

4. Magnetsko polje

4.1. Magnetski i nemagnetski materijali

Svi materijali, u magnetskom pogledu, mogu grubo da se klasifikuju u dve grupe: magnetske i nemagnetske, u zavisnosti od toga u kojoj meri ispoljavaju magnetske efekte. Nemagnetski materijali mogu dalje da se podele na dijamagnetske i paramagnetske. Magnetski efekti ovih materijala su veoma mali i veoma teško se detektuju. Za praktične primene može da se smatra da nemagnetski materijali svojim prisustvom ne menjaju magnetsko polje. Magnetski materijali, kao što su na primer gvožđe, kobalt, nikal ili feriti, su feromagnetski materijali. Ovi materijali svojim prisustvom jako menjaju magnetsko polje.

4.2. Vektor magnetske indukcije

U prvom poglavlju smo naučili da naelektrisana tela menjaju osobine prostora oko sebe. Takvo izmenjeno fizičko stanje naziva se električno polje. Slično tome, električne struje (naelektrisanja koja se kreću) menjaju prostor oko sebe. Takvo izmenjeno fizičko stanje naziva se magnetsko polje. Magnetsko polje se takođe predstavlja linijama polja.

Vektor magnetske indukcije opisuje magnetsko polje, slično kao što vektor jačine električnog polja opisuje električno polje. Magnetska sila, koja deluje na naelektrisanja koja se kreću, zavisi od vektora magnetske indukcije. Jedinica za vektor magnetske indukcije je tesla (T). Vektor magnetske indukcije se označava sa $\vec{B}$. Često se magnetska indukcija naziva i gustina magnetskog fluksa.

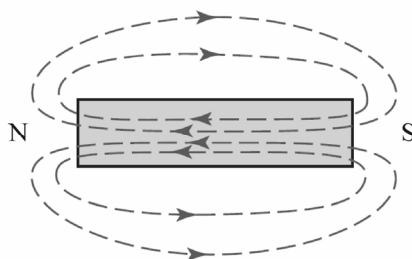
Magnetska svojstva feromagnetskih materijala (kao što je to na primer gvožđe) potiču od mikroskopskih struja u okviru molekula ili grupe molekula. Od tih mikroskopskih struja potiče vektor magnetske indukcije ovih materijala (magnetsko polje stalnih magneta). Prema tome, vektor magnetske indukcije stvaraju električne struje i stalni magneti.

4.3. Stalni magneti

Stalni magneti se prave od feromagnetskih materijala. Stalni magneti obično imaju oblik šipke (slika 4.1) ili potkovice. Magnetske sile su najizraženije na krajevima magneta, koji se nazivaju polovi.

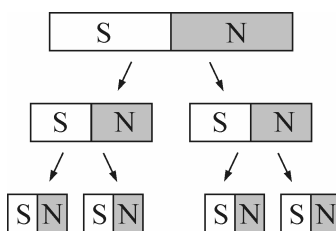
Jedna od prvih primena stalnih magneta je bila u kompasima. Ova primena je dovela do toga da se magnetskim polovima daju imena severni i južni. Severni pol se označava sa N (od engleske reči North), a južni sa S (od engleske reči South).

Magnetsko polje se grafički može prikazati pomoću linija vektora magnetske indukcije. Izgled linija vektora magnetske indukcije u okolini stalnog magneta prikazan je na slici 4.1. Izvan magneta linije su usmerene od severnog ka južnom polu magneta, dok su unutar magneta usmerene od južnog ka severnom polu. Linije vektora magnetske indukcije su zatvorene linije.



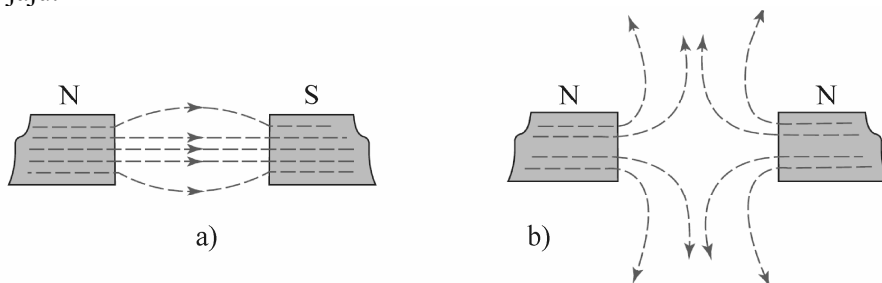
Slika 4.1. Linije vektora magnetske indukcije stalnog magneta.

Eksperimenti pokazuju da je nemoguće odvojiti severni pol magneta od južnog pola. Presecanjem magneta dobijaju se dva magneta koji takođe imaju severni i južni pol. Ova pojava je ilustrovana na slici 4.2.



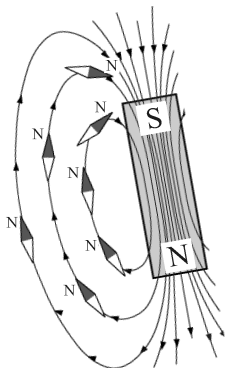
Slika 4.2. Nemoguće je odvojiti severni od južnog pola magneta.

Kada se dva stalna magneta nađu blizu jedan drugom, kao što je ilustrovano na slici 4.3, tada se oni ili privlače ili odbijaju u zavisnosti od toga kako su im okrenuti polovi. Poznato je da se raznoimeni polovi privlače, dok se istoimeni polovi odbijaju.



Slika 4.3. Linije vektora magnetske indukcije u okolini dva stalna magneta
a) raznoimeni polovi se privlače, b) istoimeni polovi se odbijaju.

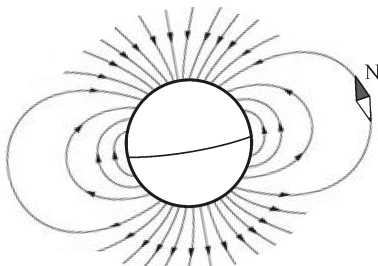
Magnetsko polje može da se detektuje magnetskom iglom, koja je i sama stalan magnet. Kao indikator koristi se severni pol magnetske igle. S obzirom da se raznoimeni magnetski polovi privlače, severni pol magnetske igle teži da se postavi u pravcu južnog magnetskog pola magneta, kao na slici 4.4. Na taj način, magnetska igla teži da se postavi u pravcu linija vektora magnetske indukcije. Ova pojava iskorišćena je za konstrukciju kompasa. Magnetska igla kompasa pokazuje Zemljin severni geografski pol (koji je u blizini južnog magnetskog pola Zemlje).



Slika 4.4. Magnetske igle u magnetskom polju stalnog magneta.

Planeta Zemlja ima konstantno magnetsko polje. U zavisnosti od lokacije na površi Zemlje, intenzitet magnetske indukcije je od $30 \mu\text{T}$ do $60 \mu\text{T}$. U okolini magnetskih polova njena vrednost je najveća i iznosi oko $60 \mu\text{T}$, dok na lokacijama koje su najudaljenije od magnetskih polova njena vrednost iznosi oko $30 \mu\text{T}$. Na našoj geografskoj širini magnetska indukcija na površi Zemlje iznosi oko $42 \mu\text{T}$. Izgled linija vektora magnetske indukcije Zemlje prikazan je na slici 4.5. Sa slike može da se uoči da je južni magnetski pol Zemlje u blizini severnog geografskog pola; i obrnuto, severni magnetski pol je u blizini južnog geografskog pola.

severni geografski pol



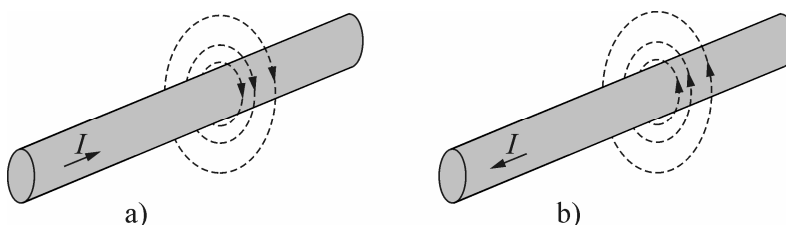
južni geografski pol

Slika 4.5. Linije magnetskog polja Zemlje. Geografski severni pol zemlje nalazi se u blizini južnog magnetskog pola.

Stalni magneti imaju tu prednost da im nije potrebno nikakvo napajanje da bi stvarali magnetsko polje. Sa druge strane, stalni magneti imaju nekoliko nedostataka: relativno su glomazni, tokom vremena mogu da izgube nešto od svog magnetizma, naročito ako su izloženi udarcima ili vibracijama. Za mnoge praktične primene ovi nedostaci su neprihvatljivi. Zato postoji potreba da se magnetsko polje stvori i na druge, pogodnije načine.

4.4. *Magnetsko polje električnih struja*

Početkom 19. veka je otkriveno da električna struja stvara magnetsko polje. Provodnik sa strujom stvara vektor magnetske indukcije koji je direktno proporcionalan jačini struje. Zato magnetsko polje stvoreno na ovaj način može lako da se uključi i isključi, da promeni smer i intenzitet. Izgled linija vektora magnetske indukcije koji stvara struja u pravolinijskom provodniku je prikazan na slikama 4.6.a i 4.6.b.



Slika 4.6. Smer vektora magnetske indukcije u okolini pravolinijskog provodnika zavisi od smera struje.

Linije vektora magnetske indukcije u okolini pravolinijskog provodnika su kružnice sa centrom na osi provodnika. Magnetsko polje postoji oko provodnika, na isti način kao što izolacija pokriva provodnik na celoj njegovoj dužini. Slično kao električno i gravitaciono polje, i magnetsko polje i magnetska indukcija opadaju sa porastom rastojanja.

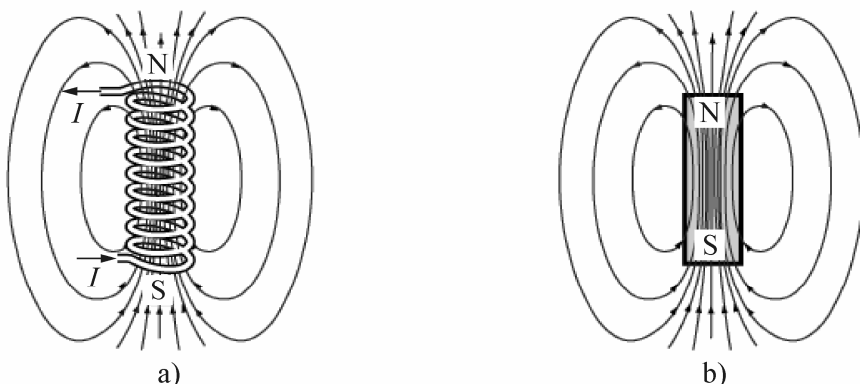
Ako se provodnik namota u spiralu oko neke cevi, dobija se kalem (namotaj, solenoid, zavojnica). Izgled kalema sa vazдушnim jezgrom, namotan na cev od kartona prikazan je na slici 4.7.



Slika 4.7. Namotaj (kalem, solenoid, zavojnica) sa vazдушnim jezgrom.

Magnetsko polje u okolini kalema, kada kroz kalem postoji struja, slično je polju u okolini stalnog magneta. Izgled linija vektora magnetske indukcije ta dva magnetska polja ilustrovan je na slikama 4.8.a i 4.8.b. Osim sličnosti u izgledu

linija, slične su im i osnovne karakteristike (na primer severni i južni pol se privlače, istoimeni polovi se odbijaju).



Slika 4.8. Linije vektora magnetske indukcije a) kalema i b) stalnog magneta.

Elektromagneti se obično prave kao kalemovi sa feromagnetskim jezgrom. Magnetska indukcija kalema sa feromagnetskim jezgrom je od nekolino desetina do nekoliko stotina puta veća od magnetske indukcije kalema sa vazдушnim jezgrom. Namotaj sa strujom na feromagnetskom jezgru može da stvori magnetsku indukciju izuzetno velikog intenziteta.

Elektromagneti imaju široku primenu. Oni su sastavni delovi generatora i električnih motora. Elektromagneti se koriste na otpadima da odvoje gvožđe od drugih materijala.

4.5. Primeri magnetskog polja

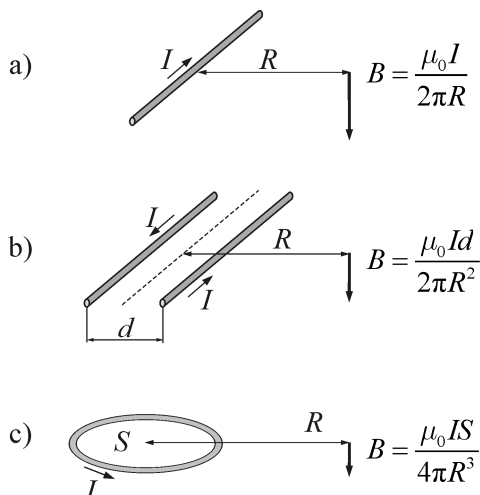
Na slici 4.9 prikazane su tri konfiguracije provodnika sa strujama. Iz ovih primera može da se vidi kako se magnetska indukcija menja u funkciji rastojanja.

Magnetska indukcija jednog provodnika sa strujom jačine I (slika 4.9.a) opada sa porastom rastojanja kao $1/R$. Magnetska indukcija dva provodnika sa strujama istog intenziteta i suprotnog smera (slika 4.9.b) opada sa porastom rastojanja kao $1/R^2$. Slično, i magnetska indukcija u okolini dalekovoda opada sa porastom rastojanja kao $1/R^2$.

Magnetska indukcija u okolini kućnih aparata može približno da se odredi kao magnetska indukcija kružnog zavojka sa strujom jačine I (slika 4.9.c). Sa porastom rastojanja, magnetska indukcija opada kao $1/R^3$.

Sa slike 4.9 može da se zaključi da će se magnetsko polje smanjiti ako se

- poveća rastojanje R ,
- smanji jačina struje u provodnicima,
- doda drugi provodnik sa strujom suprotnog smera,
- smanji rastojanje d između provodnika, ili smanji površina zavojka S .



Slika 4.9. Magnetska indukcija za tri različite konfiguracije provodnika.

Maksimalni intenziteti magnetske indukcije dozvoljeni za dugotrajan boravak ljudi zavise od frekvencije. Za magnetsko polje industrijske frekvencije (50 Hz) dozvoljen intenzitet je $40 \mu\text{T}$ (Pravilnik o granicama izlaganja nejonizujućim zračenjima, Službeni glasnik RS br. 104/2009, decembar 2009).

Magnetska indukcija na tlu ispod dalekovoda iznosi od nekoliko μT do par desetina μT , i brzo opada sa porastom rastojanja.

4.6. Vektor jačine magnetskog polja

Magnetsko polje se opisuje sa dve vektorske veličine; jedna je vektor magnetske indukcije, a druga je vektor jačine magnetskog polja. Vektor jačine magnetskog polja se označava sa $\vec{H}$. Jedinica za vektor jačine magnetskog polja je amper po metru, A/m.

Ako magnetsko polje postoji u vakuumu, tada je odnos vektora magnetske indukcije i vektora jačine magnetskog polja konstantan, i naziva se permeabilnost vakuuma

$$\mu_0 = \frac{\vec{B}}{\vec{H}}. \quad (4.1)$$

Vrednost ove konstante iznosi

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}. \quad (4.2)$$

Konstanta μ_0 se koristi kao vrednost u odnosu na koju se iskazuje permeabilnost svih ostalih materijala.

Jedinica za permeabilnost je henri po metru, H/m.

Permeabilnost materijala μ može da se uporedi sa permeabilnošću vakuuma

$$\mu = \mu_r \mu_0, \quad (4.3)$$

gde se μ_r naziva relativna permeabilnost. To je neimenovan broj koji pokazuje odnos vrednosti permeabilnosti neke sredine prema permeabilnosti vakuuma. Za sve nemagnetske materijale je $\mu_r \approx 1$ i samim tim $\mu \approx \mu_0$. Prema tome, izraz (4.1) važi približno i za sve nemagnetske materijale.

Za sve nemagnetske materijale, magnetsko polje može da se opiše sa samo jednim od vektora $\vec{B}$ ili $\vec{H}$, jer je $\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$. Izvan feromagnetskih materijala linije vektora jačine magnetskog polja izgledaju isto kao i linije vektora magnetske indukcije.

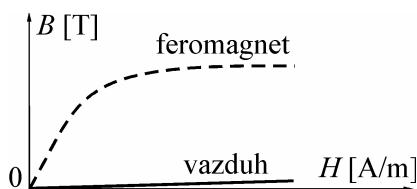
Razlika između opisivanja magnetskog polja uz pomoć vektora magnetske indukcije ili vektora jačine magnetskog polja je značajna kada se opisuje magnetsko polje u feromagnetskim materijalima.

4.7. Karakteristika magnetisanja feromagnetskih materijala

Kriva magnetisanja je grafik koji prikazuje promenu magnetske indukcije, B , sa promenom jačine magnetskog polja, H .

Ako bi se ovakav grafik nacrtao za nemagnetske materijale, dobila bi se prava linija koja prolazi kroz koordinatni početak, kao i prava prikazana na slici 4.10. Razlog tome je da je u nemagnetskim materijalima odnos B/H konstantan.

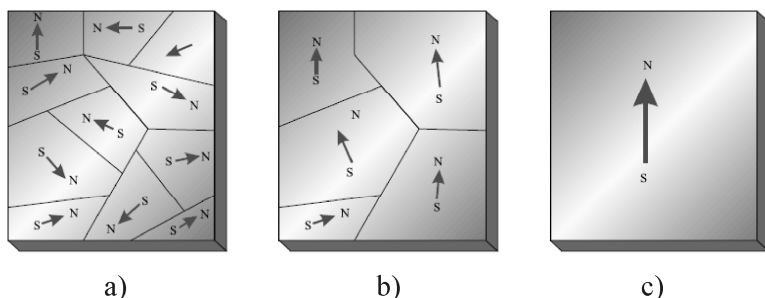
Za feromagnetske materijale relativna permeabilnost zavisi od jačine magnetskog polja, što rezultuje krivom na grafiku magnetisanja materijala. Kriva prvobitnog magnetisanja za tipičan feromagnetski materijal prikazana je isprekidanom linijom na slici 4.10.



Slika 4.10. Krive magnetisanja za vazduh i tipičan feromagnetski materijal.

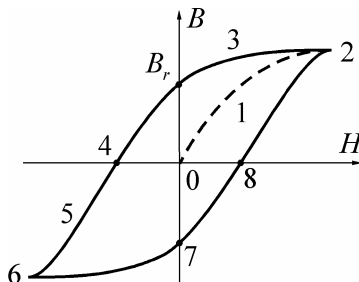
Ova nelinearnost je posledica efekata u koje spada i zasićenje magnetskih materijala. Ono što se dešava kada se magnetiše feromagnetski materijal prikazano je na slici 4.11. Oblasti označene na slici 4.11 nazivaju se domeni i oni se ponašaju kao mali stalni magneti. U nenamagnetisanom feromagnetskom materijalu, domeni su haotično orijentisani (slika 4.11.a). Kada se nađu u spoljašnjem magnetskom polju, koje u prikazanom primeru ima smer vertikalno naviše, domeni teže da se postave u pravcu polja (slika 4.11.b). Kada je spoljašnje polje dovoljno jako, svi

domeni će se postaviti u pravcu polja (slika 4.11.c) i za feromagnetski materijal se kaže da je u zasićenju.



Slika 4.11. Proces objedinjavanja domena tokom magnetisanja feromagnetskog materijala.

Zamislamo nenamagnetisan feromagnetski materijal. Ako se postepeno povećava strano magnetsko polje, materijal se magnetiše, domeni se uređuju sve više što je polje jače, a tačka na karakteristici se kreće putanjom označenom sa 1 na slici 4.12. U dovoljno jakom polju, materijal ulazi u zasićenje, što odgovara tački 2. Ako se nakon toga postepeno smanjuje strano magnetsko polje, tačka na karakteristici se ne vraća istim putem, već putanjom označenom sa 3. Kada se jačina magnetskog polja smanji na nulu, magnetska indukcija ne pada na nulu, već na vrednost označenu sa B_r , koja se naziva remanentna indukcija. Tek kada vektor jačine magnetskog polja promeni smer, tačka na karakteristici nastavi da se kreće ka tački označenoj sa 4, u kojoj je magnetska indukcija jednaka nuli. Ako jačina magnetnog polja i dalje raste u tom suprotnom smeru, tačka će se kretati po putanji označenoj sa 5, sve do tačke 6, u kojoj je materijal opet ušao u zasićenje. U ovom slučaju polaritet je suprotan od onog u tački 2. Još jedanput, jačina magnetskog polja može da se smanji na nulu, i onda postepeno povećava u svom prvobitnom smeru. Sa ovom promenom vektora jačine magnetskog polja, tačka na karakteristici će se kretati od tačke 6, preko tačaka 7 i 8, do tačke 2.



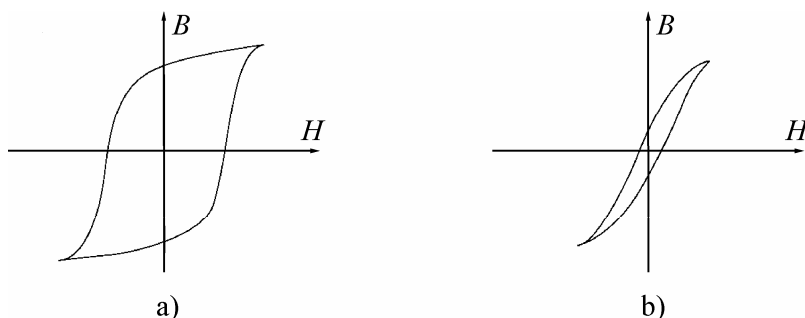
Slika 4.12. Karakteristika feromagnetskog materijala sa izraženim histerezisom.

Ako se magnetsko polje u kojem se nalazi feromagnetski materijal naizmenično menja u simetričnim granicama, onda se putanja tačke po karakteristici magnetisanja ustali kao što je to prikazano na slici 4.13. Tačka se

kreće po zatvorenoj putanji koja se naziva histerezisna petlja. U zavisnosti od širine histerezisne petlje, magnetski materijali se dele na magnetski tvrde i magnetski meke materijale.

Magnetski tvrdi materijali imaju široke histerezisne petlje kao na slici 4.13.a. Feromagnetski materijal ostaje namagnetisan i kada se strano polje isključi. Da bi se tvrdi magnetski materijali razmagnetisali potrebno je jako strano magnetsko polje. Zato se magnetski tvrdi materijali koriste za izradu stalnih magneta, hard diskova i drugih magnetskih medija.

Magnetski meki materijali imaju usku histerezisnu petlju, kao na slici 4.13.b. Za razmagnetisavanje takvih materijala dovoljno je i relativno slabo strano magnetsko polje. Magnetski meki materijali se veoma često koriste u inženjerskoj praksi. Od ovih materijala se prave jezgra elektroenergetskih transformatora, generatora i motora.



Slika 4.13. Histerezisna petlja a) magnetski tvrdih i b) magnetski mekih materijala.

Pri povećanju temperature, magnetska svojstva feromagnetskih materijala se menjaju. Kritična temperatura na kojoj feromagnetici gube svoja magnetska svojstva naziva se Kirijeva temperatura. Kirijeva temperatura za gvožđe iznosi 770°C.

4.8. Magnetski fluks

Magnetski fluks ima veliki značaj u tehnici, posebno pri projektovanju električnih mašina.

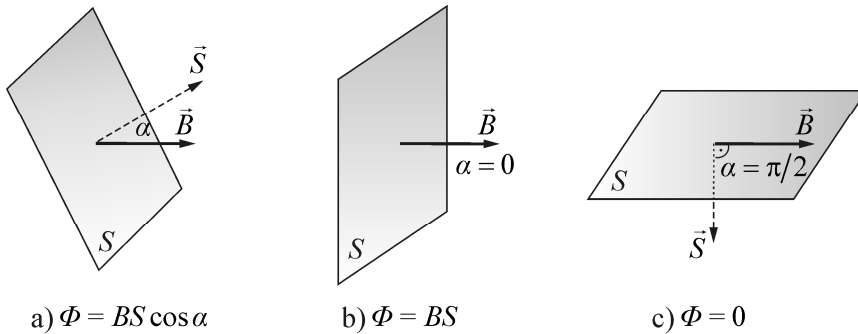
Magnetski fluks, Φ , u homogenom magnetskom polju indukcije $\vec{B}$ kroz ravnu površ definiše se kao

$$\Phi = \vec{B} \cdot \vec{S} = BS \cos \alpha, \quad (4.4)$$

gde je S površina i α ugao između vektora magnetske indukcije i normale na površ (slika 4.14.a). Da bi se odredio fluks, potrebno je izabrati normalu na površ (jednu od dve moguće). Vektor površine $\vec{S}$ ima pravac normale na površinu, a intenzitet brojno jednak samoj površini S .

Jedinica za magnetski fluks je veber, Wb.

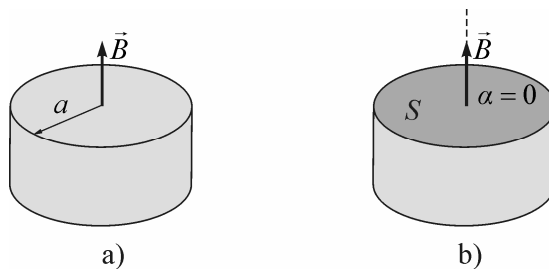
Kada je vektor magnetske indukcije normalan na površ (slika 4.14.b) izraz (4.4) svodi se na $\Phi = BS$. Kada je vektor magnetske indukcije tangentan na površ, fluks je jednak nuli (slika 4.14.c).



Slika 4.14. Uz definiciju magnetskog fluksa.

Primer 4.1

Vektor magnetske indukcije, intenziteta 50 mT, postoji na površi magneta u obliku cilindra poluprečnika $a = 1$ cm, kao na slici 4.15.a. Odrediti magnetski fluks kroz gornju površ magneta.



Slika 4.15. uz primer 4.1.

Rešenje.

$B = 50 \cdot 10^{-3}$ T, $S = (1\text{cm})^2 \pi = 3,14\text{cm}^2 = 3,14 \cdot 10^{-4}\text{m}^2$ i $\alpha = 0$ (slika 4.15.b)

Magnetski fluks kroz gornju površ magneta jednak je

$$\Phi = BS = 50 \cdot 10^{-3} \cdot 3,14 \cdot 10^{-4} = 15,7 \cdot 10^{-6} \text{ Wb} = 15,7 \mu\text{Wb}.$$

4.9. Induktivnost

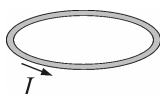
Zamislimo provodnu konturu u kojoj postoji struja jačine I . Ta struja stvara magnetsko polje. Vektor magnetske indukcije je linearno srazmeran jačini struje I . Magnetski fluks kroz tu konturu, kao i kroz bilo koju drugu konturu, takođe je

linearno srazmeran jačini struje I . Faktori srazmernosti između jačine struje i fluksa nazivaju se induktivnostima.

Posmatrajmo usamljenu provodnu konturu kao na slici 4.16. Vektor magnetske indukcije te konture je linearno srazmeran jačini struje kroz konturu. Fluks vektora magnetske indukcije kroz konturu se naziva sopstvenim magnetskim fluksom. Sopstveni magnetski fluks Φ je linearno srazmeran jačini struje I u konturi,

$$\Phi = LI, \quad (4.5)$$

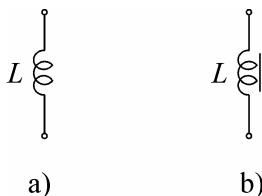
gde je L induktivnost (samoinduktivnost) konture. Jedinica za induktivnost je henri, H.



Slika 4.16. Usamljena provodna kontura.

4.10. Kalem

Električna komponenta koja je dizajnirana da ima unapred zadatu induktivnost se naziva kalem (ili namotaj). Grafički simbol za kalem bez feromagnetskog jezgra je prikazan na slici 4.17.a, a sa feromagnetskim jezgrom na slici 4.17.b



Slika 4.17. Grafički simbol za kalem.

Induktivnost kalema zavisi od kvadrata broja namotaja, površine poprečnog preseka namotaja, kao i od toga da li je jezgro napravljeno od feromagnetskog materijala ili ne.

Iako se kalem ponaša kao kratak spoj u kolima vremenski konstantnih struja, prilikom uspostavljanja struje kroz kalem potrebno je uložiti energiju za formiranje magnetskog polja kalema. Ta energija može da se odredi iz

$$W_m = \frac{1}{2} LI^2, \quad (4.6)$$

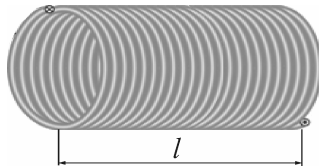
gde je L induktivnost kalema, a I jačina struje kroz kalem.

Primer 4.2

Samoinduktivnost kalema sa vazдушnim jezgrom, prikazanog na slici 4.18, dužine l , sa N zavoja površine S , može da se odredi iz izraza

$$L = \mu_0 \frac{N^2 S}{l}.$$

Polazeći od datog izraza, odrediti samoinduktivnost kalema sa vazдушnim jezgrom, dužine $l = 10\text{ cm}$, sa $N = 50$ zavoja poluprečnika $a = 0,5\text{ cm}$. Permeabilnost vakuma je $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}\text{ H/m}$.



Slika 4.18. uz primer 4.2.

Rešenje.

$$l = 0,1\text{ m}, \quad N = 50 \quad \text{i} \quad S = (0,5\text{ cm})^2 \pi = 0,785\text{ cm}^2 = 0,785 \cdot 10^{-4}\text{ m}^2.$$

Polazeći od datog izraza za samoinduktivnost kalema dobija se

$$L = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{(50)^2 \cdot 0,785 \cdot 10^{-4}}{0,1} = 2,465\text{ }\mu\text{H}.$$

Primer 4.3

Odrediti energiju kalema iz prethodnog primera, ako u namotajima postoji struja jačine $I = 2\text{ A}$.

Rešenje.

$$L = 2,465 \cdot 10^{-6}\text{ H} \quad \text{i} \quad I = 2\text{ A}.$$

Polazeći od izraza (4.6) za energiju kalema dobija se

$$W_m = 0,5 \cdot 2,465 \cdot 10^{-6} (2)^2 = 4,93\text{ }\mu\text{J}.$$

4.11. Pregled jednačina

Permeabilnost: $\mu = \mu_r \mu_0$.

Za nemagnetske materijale: $\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$.

Magnetski fluks: $\Phi = \vec{B} \cdot \vec{S} = BS \cos \alpha$.

Veza fluksa i jačine struje: $\Phi = LI$.

Energija kalema: $W_m = \frac{1}{2} LI^2$.

5. Vremenski promenljivo električno i magnetsko polje

5.1. Sporopromenljivo i brzopromenljivo elektromagnetsko polje

Ukoliko se izvori polja (naelektrisanja i struje) menjaju u vremenu ili se izvori kreću, odgovarajuća polja su funkcije vremena. Za takva polja kažemo da su promenljiva (vremenski promenljiva).

Svako magnetsko polje koje se menja u vremenu praćeno je vremenski promenljivim električnim poljem, ali i obrnuto; svako vremenski promenljivo električno polje praćeno je vremenski promenljivim magnetskim poljem. Električno i magnetsko polje su samo dva vida ispoljavanja jedinstvenog elektromagnetskog polja.

Kod vremenski promenljivih polja javljaju se razni efekti koji ne postoje kod vremenski konstantnih polja. Jedna od tih pojava je elektromagnetska indukcija. Druga pojava je vezana za činjenicu da se elektromagnetski talasi prostiru konačnom brzinom, koja je u vakuumu (i približno vazduhu) jednaka brzini svetlosti $c \approx 3 \cdot 10^8$ m/s. Zbog te konačne brzine, promene koje se dešavaju na mestu izvora elektromagnetskog talasa, ne osećaju se u svim tačkama u tom istom trenutku, već u nekom kasnijem trenutku. Ova pojava naziva se kašnjenje.

Kao primer kašnjenja, analizirajmo telefonski razgovor koji se prenosi preko satelita. Geostacionarni sateliti se nalaze na visini od oko $h = 30000$ km iznad površi Zemlje. Vreme potrebno elektromagnetskom talasu da sa Zemlje stigne do satelita iznosi $t = h/c = 0,1$ s. Ako se telefonska veza ostvaruje preko satelita, kašnjenje od jednog do drugog korisnika iznosi 0,2s, a isto toliko je i kašnjenje u suprotnom smeru. Kašnjenje je dovoljno veliko da se primećuje u razgovoru.

Promenljiva polja se dele u dve grupe između kojih ne postoji oštra granica. U prvu grupu spadaju polja koja se menjaju dovoljno sporo u vremenu, tako da se kašnjenje može zanemariti. Takva polja se nazivaju sporopromenljiva. U drugu grupu spadaju brzopromenljiva polja kod kojih se kašnjenje ne može zanemariti.

Primeri sporopromenljivih polja su električno i magnetsko polje elektroinstalacija (50Hz) koja su prisutna svuda oko nas. Isto tako svuda oko nas postoje elektromagnetski talasi koji dolaze od raznih radio i TV predajnika. Polje radio i TV predajnika je brzopromenljivo.

5.2. Elektromagnetska indukcija

Eksperimentima može da se utvrdi da se usled promene magnetskog fluksa u konturi stvara (indukuje) elektromotorna sila. Ova pojava se naziva elektromagnetska indukcija. Pojavu je otkrio Faradej, po kome se zakon koji je opisuje naziva Faradejev zakon elektromagnetske indukcije.

Struje dobijene procesom elektromagnetske indukcije su osnova elektroenergetskih sistema i razvoja naše civilizacije. Na ovom principu rade generatori, transformatori, Teslin indukcion motor, itd.

Vrednost indukovane elektromotorne sile, e_{ind} , u jednom zavojku je direktno proporcionalna brzini promene magnetskog fluksa kroz zavojak,

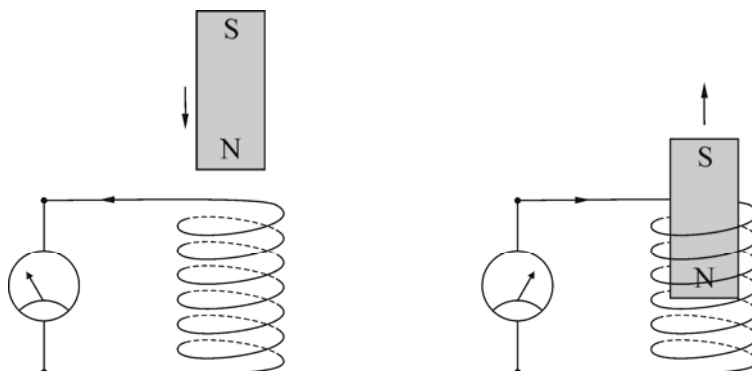
$$e_{\text{ind}} = -\frac{d\Phi}{dt}. \quad (5.1)$$

(Mala slova se koriste za označavanja elektromotorne sile, napona i jačine struje ako se oni menjaju u vremenu.) Jednačina (5.1) predstavlja matematičku formulaciju Faradejevog zakona elektromagnetske indukcije. Znak “–” pokazuje da se indukovana elektromotorna sila suprotstavlja promeni fluksa. Ako nema promene fluksa onda neće biti ni indukovane elektromotorne sile.

Ako se namotaj sastoji od N zavojava, fluks kroz namotaj će biti N puta veći, pa će i indukovana elektromotorna sila biti N puta veća od one indukovane u jednom zavojku

$$e_{\text{ind},N} = -N \frac{d\Phi}{dt}.$$

Faradejev zakon elektromagnetske indukcije ilustrovaćemo na sledećem primeru. Posmatrajmo namotaj, stalni magnet i ampermetar, koji su prikazani na slici 5.1. Elektromotorna sila se indukuje u namotaju kada se stalni magnet pomera gore-dole, kao što je ilustrovano na slici 5.1. Elektromotorna sila ima suprotan znak kada se kretanje vrši u suprotnom smeru, a smer elektromotorne sile će se promeniti i ako se magnet obrne (polovi magneti zamene mesta). Umesto da se kreće magnet, potpuno isti efekat bi se dobio i ako se pomera namotaj. Što je brže kretanje magneti ili namotaja, biće veća elektromotorna sila. Ako nema relativnog kretanja magneti i namotaja, elektromotorna sila jednaka je nuli.



Slika 5.1. Relativno kretanje magneta i namotaja izaziva elektromotornu silu u namotaju.

Indukovana elektromotorna sila zavisi od brzine promene fluksa kroz površ namotaja. Razlog promene fluksa nema značaja. Do pojave indukovane elektromotorne sile može doći zbog kretanja stalnog magneta, ili zbog kretanja namotaja u okolini stalnog magneta. Isto tako, s obzirom da u okolini provodnika sa strujom postoji magnetsko polje, indukovana elektromotorna sila može da se javi zbog kretanja provodnika sa strujom u okolini namotaja, ali takođe i zbog kretanja namotaja u okolini provodnika sa strujom. Do pojave elektromagnetske indukcije u namotaju doći će i ako se menja struja u provodniku, jer vremenski promenljiva struja stvara vremenski promenljiv fluks. Elektromotorna sila će se indukovati i u slučaju proizvoljne kombinacije prethodnih uzroka.

5.3. Primene elektromagnetske indukcije

Uređaji kod kojih se koriste efekti elektromagnetske indukcije su generatori, neki motori i električni transformatori.

5.3.1. Princip rada generatora

Električni generator je uređaj koji vrši konverziju mehaničke energije u električnu energiju. Na primer, izvor mehaničke energije može biti turbina koju pokreće voda, vodena para ili vetar.

Obrnuta konverzija, konverzija električne energije u mehaničku se dešava u motorima.

Svaki generator i većina motora imaju dva dela, od kojih jedan rotira, a drugi miruje. Deo koji rotira naziva se rotor, dok se deo koji miruje naziva stator.

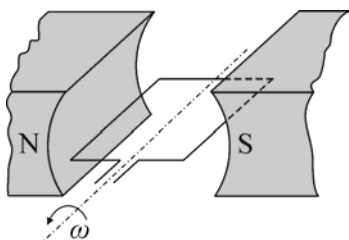
Svaki generator sadrži namotaje u kojima se indukuje elektromotorna sila. Ovi namotaji mogu biti postavljeni ili na statoru ili na rotoru. Magnetsko polje

predstavlja deo generatora. Magnetsko polje mogu da stvaraju ili stalni magneti ili elektromagneti, koji takođe mogu biti ili na rotoru ili na statoru.

Princip rada generatora bazira se na indukovanju elektromotorne sile u konturi, usled relativnog kretanja konture i magnetskog polja. Ako je kontura povezana sa nekim prijemnikom (potrošačem), kroz prijemnik će postojati struja, a to znači da se generisala električna energija. Električna energija je rezultat konverzije mehaničke energije kretanja u električnu.

Kao primer, posmatrajmo generator čiji je princip rada ilustrovan na slici 5.2. Za indukovanje elektromotorne sile u ovom slučaju koristi se kretanje konture u magnetskom polju. Provodnik u obliku pravougaone konture (rotor) obrće se oko svoje ose u prostoru između polova magneta (stator).

Kada kontura napravi jedan ceo okret, ona se vrati u svoj početni položaj. Tada je i indukovana elektromotna sila takođe kompletirala jedan svoj ciklus. Prema tome, za konfiguraciju sa dva pola magneta, kao na slici 5.2, jedan ciklus za elektromotornu silu odgovara jednom obrtaju konture. Zato je frekvencija indukovane elektromotorne sile jednaka broju obrtaja konture u sekundi. Elektromotorna sila koja se indukuje na ovaj način je prostoperiodična.



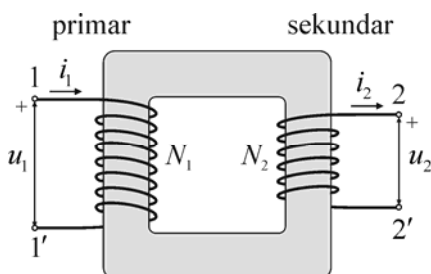
Slika 5.2. Generator prostoperiodične elektromotorne sile.

5.3.2. Električni transformator

Za prenos električne energije na velika rastojanja koristi se visoki napon. Time se omogućava da je za prenos iste snage, potrebna manja struja, što smanjuje gubitke u provodnicima (gubici su srazmerni kvadratu struje). Sa druge strane, u industriji, kancelarijama, stanovima i kućama, koriste se niži naponi iz bezbednosnih razloga. Pri istoj snazi, sniženje napona rezultuje povećanjem struje. Uređaji koji omogućavaju da se ovi zahtevi usklade i da se na taj način poveća efikasnost mreže nazivaju se transformatori.

Transformator je uređaj pomoću kog može da se smanji ili poveća naizmenični napon.

Transformator čine dve grupe namotaja postavljene na istom, obično feromagnetskom jezgri, kao na slici 5.3. Jedan namotaj se priključuje na izvor napajanja i naziva se primar. Drugi namotaj se priključuje na potrošač i naziva se sekundar. Feromagnetsko jezgro se obično izrađuje od gvozdениh, međusobno izolovanih limova.



Slika 5.3. Električni transformator.

Promenljiva struja u primarnom namotaju stvara promenljiv magnetski fluks kroz jezgro. Zbog tog promenljivog fluksa, javlja se promenljivi napon u drugom namotaju. Zato transformatori mogu da rade samo pri naizmeničnoj struji.

Označimo sa N_1 broj zavoja primara, a sa N_2 broj zavoja sekundara, kao na slici 5.3. Količnik broja zavoja sekundara i primara,

$$n = \frac{N_2}{N_1}, \quad (5.2)$$

naziva se prenosni odnos. Kod idealnog transformatora, naponi primara i sekundara se odnose kao brojevi zavoja

$$\frac{u_2}{u_1} = \frac{N_2}{N_1}. \quad (5.3)$$

Vidi se da je napon veći, tamo gde je broj namotaja veći. Sa odgovarajućim odnosom namotaja, transformator omogućava da se naizmenični napon poveća ako je N_2 veće od N_1 , ili smanji ako je N_2 manje od N_1 .

Kada je na sekundar vezan potrošač, tada se električna snaga prenosi iz primarnog kola u sekundar. Ako je transformator idealan, celokupna snaga primara će se preneti na sekundar:

$$U_1 I_1 = U_2 I_2, \quad (5.4)$$

odnosno

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{I_1}{I_2}. \quad (5.5)$$

Ako se poveća napon, struja se smanjuje za isti faktor i obrnuto.

Realni transformatori imaju velik koeficijent korisnog dejstva (98% i više), tako da prethodni izraz predstavlja dobru aproksimaciju i za realne transformatore.

Primer 5.1

Transformator treba da snizi napon gradske mreže na napon od 10 V. Primarni namotaj transformatora ima 1000 zavoja. Odrediti broj zavoja sekundarnog namotaja.

Rešenje.

U gradskoj mreži napon je 230 V. Brojni podaci u tekstu zadatka su napon primara $U_1 = 230 \text{ V}$, broj zavoja primara $N_1 = 1000$ i napon sekundara $U_2 = 10 \text{ V}$. Iz prenosnog odnosa transformatora,

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{U_2}{U_1},$$

može da se odredi broj zavoja sekundara

$$N_2 = N_1 \frac{U_2}{U_1} = 1000 \cdot \frac{10}{230} = 174.$$

Primer 5.2

Neka zgrada FTN predstavlja ekvivalentan potrošač priključen na sekundar transformatora tipa 20 kV / 0,4 kV. Izračunati

- prenosni odnos,
- struju primara, ako je efektivna vrednost struje sekundara $I_2 = 250 \text{ A}$.

Rešenje.

- Prenosni odnos transformatora iznosi

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{400}{20000} = \frac{1}{50}.$$

- Struja primara može da se odredi iz uslova da su snage primara i sekundara jednake

$$U_1 I_1 = U_2 I_2,$$

odakle je

$$I_1 = I_2 \frac{U_2}{U_1} = I_2 \frac{N_2}{N_1} = \frac{I_2}{50} = 5 \text{ A}.$$

Napon primara je 50 puta veći od napona sekundara, dok je struja primara 50 puta manja od struje sekundara.

Primer 5.3

Adapter za laptop treba da obezbedi struju od 1A pri naponu 24V iz mreže čiji je napon 120V. Ako primar ima $N_1 = 1000$ zavoja, izračunati

- broj zavoja sekundara i
- struju primara.

Rešenje.

- Iz odnosa napona primara

$$U_1 = 120 \text{ V},$$

i napona sekundara

$$U_2 = 24 \text{ V},$$

nalazi se odnos broja zavoja primara i sekundara

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{U_2}{U_1},$$

a odavde je broj zavoja sekundara

$$N_2 = N_1 \frac{U_2}{U_1} = 1000 \frac{24}{120} = 200.$$

b) Struja primara može da se odredi uslova da su snage primara i sekundara jednake

$$U_1 I_1 = U_2 I_2,$$

odakle je

$$I_1 = I_2 \frac{U_2}{U_1} = I_2 \frac{N_2}{N_1} = 1 \cdot \frac{200}{1000} = 0,2 \text{ A}.$$

5.4. Pregled jednačina

Indukovana elektromotorna sila: $e_{\text{ind}} = -\frac{d\Phi}{dt}$.

Prenosni odnos transformatora: $\frac{N_2}{N_1} = \frac{u_2}{u_1}$.