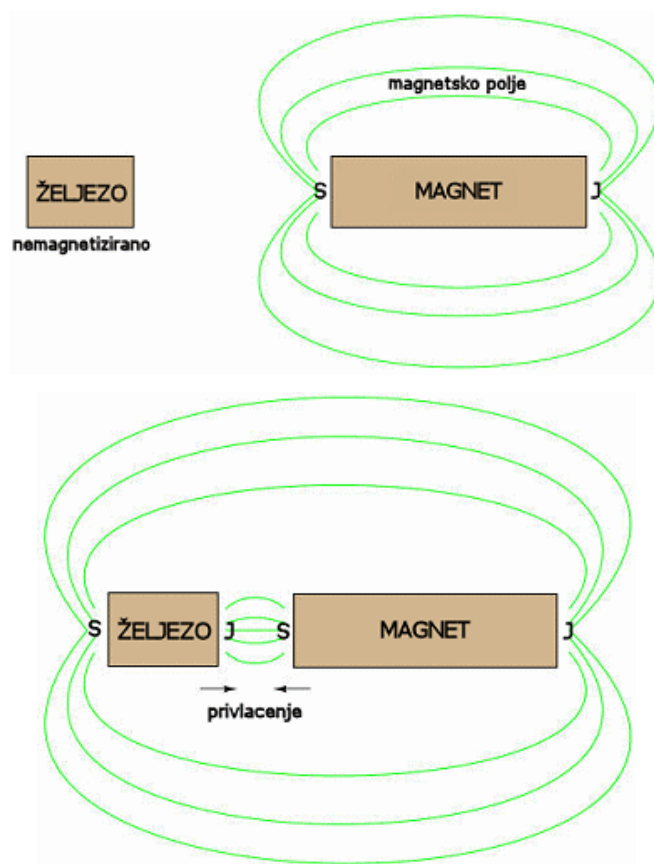
Slika 2.4. Prikaz kretanja magnetskih silnica

Gustoća magnetskog toka B izražava se kao broj magnetskih silnica koje prolaze kroz površinu A okomitu na smjer magnetskog toka:

$$B = \frac{\Phi}{A} \text{ [T]} \quad (2.2)$$

Jedinica gustoće toka je T (Tesla).

Elektromagnetski utjecaj jednog tijela na drugo, bez njihova fizičkog dodira, dovodi do promjene električnog ili magnetskog stanja tijela na koji se djeluje. To se naziva indukcija. Permanentni magnet inducira nemagnetizirano željezo ti i on postane magnet (Slika 2.5.). Molekularni magneti (tzv. magnetske domene ili magnetski dipoli) u željeznom uzorku, pod utjecajem magnetskog polja permanentnog magneta, usmjeravaju se iz svog dotad slučajnog rasporeda tako da sjeverni pol permanentnog magneta privuče južni pol molekularnih magneta uzorka. Nemagnetizirano željezo tako postaje magnet, te će pol tog magneta biti suprotan polu koji ga je inducirao i željezo te će novi magnet biti privučen.



Slika 2.5. Prikaz indukcije nemagnetiziranog željeza.

Treba uočiti da je inducirani pol uvijek suprotnog polariteta od pola koji ga je inducirao. Naprimjer, ako željezo induciramo s južnim polom magneta, novonastali inducirani pol biti će sjeverni. To objašnjava činjenicu da bilo koji pol magneta privlači magnetski materijal. Magnetski materijali međusobno se razlikuju s obzirom na indukciju. Sposobnost koncentriranja magnetskog toka zove se permeabilnost i označuje se s μ . Svaki materijal koji

se može lako namagnetizirati ima veliku permeabilnost i naziva se feromagnetski. Što je permeabilnost veća, to je uz istu jakost magnetskog polja gustoća silnica B u induciranom materijalu veća. Zato se gustoću silnica još nazivamo i magnetska indukcija.

Jakost magnetskog polja H povezana je preko permeabilnosti materijala s magnetskom indukcijom B pa vrijedi:

$$B = \mu \cdot H \quad [\text{T}] \quad (2.3)$$

Veća indukcija postiže se ili većom jakosti polja ili/i korištenjem materijala veće permeabilnosti. Najčešće se permeabilnost materijala μ izražava u relativnim jedinicama μ_r , u odnosu na permeabilnost vakuumu μ_0 , tako da je permeabilnost

$$\mu = \mu_r \cdot \mu_0 \quad (2.4)$$

a permeabilnost vakuumu je potvrđena te eksperimentalno iznosi:

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \quad [\text{V s/Am}] \quad (2.5)$$

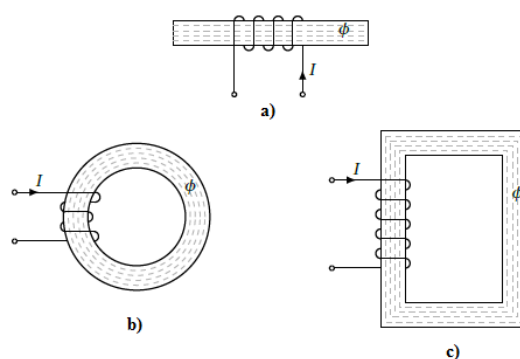
Vrijednosti relativne permeabilnosti μ_r za feromagnetske materijale mogu se kretati između 100 i 190.000. Budući da je H vektor, a μ skalar, magnetska indukcija B može se također smatrati vektorom. Magnetsko polje je homogeno ako je veličina indukcije u svakoj točki promatranog prostora jednaka.

Zbog visoke permeabilnosti feromagnetski materijali koriste se kao jezgre elektromagneta. Ista magnetska uzbuda u zatvorenoj će jezgri stvoriti μ_r puta veću gustoću silnica nego u slučaju kad jezgre nema. To se može prikazati izrazom:

$$B = \mu_0 \cdot H = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot H \quad (2.6)$$

Napomenimo da jednačba (2.6) ne mora vrijediti uvijek i svugdje. Linearan odnos između indukcije magnetskoga polja B i jakosti magnetskoga polja H vrijedi samo u ograničenom području, zbog pojave histereze.

Polje unutar jezgre (Slika 2.6.a) približno je homogeno, a nije homogeno na krajevima jezgre i izvan nje. Približno homogeno polje duž čitave jezgre postiže se izvedbom feromagnetske jezgre u obliku prstena (Slika 2.6.b) ili okvira (Slika 2.5.c).



Slika 2.6. Magnetska polja a) ravnog vodiča b) prstena i c) okvira

Jezgre od neferomagnetskih materijala ponašaju se slično kao i vakuum, odnosno njihova relativna permeabilnost približno je jednaka 1. Međutim, preciznijim mjerenjima pokazalo se da je za jednu grupu materijala tzv. dijamagnetske materijale $\mu_r > 1$, dok je za drugu grupu, tzv. paramagnetske materijale $\mu_r < 1$. (Tablica 2.1) ^[5]

Tablica 2.1. Vrijednosti relativnih permeabilnosti za neke neferomagnetske materijale.

	Materijal	μ_r
Dijamagnetici	bizmut	0,99984
	srebro	0,9999736
	voda	0,999991
	vodik	0,999999998
Paramagnetici	platina	1,00027
	aluminij	1,0000196
	kisik	1,000000181
	zrak	1,00000036

2.5 Vrste magnetizma

Različiti materijali se različito ponašaju pod utjecajem magnetskog polja. Najbolji način da se prikaže ta ovisnost je da pratimo vrijednost magnetske susceptibilnosti, χ . To je fizikalna veličina kojom se opisuje svojstvo tvari da mogu biti magnetizirane u magnetskom polju. Iznosi $\chi_m = \mu_r - 1$, gdje je μ_r relativna magnetska permeabilnost tvari pozitivna je za feromagnetične i paramagnetične tvari, a negativna za dijamagnetične tvari. ^[6] U ovom

poglavlju ćemo promatrati različite vrste magnetizma, porijeklo različitih ponašanja magneta te vezu sa susceptibilnosti. Prvo ćemo promatrati dijamagnetizam u materijalima koji nemaju permanentni magnetski moment, zatim paramagnetizam u materijalima koji imaju magnetski moment te nakon toga ostaje nam vrsta u kojoj su jake interakcije između magnetskih momenata, a to je feromagnetizam.^[7]

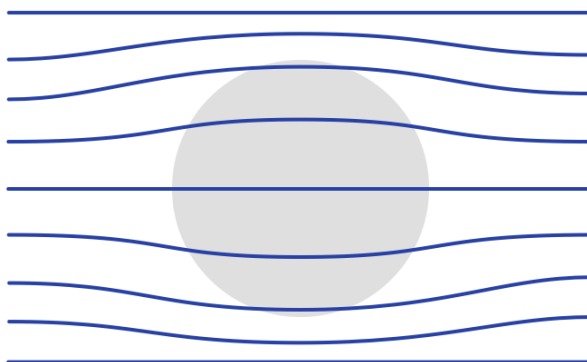
2.5.1 Dijamagnetizam

Fenomen dijamagnetizma se pojavljuje kada se materijal izlaže vanjskom magnetskom polju. Vanjsko magnetsko polje utječe na gibanje elektrona oko jezgre te ono proizvodi dodatnu električnu struju. Inducirana struja stvara magnetsko polje, a ono se prema Lenzovom pravilu kreće u suprotnom smjeru od vanjskog magnetnog polja.^[8] Prema tome, postoji slabo negativna susceptibilnost a relativna magnetska permeabilnost je blago manja od jedan.

$$\mu_r = (1 + \chi_m) < 1, \quad \chi_m < 0 \quad (2.7)$$

Dijamagnetizam je jako slabi oblik magnetizma koji se pojavljuje u prisutnosti vanjskog magnetskog polja. Ono je rezultat promjena u orbitalnim kretanjama elektrona kao posljedica utjecaja vanjskog magnetskog polja. Inducirani magnetski moment je jako mali te je u suprotnom smjeru od primijenjenog magnetskog polja. Kada je postavljen između polova jakog elektromagneta, dijamagnetni materijal je privučen prema području u kojem je magnetsko polje slabije. Dijamagnetizam je svojstvo svih materijala, međutim, pošto je jako slabo ono može opstati samo u materijalima koji ne posjeduju druge oblike magnetizma.

Izuzetak od "slabe" prirode dijamagnetizma se pojavljuje kod materijala koji postaju supravodljivi, svojstvo koje se pojavljuje pri niskim temperaturama. Supravodiči su odlični dijamagneti te kada se postave u vanjsko magnetsko polje oni izbace silnice iz svoje unutrašnjosti (ovisno o jakosti polja i temperaturi) (Slika 2.7.). Supravodiči nemaju nikakav električni otpor. Supravodljive strukture su poznate po tome da se mogu potrgati s nevjerojatnom snagom u pokušaju da se izmaknu utjecaju vanjskog magnetskog polja.



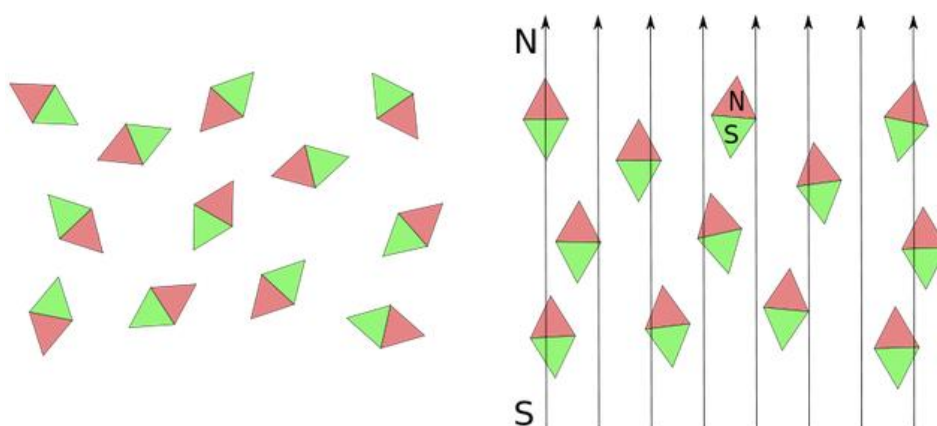
Slika 2.7. Prikaz otklanjanja magnetskih silnica od supravodiča kao najboljeg dijamagneta.

Supravodljivi magneti su glavna komponenta u dobivanju slika pomoću magnetske rezonancije, što je ujedno i jedina važna primjena dijamagnetizma.

2.5.2 Paramagnetizam

U paramagnetizmu, atomi i molekule neke tvari imaju orbitalne i spinske momente koji imaju sposobnost da se usmjere u smjeru polja kojem su izloženi. Stoga oni imaju blago pozitivnu susceptibilnost a relativnu permeabilnost malo veću od 1. Paramagnetizam je svojstvo svih atoma i molekula s ne sparenim elektronima, na primjer, atomi, slobodni radikali te spojevi prijelaznih metala koji sadrže ione sa nepopunjenim ljuskama. Također se pojavljuje u metalima kao rezultat magnetskog momenta nastalog spinom elektrona.

Paramagnetizam je težnja atomskih magnetskih dipola, koji postoje zbog spinskog kutnog momenta, u materijalu koji inače nije magnet da se uskladi s vanjskim magnetskim poljem. (Slika 2.8.)



Slika 2.8. Prikaz orijentacije magnetskih dipola u paramagnetičnom materijalu pod utjecajem magnetskog polja

To usklađivanje atomskih dipola sa magnetskim poljem teži da ga ojača a opisuje se sa relativnom magnetskom permeabilnosti blago većom od 1 odnosno s blago pozitivnom susceptibilnosti.

$$\mu_r = (1 + \chi_m) > 1, \quad \chi_m > 0 \quad (2.8)$$

U paramagnetizmu, vanjsko magnetsko polje utječe na svaki atomski dipol nezavisno te ne postoje nikakve interakcije između atomskih dipola. Takva paramagnetična svojstva se mogu pronaći i u feromagnetičnim materijalima koji su iznad Curieove temperature.

Paramagnetični materijali se privlače i odbijaju kao i normalni magneti u magnetskom polju. Pod utjecajem slabog magnetskog polja kada nisu svi dipoli orijentirani prema polju u kojem se nalaze, paramagnetični materijali se magnetiziraju prema Curieovom zakonu koji glasi:

$$M = C \cdot B / T \quad (2.9)$$

gdje je M - magnetizacija [A/m], B - jakost magnetskog polja [T], T temperatura [°K] te C specifična Curieova konstanta za određeni materijal.

Ovaj zakon upućuje na to da paramagnetični materijali teže da budu jako magnetični u jačem magnetskom polju, ali manje magnetični ako temperatura raste. Curieov zakon je nepotpun jer ne objašnjava što se dešava kada se svi dipoli orijentiraju u magnetskom polju. Naime, kada su svi usmjereni jednako, povećanjem jakosti vanjskog magnetskog polja ne dolazi do jače magnetizacije.

Paramagnetični materijali će se u magnetskom polju ponašati kao magneti, ali kada se ukloni magnetsko polje, oni se iz stanja reda odnosno usmjerenosti počinju ponovno okretati nasumično svaki na svoju stranu.^[9]

2.5.3 Feromagnetizam

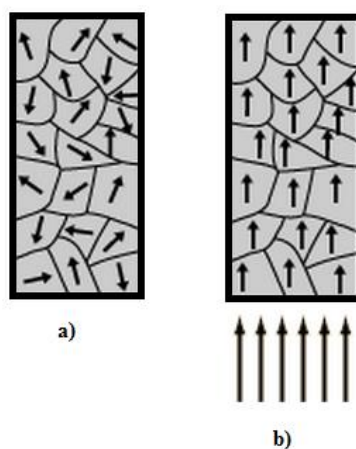
Željezo, nikal, kobalt i neki rijetki metali posjeduju jedinstveno magnetsko svojstvo koje se naziva feromagnetizam. Samarij i neodimij u slitinama s kobaltom su se koristili kako bi se stvorili vrlo jaki magneti.

Feromagnetski materijali posjeduju dugodosežno uređenje. To je pojava na razini atoma koja znači da se nespareni elektronski spinovi udružuju te usmjeravaju u mala područja

zvana domene. Unutar domene magnetsko polje je izraženo ali u samom materijalu, kao cjelini, on nije magnetiziran zato što će se domene same orijentirati tako da postignu ravnotežu kao cjelina. Feromagnetizam se očituje u činjenici da slabo vanjsko magnetsko polje može uzrokovati da se magnetske domene međusobno usmjere i materijal postaje blago magnetiziran. Feromagnetni će težiti da ostanu namagnetizirani u određenoj mjeri nakon što su bili izloženo vanjskom magnetskom polju. Ta tendencija se naziva histereza. Dio zasićenja magnetizacije koja se zadržala nakon što je uklonjeno vanjsko magnetno polje se zove remanentnost materijala (svojstvo feromagnetskih materijala da nakon djelovanja magnetskog polja pokazuju magnetična svojstva koja ostaju trajno^[10]), te je to važan faktor kod permanentnih magneta.

Svi feromagnetski materijali imaju maksimalnu temperaturu do koje su feromagnetska svojstva prisutna, a na još višoj temperaturi ta svojstva nestaju kao posljedica termalne pobude. Ta temperatura se naziva Curieova temperatura. Nakon što temperatura feromagnetskog materijala bude viša od Curieove temperature, materijal se počinje ponašati kao paramagnet.^[11]

Dugodosežno uređenje koje tvori magnetske domene u feromagnetskim materijalima proizlazi iz kvantnomehaničkih interakcija na razini atoma. Ta interakcija učvršćuje magnetske momente susjednih atoma te stvara uredne paralelne nakupine bez obzira na temperaturu koja teži da napravi nered između i u atomima. Veličine domena se protežu od 0.1 milimetara do nekoliko milimetara. Kada se na feromagnetski materijal primjenjuje vanjsko magnetsko polje domene se usmjeravaju u smjeru magnetskog polja. (Slika 2.9.)



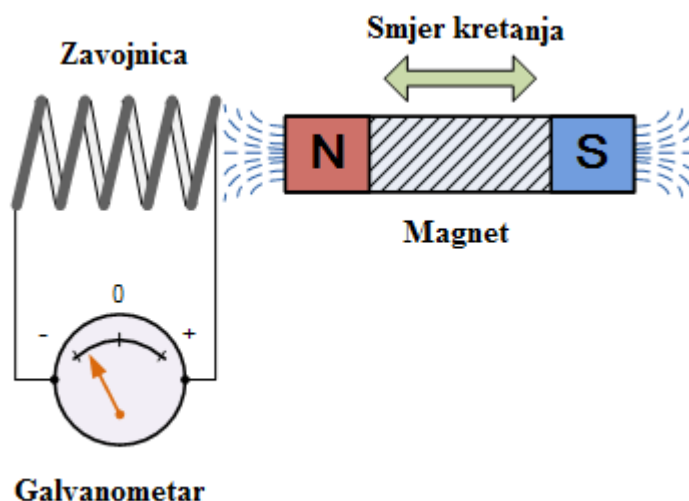
Slika 2.9. Orijentacija domena **a)** bez magnetskog polja **b)** pod utjecajem magnetskog polja

Magnetsko polje oko 1T može biti stvoreno u obrađenom željezu pod utjecajem magnetskog polja jakosti 0,0002T, što znači da je magnetsko polje koje stvori željezo 5000 puta jače od polja koje ga je stvorilo. Dugodosežno uređenje naglo nestaje pri Curieovoj temperaturi, koja za željezo iznosi 1043K.^[12]

2.6 Elektromagnetska indukcija - Faradejev i Lenzov zakon

1830. g. Michael Faraday je prvi uočio elektromagnetsku indukciju. Primijetio je da provlačenjem permanentnog magneta kroz zavojnicu ili petlju dolazi do induciranja elektromotorne sile odnosno došlo je do stvaranja struje određenog napona.

Kada se magnet kreće prema zavojnici, pokazivač na galvanometru će se otkloniti od centralne pozicije samo u jednom smjeru. Kada se magnet prestane micati te se zadrži u zavojnici u stacionarnom položaju pokazivač na galvanometru se vrati natrag na nulu kao posljedica mirovanja magnetskog polja. Nasuprot tome, kada magnet udaljavamo od zavojnice, u suprotnom smjeru, pokazivač u galvanometru se otklanja na suprotnu stranu kao posljedica promjene magnetskog pola. Što znači ako magnet uzastupno provlačimo i vadimo iz zavojnice, igla na galvanometru će se otklanjati lijevo i desno odnosno u pozitivnom ili negativnom smjeru ovisno o smjeru kretanja magneta. (Slika 2.10.)



Slika 2.10. Prikaz elektromagnetske indukcije micanjem magneta kroz zavojnicu

U slučaju da magnet u potpunosti miruje a zavojnica je ta koja se kreće prema i od magneta pokazivač na galvanometru će se također otklanjati u oba smjera. Micanjem

zavojnice kroz magnetsko polje inducira se napon na zavojnici, te je jakost induciranog napona proporcionalan brzini kretanja zavojnice.

Iz toga zaključujemo da što je brže kretanje zavojnice ili promjena magnetskog polja, inducirana elektromagnetska sila odnosno napon na zavojnici će biti veći, stoga kako bi Faradayev zakon bio važeći jasno je da mora postojati kretanja između magnetskog polja i zavojnice, bilo to da se kreće samo zavojnica, samo magnetsko polje ili i jedan i drugi.

2.6.1 Faradayev zakon elektromagnetske indukcije

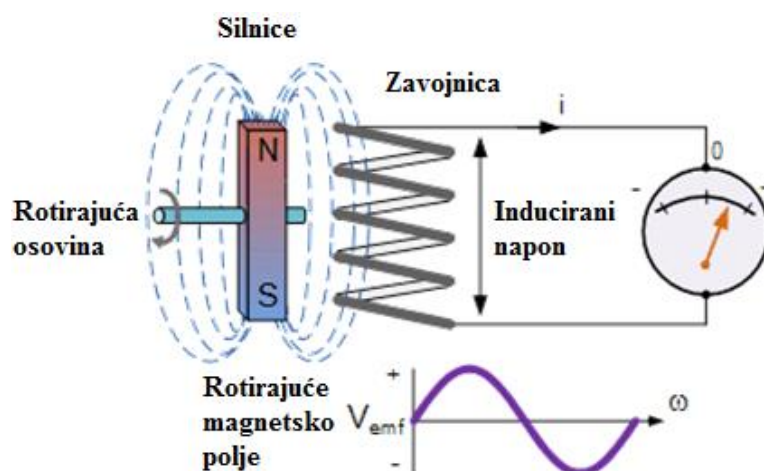
Iz svega gore navedenog dokazali smo da postoji povezanost između napona na zavojnici i promjenjivog magnetskog polja prema čemu je nastao Faradayev zakon elektromagnetske indukcije koje glasi: elektromotorna sila odnosno napon U induciran u zavojnici s N zavoja proporcionalan je broju zavoja i brzini promjene magnetskog toka Φ kroz zavojnicu.^[13]

$$U = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (2.10)$$

Koliko struje je moguće inducirati na zavojnici koristeći magnetsko polje određuju 3 faktora:

- 1) Broj zavoja u zavojnici - povećanjem broja zavoja u zavojnici povećava se broj nezavisnih vodiča koji prolaze kroz magnetsko polje. Količina inducirane elektromotorne sile biti će suma svih pojedinačnih zavoja u zavojnici. Što znači, ako u zavojnici imamo 20 zavoja, dobiti ćemo 20 puta jaču elektromotornu silu.
- 2) Brzina kretanja između magneta i zavojnice - ako ista zavojnica prolazi kroz isto magnetsko polje ali pri povećanoj brzini, navoji će prolaziti brže kroz silnice magnetskog polja stoga će i dobivena elektromagnetska sila biti veća.
- 3) Jakost magnetskog polja - ako se ista zavojnica kreće istom brzinom kroz jače magnetsko polje, dobivena elektromotorna sila će biti veća.

Kada bi se magnet kretao kroz zavojnicu pri konstantnoj brzini i na konstantnoj udaljenosti bez stajanja inducirao bi se konstantan napon koji bi naizmjenično bio pozitivan i negativan odnosno nastao bi izmjenični napon. To je osnovni princip na kojem se temelji rad generatora.



Slika 2.11. Rad generatora

Jednostavni generator prikazan na slici (Slika 2.11.) sastoji se od permanentnog magneta koji se rotira oko centralne osovine te zavojnice koja je stavljena pored rotirajućeg magnetskog polja. Kako se magnet okreće tako se magnetsko polje na vrhu i dnu zavojnice konstantno mijenja između sjevernog i južnog pola. Rotacijom magneta i stalnom promjenom magnetskih polova dolazi do elektromagnetske indukcije na zavojnici prema Faraday-evom zakonu.^[14]

2.6.2 Lenzov zakon

Lenzov zakon govori da je polaritet inducirane elektromotorne sile, kao posljedica promjene magnetskih polova prema Faraday-evom zakonu, takav da tvori struju čije je magnetsko polje suprotnog smjera od onoga koje je proizvelo tu struju.^[15] Negativan predznak u Faradayevom zakonu elektromagnetske indukcije ukazuje na to da inducirana elektromagnetska sila i magnetski tok imaju suprotne vrijednosti.

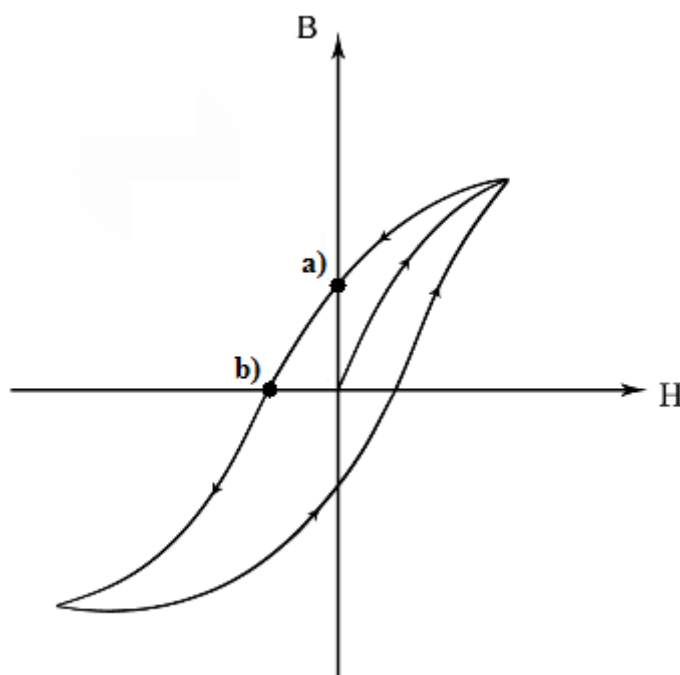
Kada bi magnetsko polje novonastale struje bilo istog smjera kao i polje koje je stvorilo tu struju, onda bi ta dva magnetska polja zajedno proizvodila struju dvostruke jačine pri čemu bi nastalo jače magnetsko polje koje bi opet proizvodilo još jaču struju koja bi proizvodila jače magnetsko polje i tako u beskonačnu jačinu struje i magnetskog polja, što je naravno, prema zakonu o očuvanju energije nemoguće.

U slučaju kada je smjer magnetskog polja koje je proizvela struja suprotnog smjera i jednake jakosti onog koje je proizvelo tu struju onda ne dolazi do nikakvih promjena u jačini magnetskog polja, što je analogija s trećim Newton-ovim zakonom akcije i reakcije.^[16]

Lenzov zakon može se najjednostavnije prikazati pokusom sa magnetom i bakrenom cijevi. Kada običnu čeličnu kuglicu stavimo u cijev ona će padati normalno pod utjecajem sile teže u određenom vremenu (t_1). Međutim, ako pustimo magnet da pada slobodnim padom kroz bakrenu cijev, primijetiti ćemo da magnet pada puno sporije (t_2), odnosno $t_2 \gg t_1$. Razlog sporijeg padanja magneta je upravo ta sila magnetskog polja koja je suprotnog smjera.

2.7 Permanentni magneti

Pravi permanentni magneti trebaju proizvesti jako magnetsko polje sa svojom malom masom te trebaju ostati stabilni prilikom izlaganja utjecajima koji bi ga mogli demagnetizirati. Poželjna svojstva takvih magneta definiraju se pojmovima remanentni magnetizam i koercitivnost magnetskih materijala.



Slika 2.12. Petlja histereze - **a)** remanentni magnetizam i **b)** koercitivnost

Kada se feromagnetski materijal namagnetizira u jednome smjeru, on neće težiti da se demagnetizira do nule kada se makne iz utjecaja magnetskog polja. Količina magnetizma koja ostaje u feromagnetu pri jakosti magnetskog polja $H=0$ naziva se remanentni magnetizam. Da bi se demagnetizirao do $B=0$, magnet se treba izložiti magnetskom polju suprotnog smjera. Jakost magnetskog polja potrebna da bi se magnet demagnetizirao naziva se koercitivnost. Ako suprotno magnetsko polje nastavi magnetizirati feromagnetski materijal, magnetizacija

će se prikazati u obliku petlje, tzv. petlja histereze (Slika 3.1). Histereza je posljedica nemogućnosti magnetizacije u oba smjera po istoj krivulji zbog postojanja magnetskih domena u materijalu, te se izražava kao ovisnost jakosti magnetskog polja u magnetiziranom materijalu, B [T] i jakosti vanjskog magnetskog polja H , [T]. Kada se magnetske domene usmjere, potrebna je energija kako bi se one ponovno okrenule. Neki feromagnetski materijali imaju svojstvo zadržavanja magnetskog polja na neodređeno vrijeme te se nazivaju permanentnim magnetima.

U tablici 3.1 su prikazani neki materijali koji se koriste kao permanentni magneti. Remanentni magnetizam i koercitivnost su navedeni u tablici te izraženi u tesli T, glavnoj oznaci za jakost magnetskog polja. Osim te dvije veličine navedene su vrijednosti ukupne jakosti magnetskog polja koje određena količina namagnetiziranog magneta može proizvesti, te se izražava kao $BH_{\max}$. Visoke vrijednosti tog izraza govore da se veće količine magnetskog toka mogu ostvariti s magnetima manjeg volumena.

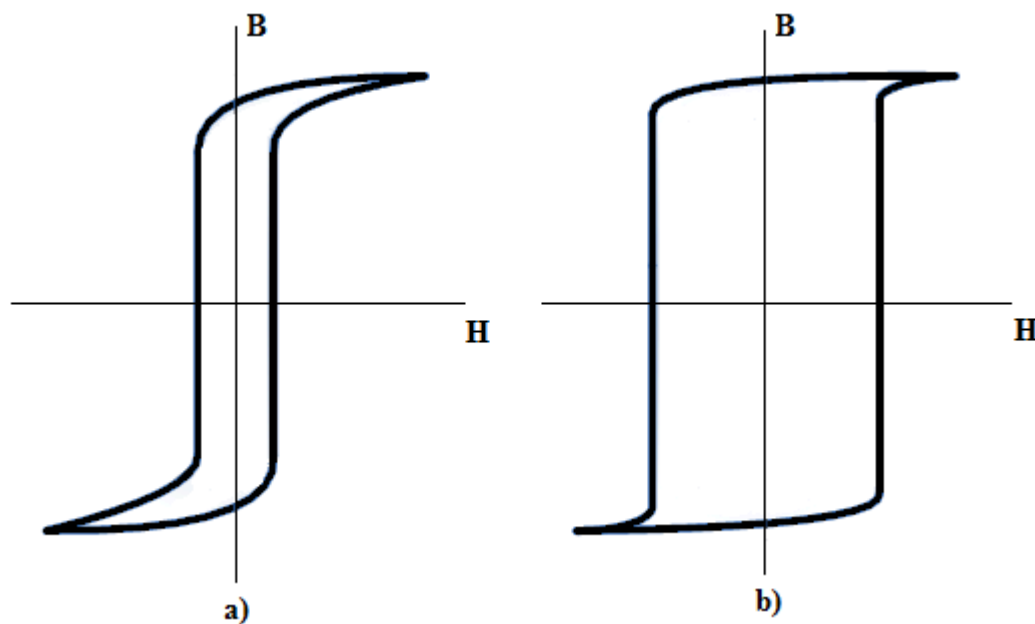
Tablica 3.1. Vrijednosti glavnih svojstava nekih permanentnih magneta.

Materijal	Koercitivnost (T)	Remanentni mag. (T)	$BH_{\max}$ / kJ/m ³
BaFe ₁₂ O ₁₉	0.36	0.36	25
Alnico IV	0.07	0.6	10.3
Alnico V	0.07	1.35	55
Alcomax I	0.05	1.2	27.8
MnBi	0.37	0.48	44
Ce(CuCo) ₅	0.45	0.7	92
SmCo ₅	1.0	0.83	160
Sm ₂ Co ₁₇	0.6	1.15	215
Nd₂Fe₁₄B	1.2	1.2	260

Iz tablice se vidi kako su neodimijski magneti odnosno Nd₂Fe₁₄B magneti najjači jer imaju najveću $BH_{\max}$ vrijednost od svih permanentnih magneta.

Legure od kojih su permanentni magneti napravljeni su vrlo zahtjevne za metaluršku obradu zbog njihove izrazite tvrdoće ali i krtosti. Mogu se rastaliti te lijevati u željene oblike ili se pretvarati u prah te formirati. Prahovi se miješaju sa smolama te se tlače i termički obrađuju. Feromagnetski materijali se dijele na meke i tvrde magnete, ovisno o vrijednosti

njihove koercitivnosti. Materijali s visokom koercitivnosti nazivaju se tvrdim magnetima, dok se materijali s niskom nazivaju mekim magnetima. Meki magneti su idealni za jezgre transformatora zbog malih gubitaka energije kao posljedica uske petlje histereze (Slika 3.2.a), odnosno mogućnosti da se lagano magnetiziraju u oba dva smjera.^[18] Tvrdi magneti tvore široku petlju histereze, te imaju visoke vrijednosti remanentnog magnetizma i koercitivnosti (Slika 3.2.b) iz čega je očito da se teško magnetiziraju, pogotovo iz jednog smjera u drugi za što je potrebno puno energije. Stoga su tvrdi magneti idealni permanentni magneti.^[17]



Slika 3.2. a) uska petlja histereze karakteristična za meke magnete i b) široka petlja histereze karakteristična za tvrde magnete

2.7.1 Keramički magneti

Keramički ili oksidni magneti su načinjeni od željezovog oksida (Fe_2O_3) i barijeva karbonata (BaCO_3) ili stroncijeva karbonata (SrCO_3). Takvi magneti su lako dostupni po prihvatljivoj cijeni za razliku od ostalih permanentnih magneta što ih čini vrlo traženima zbog niske cijene. Keramički magneti se dobivaju prešanjem i sinteriranjem, što ih čini tvrdima ali i krhkima te ako se žele obrađivati potrebne su dijamantne brusilice. Oni imaju najbolji omjer između jakosti magneta, otpora na demagnetizaciju i cijene, zbog čega su među najprimjenjivijim magnetima danas.

Prednosti	Nedostaci
Niska cijena	Visoka krtost
Velika koercitivna sila	Slabo magnetsko polje
Vrlo otporni na koroziju	

2.7.2 Alnico magneti

Alnico magneti su načinjeni od smjese aluminijsa, nikla i kobalta sa malim količinama drugih elemenata radi poboljšanja magnetskih svojstava. Alnico magneti imaju dobru temperaturnu stabilnost ali se mogu lagano demagnetizirati. Alnico magneti se proizvode na dva načina. Prvi način je sinteriranjem pri čemu se dobiju odlična mehanička svojstva materijala dok je drugi teljenje te se dobiju magneti različitih oblika i jakog magnetskog polja. Alnico magneti su zamijenjeni u mnogim primjenama s keramičkim i rijetkim magnetima.

Prednosti	Nedostaci
Visoka otpornost na koroziju	Visoka cijena
Visoka mehanička tvrdoća	Niska koercitivna sila
Visoka temperaturna stabilnost	Slabo magnetsko polje

2.7.3 Samarij-kobalt (Sm-Co)

Samarij-kobaltne magneti pripadaju skupini magnetska rijetkih metala koji su otporni na oksidaciju te imaju jače magnetsko polje te veću otpornost na temperature od Alnico i keramičkih magneta. Samarij-kobalt magneti se koriste od 70-ih godina prošlog stoljeća pa sve do danas. Ovi magneti nude najbolja svojstva pri visokim temperaturama, mogu opstati na temperaturama i do 573K. Sinterirani samarij-kobalt magneti su krhki te mogu pucati pri naglim promjenama temperatura. Zbog visoke cijene samarij-kobalt magneti se koriste u situacijama kada je potrebna otpornost na koroziju i visoke temperature.^[18]

Prednosti	Nedostaci
Visoka otpornost na koroziju	Visoka cijena
Stabilnost pri visokim temperaturama	Slaba mehanička čvrstoća
Visoka koercitivna sila	

2.7.4 Neodimij-željezo-bor (NdFeB)

Općenito poznati kao magneti rijetkih elemenata, neodimij-željezo-bor (NdFeB) i samarij-kobaltne (SmCo) magneti su slitine u kojima su elementi iz skupine lantanida periodnog sustava elemenata. Neodimijski magnet, poznat pod imenom NdFeB, NIB ili Neo-magnet, je najupotrebljiviji oblik rijetko zemljanih magneta. To je permanentni magnet, slitina, načinjena od neodimija (Nd), željeza (Fe) i bora (B), kako bi se stvorila $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ tetragonalna kristalna struktura. Patentirani su 1982. godine od strane General Motors-a i Sumitomo Special Materials, te postali najjači permanentni magneti koji su napravljeni. Zamijenili su druge vrste permanentnih magneta u mnogim modernim proizvodima koji zahtijevaju jake permanentne magnete.

Tetragonalna kristalna struktura $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ kristala ima izuzetno jaku magnetsku kristalnu anizotropiju, odnosno potrebno je puno energije kako bi se namagnetizirao u drugom smjeru. To svojstvo daje materijalu veliku koercitivnost. Neodimijski magneti imaju visoku saturaciju, odnosno maksimalnu magnetizaciju što im omogućuje da spremaju velike količine magnetske energije. Izotropni vezni NdFeB magneti mogu biti namagnetizirani u bilo kojem smjeru, ili sa više polova. Za magnetizaciju magneta da sadrži više polova potrebni su posebni uređaji, a neki takvi magneti mogu koštati nekoliko tisuća dolara, ovisno o kompleksnosti proizvoda.

Glavna svojstva koja definiraju kvalitetu permanentnih magneta su remanentni magnetizam (M_r), koji je mjera jakosti magnetskog polja namagnetiziranog magneta, koercitivnost (H_c), potrebno magnetsko polje da se magnet demagnetizira, ukupna energija ($BH_{\max}$) i Curie-ova temperatura (T_c), temperatura iznad koje slabe magnetska svojstva. Neodimijski magneti imaju vrlo visoki remanentni magnetizam kao i visoku koercitivnost i ukupnu energiju. Nedostatak je niska Curie-ova temperatura gdje nakon 130°C dolazi do naglog pada magnetskih svojstava. Neodimijskim magnetima se dodaju terbij (Tb) i disprozij (Dy) kako bi zadržao magnetska svojstva pri višim temperaturama.

Tablica 3.2. Usporedba glavnih svojstava s drugim permanentnim magnetima

Magnet	M_r (T)	H_c (kA/m)	$BH_{\max}$ (kJ/m ³)	T_c (°C)
$\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ (sinterni)	1.0–1.4	750–2000	200–440	310–400
$\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ (vezani)	0.6–0.7	600–1200	60–100	310–400
SmCo_5 (sinterni)	0.8–1.1	600–2000	120–200	720
$\text{Sm}(\text{Co}, \text{Fe}, \text{Cu}, \text{Zr})_7$ (sinterni)	0.9–1.15	450–1300	150–240	800
Alnico (sinterni)	0.6–1.4	275	10–88	700–860
Sr-ferrite (sinterni)	0.2–0.4	100–300	10–40	450

U praksi, svojstva neodimijskih magneta ovise o sastavu legure, mikro-strukturi i načinu na koji je magnet proizveden. Neodimijski magneti se proizvode na dva glavna načina:

Sinterni NdFeB magneti - Sirovine se tale u peći te prenose u kalupe gdje se hlade iz užarene smjese kako bi se dobile poluge. Poluge se melju te usitnjavaju u fini prah koji ide na daljnju obradu. Fini NdFeB prah se preša u kalupima, a zatim sinterira taljenjem praška u čvrti materijal. Postoje dvije vrste prešanja: prešanje praha u kalupu koji je izrazito čvrst i prešanje praha u gumenom kalupu gdje je prilikom prešanja potrebno primijeniti jednake sile sa svih strana kalupa. Dobiveni sinterni oblici magneta se temperaturno obrađuju, režu na željene oblike, površinski obrađuju te magnetiziraju. Danas se godišnje proizvede između 45000 i 50000 tona sinternih neodimijskih magneta, većinom u Kini i Japanu. U 2011. godini Kina je proizvodila oko 95% vrsta rijetko zemljanih magneta dok je proizvela gotovo 76% ukupne svjetske količine magneta rijetkih zemljanih elemenata.

Vezani NdFeB magneti - vezani NdFeB magneti se proizvode tehnikom "melt spinning" gle nastaje tanka vrpca NdFeB slitine. Vrpca sadrži nasumično orijentirane N_2FeB nano čestice. Vrpca se zatim usitnjava, miješa s polimerom te preša u vezane magnete. Vezani magneti imaju slabije magnetsko polje od sinteriranih ali im je prednost ta da se mogu oblikovati u složene oblike bez gubitaka glavnih svojstava. Vezani magneti su izotropni a visokotlačnim postupcima moguće je dobiti jake anizotropne vezane magnete velike gustoće. Godišnje se proizvede oko 5,500 tona vezanih neodimijskih magneta. ^[19]

Otpornost Sm-Co magneta na koroziju je dobra dok NdFeB magneti ne pokazuju tako dobra svojstva prilikom izlaganja korozivnoj okolini. Bojanje i platiranje su preporučeni za NdFeB magnete. Nikal, cink ili kositar poboljšavaju korozivna svojstva neodimijskih magneta kao i mnogi organski premazi koji su uspješni u postizanju tog cilja. U jako korozivnim i agresivnim sredinama preporučljivo je da se koriste višeslojne zaštite na neodimijskim magnetima ili čak zaštita magneta sa kućištem.

Velika sila koju proizvode neodimijski magneti može proizvesti štetu koja nije prije viđena kod drugih magneta. NdFeB magneti veći od nekoliko kvadratnih centimetara dovoljno su jaki da ugroze zdravlje čovjeka kao posljedica neopreznog rukovanja. Dovoljno su jaki da mogu nagnječiti pa čak i zdrobiti dijelove ljudskog tijela ako se osoba koja rukuje s njima nađe između dva magneta ili magneta i metalne površine. Magnet koji se približe jedan drugome se privuku tolikom snagom da mogu razbiti krhke materijale koji se nađu

između njih. Jako magnetsko polje može oštetiti mehaničke i električne uređaje, može obrisati sadržaj na disketi i kreditnim karticama, namagnetizirati satove a i oštetiti panele na CRT monitorima. [20]

Tablica 3.3. Vrste neodimijskih magneta

Material Grade	Max. working Temp. (°C)	Remanence				Coercivity				Intr. Coercivity		Max. Energy Product			
		Br(T)		Br(kGs)		bHc(kA/m)		bHc(kOe)		iHc (kA/m)	iHc (kOe)	(BH) _{max} (KJ/m ³)		(BH) _{max} (MGOe)	
		Nom	Min	Nom	Min	Nom	Min	Nom	Min			Nom	Min	Nom	Min
N30	80	1.12	1.08	11.2	10.8	836	780	10.5	9.8	955	12	239	223	30	28
N33		1.17	1.14	11.7	11.4	876	820	11.0	10.3	955	12	263	247	33	31
N35		1.21	1.17	12.1	11.7	915	860	11.5	10.8	955	12	279	263	35	33
N38		1.26	1.22	12.6	12.2	915	860	11.5	10.8	955	12	303	287	38	36
N40		1.29	1.26	12.9	12.6	876	836	11.0	10.5	955	12	318	303	40	38
N42		1.30	1.27	13.0	12.7	876	836	11.0	10.5	955	12	334	318	42	40
N45		1.38	1.32	13.8	13.2	924	876	11.6	11.0	955	12	366	342	46	43
N48		1.42	1.38	14.2	13.8	890	835	11.19	10.5	876	11	390	366	49	46
N50		1.47	1.41	14.7	14.1	1035	829	13.0	10.5	876	11	414	382	52	48
N30M	100	1.12	1.08	11.2	10.8	836	780	10.5	9.8	1114	14	239	223	30	28
N33M		1.17	1.14	11.7	11.4	876	820	11.0	10.3	1114	14	263	247	33	31
N35M		1.21	1.17	12.1	11.7	915	860	11.5	10.8	1114	14	279	263	35	33
N38M		1.26	1.22	12.6	12.2	915	860	11.5	10.8	1114	14	303	287	38	36
N40M		1.29	1.26	12.9	12.6	915	860	11.5	10.8	1114	14	318	303	40	38
N42M		1.32	1.28	13.2	12.8	1010	955	12.7	12.0	1114	14	342	318	44	40
N45M		1.38	1.32	13.8	13.2	1050	994	13.2	12.5	1114	14	366	334	46	42
N48M		1.43	1.37	14.3	13.7	1090	1035	13.7	13.0	1120	14	392	360	49	45
N50M		1.47	1.41	14.7	14.1	1138	1043	14.3	13.1	1114	14	414	382	52	48
N27H	120	1.06	1.02	10.6	10.2	796	740	10.0	9.3	1353	17	215	199	27	25
N30H		1.12	1.08	11.2	10.8	836	780	10.5	9.8	1353	17	239	223	30	28
N33H		1.17	1.14	11.7	11.4	876	820	11.0	10.3	1353	17	263	247	33	31
N35H		1.21	1.17	12.1	11.7	915	860	11.5	10.8	1353	17	279	263	35	33
N38H		1.26	1.22	12.6	12.2	955	915	12.0	11.5	1353	17	303	287	38	36
N40H		1.28	1.24	12.8	12.4	955	915	12.0	11.5	1353	17	334	311	42	39
N42H		1.32	1.28	13.2	12.8	1010	955	12.7	12.0	1353	17	342	318	43	40
N45H		1.36	1.32	13.6	13.2	1050	1000	13.2	12.5	1360	17	376	344	47	43
N27SH	150	1.06	1.02	10.6	10.2	796	740	10.0	9.3	1595	20	215	199	27	25
N30SH		1.12	1.08	11.2	10.8	836	780	10.5	9.8	1595	20	239	223	30	28
N33SH		1.17	1.14	11.7	11.4	876	820	11.0	10.3	1595	20	263	247	33	31
N35SH		1.21	1.17	12.1	11.7	915	860	11.5	10.8	1595	20	279	263	35	33
N38SH		1.26	1.22	12.6	12.2	924	870	11.6	10.9	1595	20	311	286	39	36
N40SH		1.28	1.24	12.8	12.4	989	939	12.4	11.8	1592	20	326	302	41	38
N42SH		1.35	1.30	13.5	13.0	1013	963	12.7	12.0	1600	20	344	312	43	39
N44SH		1.37	1.32	13.7	13.2	≥963		≥12.1		1600	20	358	326	45	41
N25UH	180	1.02	0.98	10.2	9.8	764	732	9.6	9.2	1990	25	199	183	25	23
N28UH		1.08	1.04	10.8	10.4	812	780	10.2	9.8	1990	25	223	207	28	26
N30UH		1.10	1.08	11.0	10.8	812	780	10.2	9.8	1990	25	247	223	31	28
N33UH		1.17	1.13	11.7	11.3	836	804	10.5	10.1	1990	25	270	247	34	31
N35UH		1.22	1.17	12.2	11.7	891	836	11.2	10.5	1990	25	279	263	35	33
N38UH		1.29	1.21	12.9	12.1	≥915		≥11.6		1990	25	318	287	40	36
N40UH		1.32	1.25	13.2	12.5	≥836		≥10.5		1990	25	334	303	42	38
N27EH	200	1.08	1.02	10.8	10.2	784	752	9.8	9.4	2388	30	223	191	28	25
N28EH		1.09	1.04	10.9	10.4	825	780	10.4	9.8	2388	30	231	207	29	26
N30EH		1.13	1.08	11.3	10.8	804	772	10.1	9.7	2388	30	247	223	31	28
N33EH		1.18	1.14	11.8	11.4	885	835	11.1	10.5	2388	30	272	248	34	31
N35EH		1.25	1.18	12.5	11.8	≥875		≥11.0		2388	30	295	263	37	33
N28AH	240	1.08	1.04	10.8	10.4	828	796	10.4	10.0	2785	35	223	207	28	26
N30AH		1.12	1.08	11.2	10.8	851	828	10.7	10.4	2785	35	239	223	30	28
N33AH		1.17	1.14	11.7	11.4	891	867	11.2	10.9	2785	35	263	247	33	31
N35AH		1.21	1.17	12.1	11.7	915	860	11.5	10.8	2785	35	271	247	34	31

3 PREGLEDNI DIO

3.1 Tehnološke primjene NdFeB magneta

Neodimijski magneti su najjači magneti na svijetu. Zbog njihove snage, čak i jako mali magneti mogu biti efektivni te ih to čini svestranima. Kako svijet napreduje tako je i njihova primjena sve učestalija. Neodimijski magneti su svuda oko nas, vjerojatno nam je trenutno jedan u džepu, u našem pametnom telefonu.

Nakon otkrića prvog neodimijskog magneta, počeli su se koristiti u mnoge svrhe. U industriji u proizvodnji električnih motora, u medicini, tehnologija temeljena na obnovljivoj energiji se bazira na super jakim neodimijskim magnetima. Oni su zaslužni za napredak tehnologije u posljednjih 30 godina. Osim u tehnologiji, koriste se i u kućanstvu, u hobijima poput modeliranja i pravljenja nakita. Zbog njihove izrazite snage, odličnih magnetskih svojstava, te prvenstveno otpornosti na demagnetizaciju, mogu se proizvoditi u raznim oblicima, čak i magneti veličine 1 milimetar kubični imaju veliki broj primjena.

Primjene neodimijskih NdFeB magneta:

1) Tvrdi diskovi

Tvrdi diskovi snimaju podatke tako da se magnetizira i demagnetizira tanki film feromagnetskog materijala na disku. Svaki disk je podijeljen na puno sektora dok svaki sektor ima puno malih nezavisnih magnetskih ćelija koje se magnetiziraju preko glave koja služi kao pisač i čitač u disku kada se na njega spremaju podatci. Glava u tvrdom disku napravljena je od fine zavojnice koja, kada se podatci pišu na disk, stvara jako magnetsko polje koje magnetizira točno određena područja na disku. Neodimijski magneti služe za pomicanje glave odnosno pisača/čitača u tvrdom disku.

2) Zvučnici

Neodimijski magneti u zvučnicima se koriste uz naelektriziranu zavojnicu koja pretvara električni signal uz pomoć magneta u mehaničku energiju. Kada na zavojnicu dođe električni signal, odnosno struja, dolazi do promjene magnetskog polja u zavojnici. Posljedica toga je micanje zavojnice od i prema neodimijskom magnetu. Vibriranjem zavojnica pomiče opnu zvučnika koja stvara zvučne signale.

3) Mikrofoni

Mikrofoni rade na sistemu suprotnom od zvučnika. Dijafragma je povezana sa zavojnicom koja je smještena pored neodimijskog magneta. Kada zvuk stvori vibracije u dijafragmi dolazi i do pomicanja zavojnice. Pomicanjem zavojnice pored neodimijskog magneta dolazi do stvaranja struje odnosno električnog signala karakterističnog za određeni zvuk.

4) Zubne proteze

Neodimijski magneti mogu se koristiti za držanje zubnih aparata ili zubnih proteza na mjestima gdje nedostaju zubi. U ovom slučaju su potrebni vrlo mali magneti, zbog čega su neodimijski magneti vrlo dobri jer magnet malih dimenzija ima veliku snagu. Presvlačenjem magneta antikorozivnom zaštitom se produžuje njegov vijek trajanja.

5) Magnetski spojena pumpa

Magnetski spojena pumpa se sastoji od osovine koju pokreće motor, na koju su povezani prsteni neodimijskih magneta i manjeg prstena neodimijskih magneta koji su spojeni na drugu osovinu koja se nalazi unutar većeg prstena. Kako motor okreće pogonsku osovinu tako set većih magneta proizvodi magnetsko polje koje okreće set manjih magneta koji okreću rotor. Takvi motori imaju dvije glavne prednosti. Prva glavna prednost je princip na kojem radi pumpa a to je da su osovina koju okreće motor i rotor potpuno odvojeni. Ako dođe do situacije u kojoj je rotor naglo zaustavljen, motor i dalje može nesmetano raditi bez da dođe do zapaljenja ili trajnih oštećenja. Druga prednost je mogućnost primjene takvih uređaja u uvjetima gdje je moguć ulazak vode u motor. S obzirom na to da su rotor i osovina koju pokreće motor potpuno odvojeni moguće je potpuno izolirati rotor te ga staviti u hermetički zatvoreno kućište.

6) Motori i generatori

Električni motori se temelje na kombinaciji elektromagneta i neodimijskih magneta kako bi se električna energija pretvorila u mehaničku. Generatori su suprotno od električnog motora. U njima se mehanička energija pretvara u električnu preko osovine koja vrti magnet pored zavojnice.

7) Magnetska rezonancija

Uređaji za magnetsku rezonanciju proizvode jako magnetsko polje koje usmjerava protone u ljudskom tijelu u smjeru magnetskog polja. Nakon toga u tijelo se usmjeravaju radio valovi koji daju detaljnu sliku unutrašnjosti tijela. Mnogi uređaji za magnetsku rezonanciju koriste velike neodimijske magnete.

8) Reed prekidači

Reed prekidač je prekidač koji je upravljan magnetskim poljem. Sastoji se od dva kraja feromagnetskih materijala koja su hermetički zatvorena u staklenoj kapsuli. Dizajnirani su tako da se uz prisustvo magnetskog polja oni namagnetiziraju te zatvore strujni krug, dok u odsutnosti magnetskog polja prekidaju strujni krug njihovim udaljavanjem. Glavna primjena takvih prekidača je detektiranje otvaranja i zatvaranja vrata u protuprovalnim sustavima.

9) ABS sustav

Pasivni ABS senzori koriste neodimijske magnete koji se nalaze u unutrašnjosti bakrene zavojnice. Senzori su smješteni blizu ABS reluktor prstena te kako se on okreće, na bakrenoj

zavojnici se inducira napon. Signal se prati kompjuterskim sustavom u automobilu te se koristi kako bi se odredila brzina kotača.

10) Magnetske osovine

Magnetske osovine koriste princip magnetske levitacije kako bi podupirale pokretne dijelove bez fizičkog kontakta. Koriste se kako bi se omogućila nesmetana kretnja bez trenja i mehaničkih deformacija čak i pri velikim brzinama. Da bi magnetski ležajevi funkcionirali potrebni su vrlo jaki magneti, odnosno koriste se neodimijski magneti.

11) Podizanje tereta

Permanentni magneti su najoptimalniji oblici magneta u teškoj industriji, gdje se koriste za podizanje velikih željeznih predmeta. U te svrhe koriste se jaki neodimijski magneti koji su često upotrebljavani s mehanizmom brzog isključivanja. Mehanizam koji omogućuje ispuštanje privučenih predmeta koji se temelji na demagnetiziranju magneta.

12) Magnetski separatori

Većina procesnih kompanija koriste jake magnete u sistemu magnetske separacije kako bi se uklonili željezni predmeti iz procesa ili procesnih linija. Za to se koriste cijevni magnetski filtri.

13) Proizvodnja nakita

Neodimijski magneti se koriste kao kopče u proizvodnji nakita. Neodimijski magneti sa naizmjenično namagnetiziranim dijelovima se koriste u te svrhe jer vrlo mali magnet proizvodi dovoljnu silu da zadrži materijal.^[21]

14) Magnetska suspenzija

Magnetska suspenzija je vrsta sistema suspenzije u kojem se šokovi apsorbiraju puno brže nego kod običnih sistema. Sistem se temelji na apsorberu ispunjenom polimernom tekućinom koja u sebi sadrži male magnetske čestice. Ovisno o uvjetima na cesti, električni signal se šalje u tekućinu u kojoj se u vrlo kratkom vremenskom periodu mijenja raspored magnetskih čestica a time i njena viskoznost. Viskoznost tekućine se momentalno može promijeniti iz vrlo male do gotovo čvrstog stanja. Tako se promjenom viskoznosti apsorberu omogućuje trenutno prigušivanje šokova.^[22]

15) Magnetske kočnice

Kočnice s permanentnim magnetima najčešće se primjenjuju u lokomotivama. Rad takvih kočnica temelji se na permanentnom magnetu koji stvara jako magnetsko polje te time privlači kočnicu na rotirajući disk. Za otpuštanje kočnice koristi se zavojnica kroz koju se pusti struja, koja stvara magnetsko polje suprotno od onog koje stvara magnet. Time se neutralizira magnetsko polje magneta te se kočnica može udaljiti. Kako bi magnetske kočnice funkcionirale potrebna je konstantna struja koja demagnetizira magnet jer bi inače diskovi bili stalno zakočeni.^[23]

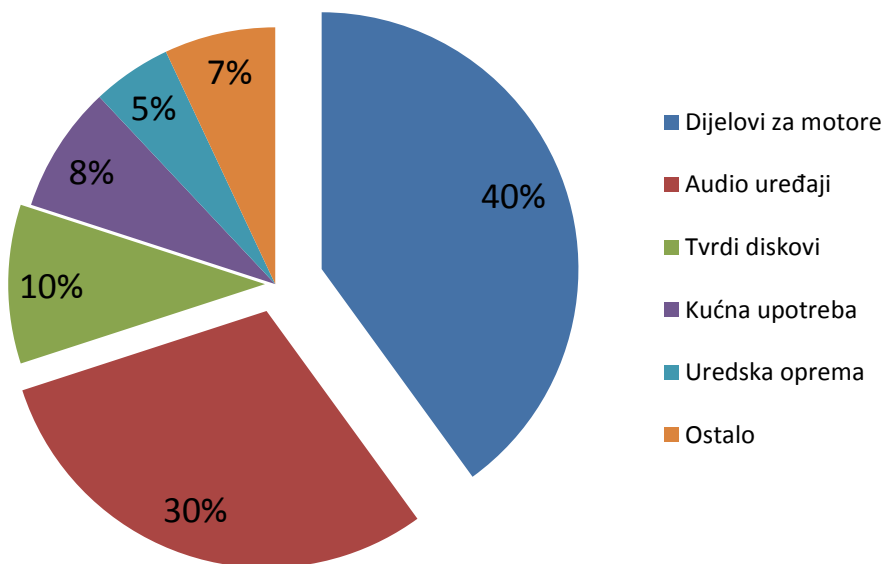
16) Starter motor s permanentnim magnetom

Starter motori s permanentnim magnetom su uvedeni u kasnim 80-im godinama. Glavne prednosti nad klasičnim starterom su manja težina i manje dimenzije. Permanentni starter se ne razlikuje od klasičnog sa zavojnicama s obzirom na princip rada. Jedina razlika je što su zavojnice koje stvaraju magnetsko polje koje bi pokrenule osovinu za zupčanicima zamijenjene s permanentnim magnetima te time smanjila težinu startera do 40%. ^[24]

17) Pickup-i na gitarama

Pickupi na gitarama se sastoje od permanentnih magneta oko kojih je zavojnica s oko 7000 zavoja. Permanentni magneti koji se nalaze ispod žica stvaraju magnetsko polje koje se proteže do žice. Kada trznemo žicu, ona počinje vibrirati. Tim vibracijama žica radi promjene u gustoći magnetskog polja te dolazi do indukcije na zavojnici. Svaka žica i svaki ton radi drugačije promjene u magnetskom polju što znači da će i svaki ton imati drugačiji signal. Takav signal putuje do pojačala te prelazi u zvučni signal na prethodno opisan način. ^[25]

Ovo je samo dio beskrajnog nabiranja primjena neodimijskih magneta. Neodimijski magneti zbog svojih karakteristika su primjenjivi u tehnologiji ili u svakodnevnom životu kao pomagala u kući ili u uredu. U dijagramu (Slika 3.1.) je prikazano koliko su neodimijski magneti upotrebljavani za određena područja.



Slika 3.1. Primjena neodimijskih magneta

4 REZULTATI I RASPRAVA

Neodimijski magneti u usporedbi sa drugim permanentnim magnetima pokazuju bolja svojstva, koja su prikazana u tablici 4.1. za glavne permanentne magnete:

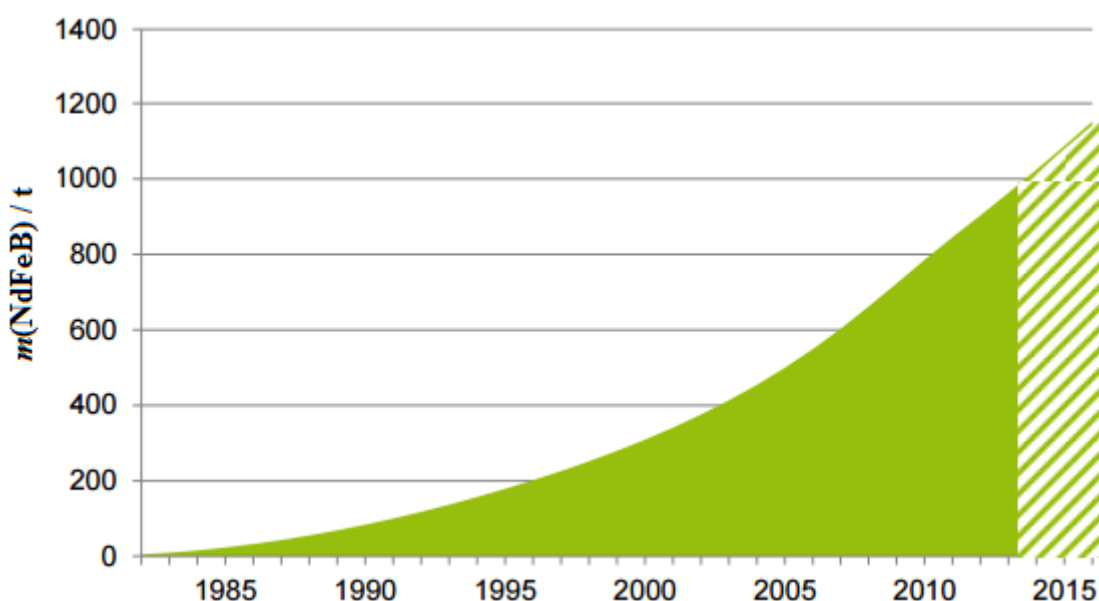
Tablica 4.1. Usporedba magnetskih svojstava permanentnih magneta

Magnet	M_r (T)	H_c (kA/m)	BH_{max} (kJ/m³)	T_c (°C)
Nd ₂ Fe ₁₄ B (sinterni)	1.0–1.4	750–2000	200–440	310–400
Nd ₂ Fe ₁₄ B (vezani)	0.6–0.7	600–1200	60–100	310–400
SmCo ₅ (sinterni)	0.8–1.1	600–2000	120–200	720
Sm(Co, Fe, Cu, Zr) ₇ (sinterni)	0.9–1.15	450–1300	150–240	800
Alnico (sinterni)	0.6–1.4	275	10–88	700–860
Sr-ferrite (sinterni)	0.2–0.4	100–300	10–40	450

Iz tablice 4.1. vidimo da sinterirani NdFeB magneti imaju veće vrijednosti remanentnog magnetizma što govori da zadržavaju najjače magnetsko polje nakon magnetizacije. Vrijednosti koercitivnosti NdFeB magneta su veće od vrijednosti ostalih permanentnih magneta što znači da se teže demagnetiziraju. Glavno i vrlo bitno svojstvo NdFeB magneta je ukupni magnetizam. Vidimo da BH_{max} vrijednosti neodimijskih magneta imaju gotovo duplo veći iznos od ostalih permanentnih magneta što potvrđuje njihovu jakost ali i opravdava njihovu primjenu. Nedostatak NdFeB magneta su niske vrijednosti Curieove temperature. Iz vrijednosti u tablici vidimo da pri 310°C neodimijski magneti potpuno gube svoja magnetska svojstva dok se sa određenim primjesama Curieova temperatura može povisiti do 400°C. Samarij kobaltni magneti imaju Curieovu temperaturu od 720-800°C. To znači da su nezamjenjivi kada su u pitanju visoke temperature.

5 ZAKLJUČAK

Neodimijski magneti su svojom prihvatljivom cijenom i dobrim magnetskim svojstvima brzo postali nezamjenjivi u tehnologiji i razvoju tehnologije. Primjene u električnim motorima, zvučnicima, računalima, mikrofonom samo su jedne u nizu primjena. Neodimijski magneti nas okružuju i gotovo se svakodnevno nađemo barem na kratko pod utjecajem njihovih magnetskih polja. Osim primjene u tehnologiji koriste se o u kućanstvu, hobijima te su odlični za demonstraciju magnetskih svojstava permanentnih magneta.



Slika 5.1. Upotreba neodimijskih magneta u Njemačkoj industriji

Neodimijski magneti su sve primjenjivani u industriji što se vidi iz dijagrama (Slika 5.1.) koji pokazuje kako je primjena neodimijskih magneta u industriji u Njemačkoj u zadnjem desetljeću porasla s 400 na više od 1000 tona godišnje.

Razvojem tehnologije počela je potražnja za jačim magnetima. Novi željezo-nitridni magneti su u razvoju te pokazuju svojstva bolja čak i od neodimijskih magneta. Primjena neodimijskih magneta biti će sve učestalija, sve do dana kada će biti otkriveni novi jači i bolji permanentni magneti.

6 LITERATURA

- [1] Prior Jennifer Overend; Janet A. Hale; Howard Chaney; Magnets, England, 1999. 38
- [2] <http://science.jrank.org/pages/4082/Magnetism-Origin-magnetism.html> 15.07.2015
- [3] M. Essert; J. Grilec; Elektricitet i magnetizam, Zagreb, 2009. 77-78
- [4] M. Essert; J. Grilec; Elektricitet i magnetizam, Zagreb, 2009. 80-85
- [5] Robert A. Hein; Thomas L. Francavilla; Donald H. Liebenberg; Magnetic susceptibility of superconductors and other spin systems, West Virginia, Coolfront, May 1991. 50
- [6] <https://ucl.ac.uk/qsd/people/teaching/MPM-Part2>
- [7] http://physics.mef.hr/Predavanja/Tvari_u_mag_p/main6.html
- [8] http://web.hep.uiuc.edu/home/serrede/P435/Lecture_Notes/Magnetism.pdf
- [9] <http://proleksis.lzmk.hr/43688/>
- [10] <http://enciklopedija.lzmk.hr/clanak.aspx?id=6565>
- [11] Ohaninan; Hans; Physics, 2.ed, Norton, 1985
- [12] Jay Newman; Physycs of the Life Sciences; New York, 2008. 454
- [13] <http://electronics-tutorials.ws/electromagnetism/electromagnetic-induction.html>
- [14] Lerner; Physics for scientists and engineers, London, 1996. 832
- [15] <http://www.electrical4u.com/lenz-law-of-electromagnetic-induction/>
- [16] Edward P. Furlani; Permanent magnet and electromechanical devices; 2001. 39
- [17] Myers H. P.; Introductory Solid State Physics, 2nd. Ed., Taylor & Francis, 1997, Ch 11
- [18] <http://rare-earth-magnets.com/types-of-permanent-magnets/>
- [19] <http://magnetsales.com/neo/neo1.htm>
- [20] <http://goudsmit-magnetics.nl/EN/About-magnetism/Neodymium-NdFeB-material>
- [21] <http://first4magnets.com/tech-centre-i61/information-and-articles-i70/neodymium-magnet-information-i82/common-applications-of-neodymium-magnets-i88>
- [22] <http://whyhighend.com/magnetic-suspension.html>
- [23] https://en.wikipedia.org/wiki/Electromagnetic_brake
- [24] <http://what-when-how.com/automobile/permanent-magnet-starter-motor-automobile/>
- [25] <http://www.physics.org/explorelink.asp?id=4945>

7 ŽIVOTOPIS

Zovem se Mario-Livio Jeličić, rođen sam u Zagrebu 18.03.1994. Osnovnu školu sam završio u Zagrebu u O.Š. Dugave. Nakon osnovne škole upisao sam srednju strukovnu školu, Prirodoslovnu školu Vladimira Preloga smjer Kemijski tehničar, gdje sam nakon četiri godine maturirao 2012. godine s ocjenom odličan. Iste godine upisao sam Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije u Zagrebu, smjer Primijenjena kemija. U sklopu studija, na drugoj godini sam odradio stručnu praksu u Coca-Cola Hellenic u Zagrebu u trajanju od mjesec dana.