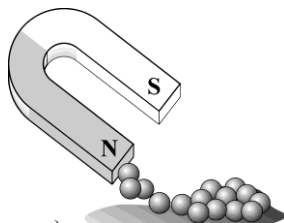


## 4. Elektromagnetsko polje

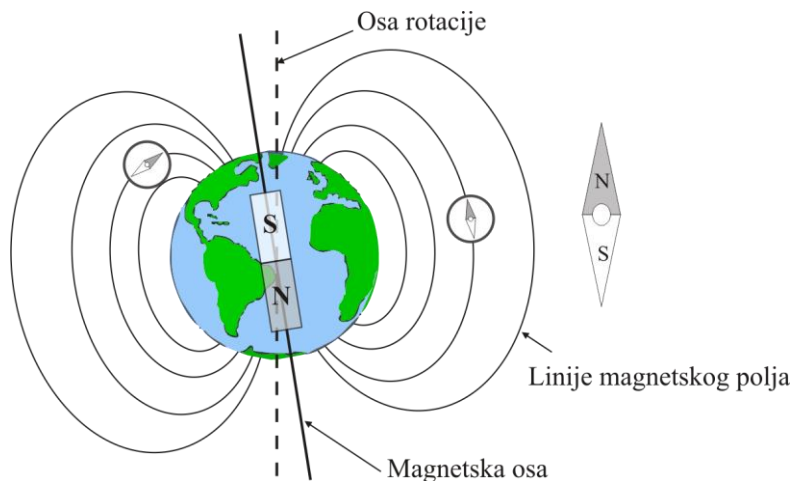
### 4.1. Prirodni magneti

Prve magnetske pojave su zapažene veoma davno, još u antičko doba. Uočeno je da neki materijali privlače sitne komade gvožđa. Materijali, koji prirodno poseduju magnetske osobine nazivaju se prirodni magneti ili stalni magneti. Osim toga uočeno da na magnetu postoje područja na kojima je magnetsko delovanje najizrazitije i ta područja su nazvana polovi magneti. Na magnetskim polovima je privlačna sila magneti najizraženija kao što je ilustrovano na slici 4.1.



4.1 Stalni (prirodni) magnet privlači gvozdene predmete.

Oko 120 godina pre nove ere u Kini je uočeno da se magnet u obliku šipke, obešen o konac, uvek postavlja u isti položaj. Jedan pol magneti je uvek bio okrenut ka severnom, a drugi ka južnom Zemljinom polu, pa su, zbog toga, polovi magneti i nazvani severni i južni. Na taj način je izmišljen kompas. Po dogovoru, severni pol prirodnog magneti je kraj magnetne šipke koji je usmeren ka severnom polu Zemlje. Suprotni kraj se naziva južni pol. Severni pol se označava sa N (od engleske reči North), a južni sa S (od engleske reči South).



4.2 Postavljanje igle od prirodnog magneti u pravcu sever-jug.

Takođe je primećeno da se istoimeni polovi dva stalna magneta odbijaju, a raznoimeni privlače, kao što je ilustrovano na slici 4.3.

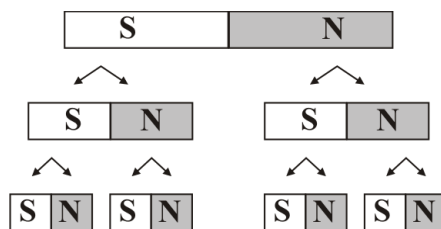


4.3 (a) Privlačenje stalnih magneta i (b) Odbijanje stalnih magneta.

Ako u neki deo prostora postavimo stalni magnet i ako na stalni magnet postoji sila koja ga tera da se pomera ili zakreće tada u tom delu prostora kažemo da postoji magnetsko polje. Na taj način je ustanovljeno da se Zemlja ponaša kao veliki magnet i da postoji magnetsko polje Zemlje. Dakle, dva magneta ne moraju biti u neposrednoj blizini da bi se osetila njihova interakcija. Dovoljno je da se jedan magnet nađe u magnetskom polju drugog magneta. To magnetsko polje može da postoji i na velikoj udaljenosti od magneta kao što je to slučaj sa magnetnom iglom kompasa i magnetskim poljem planete Zemlje.

Ako je sila na gvozdene predmete, koji se nađu u magnetskom polju, vremenski nepromenljiva tada kažemo da je magnetsko polje vremenski nepromenljivo ili vremenski konstantno. Gvozdeni predmeti koji dugo stoje u magnetskom polju počinju da primaju karakteristike stalnih magneta (počinju da se magnetišu). Na taj način i oni postaju izvori vremenski konstantnog magnetskog polja.

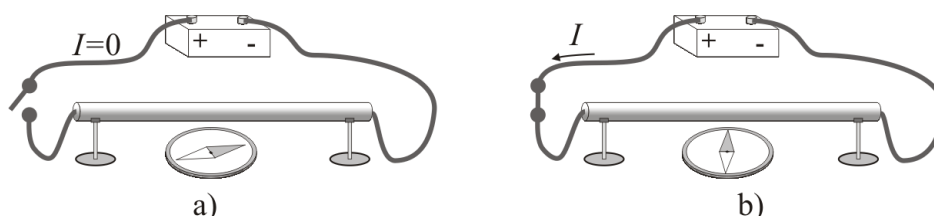
Primećeno je da se presecanjem magnetne šipke ne mogu razdvojiti polovi magneta, već svaki deo ponovo sadrži i severni i južni pol.



4.4 Presecanjem stalnog magneta ne mogu se razdvojiti polovi.

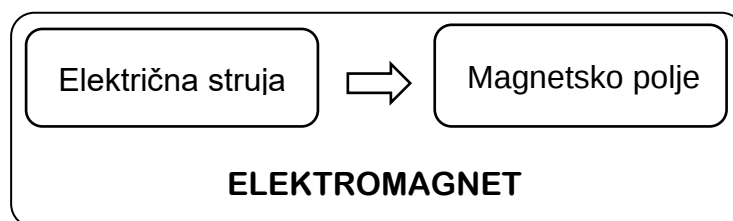
## 4.2. Elektromagneti

Sve do XVIII veka se smatralo da su električne i magnetske pojave dva potpuno nezavisna fenomena. Tek tada je primećeno da i provodnik sa električnom strujom može da prouzrokuje skretanje igle kompasa. Na slici 4.5. je ilustrovan eksperiment sa strujom i kompasom. Kada je prekidač otvoren i kada je jačina struje jednaka nuli igla kompasa zauzima položaj u pravcu Zemljinog magnetskog polja, slika 4.5.a. Kada se prekidač zatvori i uspostavi struja u provodniku, igla kompasa zauzme novi položaj, slika 4.5.b. Ako bi se prekidač ponovo otvorio igla kompasa bi se vratila u prethodni položaj. Kako magnetna igla kompasa reaguje samo na magnetsko polje došlo se do zaključka da električna struja u svojoj okolini stvara magnetsko polje. To je bio prvi znak o povezanosti električnog polja u provodniku i magnetskog polja u okolini provodnika. Ako je jačina struje u provodniku vremenski konstanta tada je i sila na iglu kompasa uvek jednaka, odnosno magnetsko polje je vremenski konstantno.



4.5 Eksperiment koji pokazuje da postoji veza između električne struje i magnetskog polja.

Ukoliko bi se povećala jačina struje u električnom kolu tada bi se igla kompasa brže zakretala. Nakon isključenja struje, igla kompasa bi ponovo zauzimala položaj pokazujući geografski pravac sever-jug. Zaključak je da električna struja stvara magnetsko polje. Naprave koje pomoću električne struje stvaraju magnetsko polje zovu se elektromagneti.



Prirodni izvori vremenski konstantnog magnetskog polja su stalni magneti i planeta Zemlja. Veštački izvori vremenski konstantnog magnetskog polja su vremenski konstante električne struje. U tabeli 4.1 su opisane prednosti i nedostaci prirodnih i veštačkih magneta.

#### 4.1 Poređenje stalnih magneta i elektromagneta.

|                | Prednosti                                                                                                                           | Nedostaci                                                                                                         |
|----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Stalni magneti | – Nije potrebna nikakva dodatna energija za stvaranje magnetske sile.                                                               | – Relativno su glomazni<br>– Tokom vremena mogu da izgube nešto od svog magnetizma.<br>– Ne mogu da se “isključe” |
| Elektromagneti | – Malih dimenzija.<br>– Ne gube magnetizam tokom vremena.<br>– Isključenjem električne struje prestaje i sila na gvozdene predmete. | – Potrebna električna energija za stvaranje magnetske sile.                                                       |

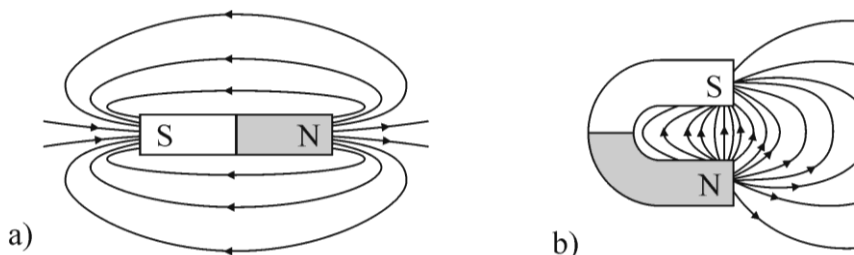
Najvažnija osobina je mogućnost isključenja magnetske sile. Ta osobina je iskorišćena na mnogo načina (podizanje automobila pomoću magnetske dizalice, električno zvonce, elektronske brave, itd.).



4.6 Primeri primene elektromagneta.

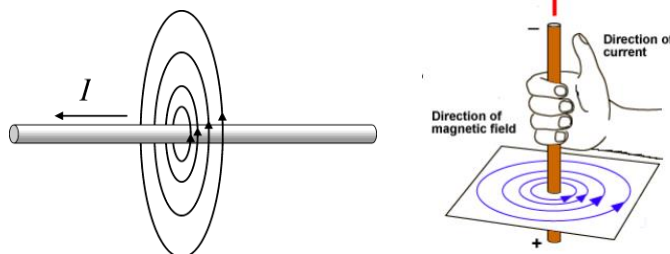
### 4.3. Linije magnetskog polja

Magnetsko polje se može grafički predstaviti linijama polja, kao što je to ilustrovano na slici 4.7. Kada se u magnetsko polje unese igla kompasa ona se postavlja u pravcu linije magnetskog polja. Severna igla kompasa je okrenuta ka južnom magnetskom polu. Za razliku od linija električnog polja koje imaju početak i kraj, linije magnetskog polja se zatvaraju same u sebe. Linije magnetskog polja izvan magneta su usmerene od severnog ka južnom polu magneta, dok su unutar magneta usmerene od južnog ka severnom polu. Linije magnetskog polja su najgušće u okolini polova magneta, jer je tu magnetsko polje najjače. Udaljavanjem od polova magneta magnetsko polje slabi, pa su i linije magnetskog polja ređe.



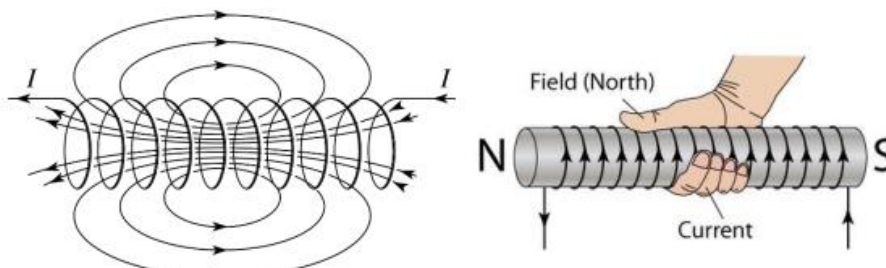
4.7. Linije magnetskog polja stalnog magneta u obliku a) šipke i b) potkovice.

U slučaju provodnika sa strujom, linije magnetskog polja su kružnice sa centrom na osi provodnika, kao što je ilustrovano na slici 4.8. Udaljavanjem od ose provodnika magnetsko polje slabi i linije magnetskog polja su ređe. Smer magnetskog polja je povezan sa smerom struje i najlakše se može odrediti pravilom desne ruke. Ako desnom rukom obuhvatimo provodnik, palac pokazuje smer struje, a prsti smer linija magnetskog polja.



4.8. Linije magnetskog polja u okolini pravog provodnika i određivanje smera pravilom desne ruke.

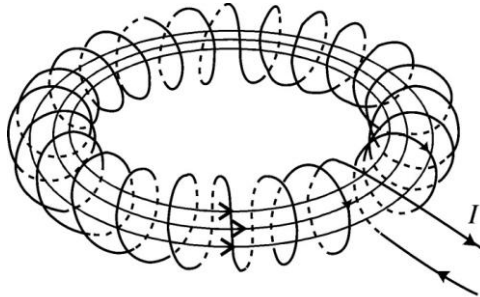
Magnetsko polje stvara i provodnik savijen u spiralu. Takva struktura se zove solenoid. Solenoid stvara magnetsko polje isto kao i stalni magnet u obliku šipke. Dakle, postoje mesta gde je magnetska sila izraženija odnosno postoje polovi. Linije magnetskog polja solenoida kao i način određivanja smera magnetskog polja pravilom desne ruke su prikazani na slici 4.9. Ako desnom rukom obuhvatimo namotaje tako da su nam prsti postavljeni u smeru struje u zavojcima, tada nam palac pokazuje smer linija magnetskog polja, odnosno pokazuje nam severni pol elektromagneta.



4.9. Linije magnetskog polja u okolini solenoida i način određivanja magnetskog polja pravilom desne ruke.

Između dva elektromagneta može da se primeti privlačna ili odbojna sila kao u slučaju dva stalna magneta. Isto važi i u slučaju jednog stalnog magneta i jednog elektromagneta.

Ako se spirala sa slike 4.9 savije u krug dobije se struktura koja se zove torus. Linije vektora magnetske indukcije su kružnice unutar torusa sa centrom u osi torusa. Ukoliko su zavojci namotani gusto jedan do drugoga, sve linije magnetskog polja su unutar torusa. Smer vektora magnetske indukcije je povezan sa smerom struje pravilom desne ruke kao u slučaju solenoida.



4.10 Linije magnetskog polja unutar torusnog namotaja.

#### 4.4. Vektor magnetske indukcije i vektor jačine magnetskog polja

Da bi magnetsko polje moglo da se izrazi kvantitativno bilo je potrebno uvesti fizičke veličine. Magnetsko polje se opisuje sa dve fizičke veličine:

- Vektor jačine magnetskog polja. Označava se sa  $\vec{H}$ , a jedinica je amper po metru (A/m). Jačina magnetskog polja zavisi od jačine struje, dimenzija i oblika žičane strukture.
- Vektor magnetske indukcije. Označava sa  $\vec{B}$ , a jedinica je tesla (T). Magnetska indukcija zavisi od jačine struje, dimenzija i oblika žičane strukture, i od sredine u kojoj je formirano magnetsko polje.

Odnos vektora magnetske indukcije i vektora jačine magnetskog polja u vakuumu je konstantan, pri čemu je

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

Konstanta  $\mu_0$  zove se permeabilnost vakuuma i iznosi je  $4\pi \cdot 10^{-7}$  H/m.

Odnos vektora magnetske indukcije i vektora jačine magnetskog polja u bilo kojoj drugoj sredini može da se izrazi na više načina. Jedan od načina da se opiše uticaj sredine na magnetsko polje je permeabilnost sredine. Obeležava se sa  $\mu$  a jedinica je henri po metru (H/m) kao i za permeabilnost vakuuma. U tom slučaju veza je

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H}. \quad (4.2)$$

Permeabilnost sredine može da se iskaže pomoću izraza

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

gde  $\mu_r$  predstavlja relativnu permeabilnost. To je neimenovan broj koji pokazuje koliko puta ja permeabilnosti materijala veća ili manja od permeabilnosti vakuuma.

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.

Dijamagnetski materijali smanjuju magnetsko polje u kome se nađu, ali uticaj tih materijala na magnetsko polje može da se zanemari. Relativna permeabilnost tih materijala je manja od jedinice, ali približno jednaka jedinici.

$$\text{dijamagnetski materijali: } \mu_r < 1 \quad (\mu_r \approx 1)$$

Paramagnetski materijali povećavaju magnetsko polje u kome se nađu. Međutim, kao i kod dijamagnetskih materijala, to povećanje polja se obično zanemaruje i smatra se da ni ovi materijali ne utiču bitno na magnetsko polje. Relativna permeabilnost paramagnetskih materijala, u koje spadaju, na primer, aluminijum, platina, kiseonik i vazduh, je malo veća od jedinice.

$$\text{paramagnetski materijali: } \mu_r > 1 \quad (\mu_r \approx 1)$$

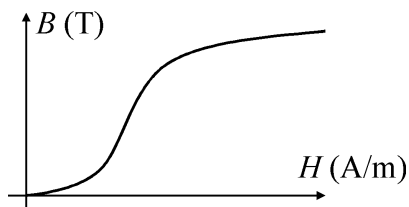
Magnetski efekti ovih materijala su veoma mali i veoma teško se detektuju. Za praktične primene može da se smatra da nemagnetski materijali svojim prisustvom ne menjaju magnetsko polje.

Magnetski materijali, kao što su na primer gvožđe, kobalt ili nikal su feromagnetski materijali. Ovi materijali svojim prisustvom jako menjaju magnetsko polje. Feromagnetski materijali povećavaju magnetsko polje u kome se nađu. Međutim, to povećanje je mnogo puta veće nego kod paramagnetskih materijala. Relativna permeabilnost feromagnetskih materijala, u koje spadaju gvožđe, kobalt ili nikal je mnogo puta veća od jedinice, i kreće se od 5000 do 200000.

$$\text{feromagnetski materijali: } \mu_r \gg 1$$

#### 4.5. Feromagnetski materijali

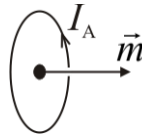
Potrebno je napomenuti da permeabilnost feromagnetskih materijala nije konstantna već zavisi od jačine magnetskog polja u kojem se materijal nalazi. To znači da je veza između magnetske indukcije i jačine magnetskog polja nelinearna, kao što je prikazano na slici 4.11. Samo jedan deo krive je približno lineran. U tehničkim primenama feromagnetskih materijala magnetsko polje  $H$  se podešava tako da jezgro radi u linearnom delu karakteristike.



4.11 Primer zavisnosti magnetske indukcije od jačine magnetskog polja feromagnetika, tzv. BH karakteristika.

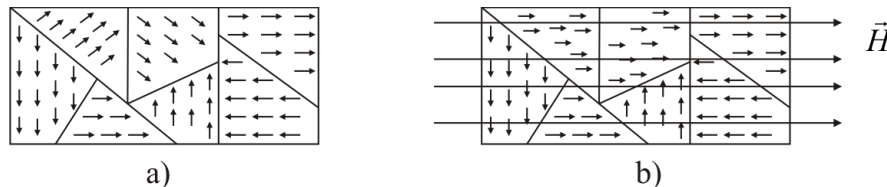
Nelinearnost je posledica strukture materije i načina reagovanja materije na magnetsko polje  $H$ . Unutar svakog materijala postoje atomi koji se sastoje od jezgra i elektrona koji kruže oko jezgra. To kruženje elektrona može da se zamisli kao da je u pitanju jedna mala žičana

kontura u kojoj postoji struja jačine  $I_A$  a zove se Amperova struja. Ta mala struja pravi malo magnetsko polje po pravilu desne ruke kao što je prikazano na slici 4.12.



4.12 Amperova struja i magnetni moment rotacije elektrona.

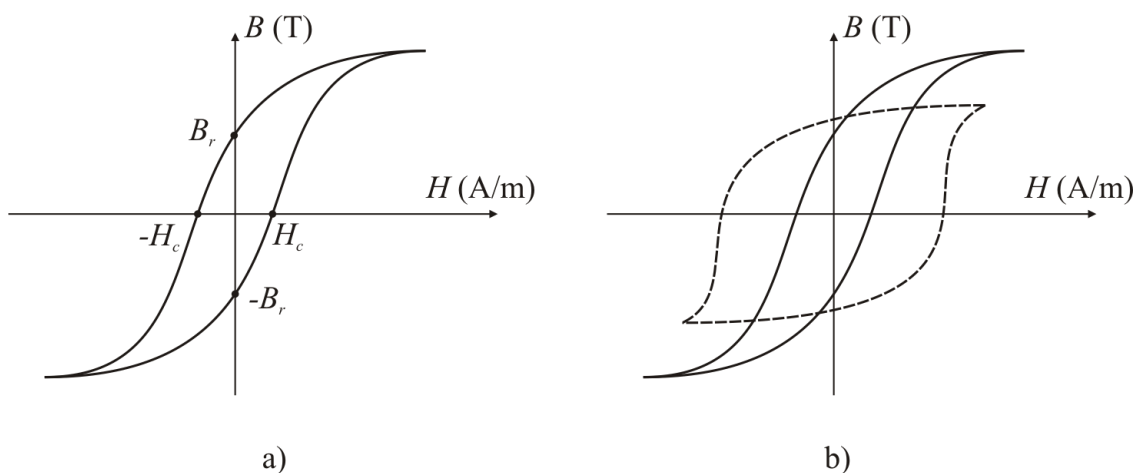
Kada se materijal izloži magnetskom polju jačine  $\vec{H}$ , tada dolazi do zakretanja orbita tako da se pravac i smer vektora  $\vec{m}$  poklopi sa vektorom  $\vec{H}$ . Na taj način, materijal doprinosi ukupnom magnetskom polju pojačavajući ga. Što je više zakrenutih orbita veći je i doprinos materijala povećanju magnetske indukcije. Drugim rečima veće je  $\mu$ . U feromagnetskim materijalima postoje takozvani domeni unutar kojih već postoji veliki broj orijentisanih orbita, kao što je prikazano na slici 4.13.a. U odsustvu stranog polja  $\vec{H}$  ukupan doprinos tih domena je nula, zato što je orijentacija domena takva da je zbir njihovih magnetskih momenata nula. Međutim kada se materijal izloži stranom magnetskom polju tada dolazi do zakretanja domena u pravcu tog polja, slika 4.13.b.



4.13 Orijentacija domena unutar feromagnetskog materijala: a) u odsustvu stranog magnetskog polja i b) u prisustvu stranog magnetskog polja.

Ako je jačina magnetskog polja  $\vec{H}$  malog intenziteta tada se zakreću samo domeni koji su već bili delimično u pravcu polja. Daljim povećanjem intenziteta vektora  $\vec{H}$  zakreću se i ostali domeni dajući pun doprinos magnetskom polju. Kada se svi domeni okrenu u pravcu polja kažemo da je došlo do zasićenja materijala. Nakon toga se vektor magnetske indukcije jako sporo povećava i praktično je konstantan, što može da se vidi po nagibu krive prikazane na slici 4.11.

Ako se nakon odvođenja materijala u zasićenje isključi struja u namotajima i magnetsko polje postane nula,  $H = 0$ , neće se svi domeni vratiti u početni položaj. Zaostali domeni će činiti zaostalu magnetsku indukciju, tzv. remanentnu indukciju,  $B_r$ . Od feromagneta je napravljen stalni magnet. Da bi se razmagnetisao, potrebno je ponovo uključiti struju ali u suprotnom smeru. Tako će se stvoriti magnetsko polje  $\vec{H}$  suprotnog smera. Vrednost magnetskog polja pri kome se poništava  $B_r$  zove se koercitivno polje i obeležava se sa  $H_c$ . Daljim povećanjem polja domeni se zakreću na drugu stranu sve više i više dok se jezgro ponovo ne dovede u zasićenje. Smanjenjem polja  $H$  smanjuje se i magnetska indukcija  $B$ . Pri  $H = 0$  jezgro ponovo ostaje namagnetisano zaostalom indukcijom  $B_r$  ali ovoga puta u drugom smeru u odnosu na prvo  $B_r$ . Ponovnim uključanjem struje, ponovo se uspostavlja magnetsko polje  $H$  u smeru kao na slici 4.13.b, i ceo ciklus se ponavlja. Ovaj ciklus je opisan tzv. histerezisnom petljom koja je prikazana na slici 4.14.a.



4.14 a) Histerezisna petlja feromagnetskog materijala i  
b) Histerezosne petlje magnetski mekog (puna linija) i magnetski tvrdog (isprekidana linija) materijala.

Postoje feromagnetski materijali koji imaju usku histerezisnu petlju odnosno malo koercitivno polje, petlja prikazana punom linijom na slici 4.14.b. Ti materijali su pogodni u primenama gde se često i brzo menja magnetsko polje (električni generatori, električni motori, transformatori). Zovu se meki feromagnetski materijali.

Materijali koji imaju veliko koercitivno polje zovu se tvrdi feromagnetski materijali a histerezisna kriva izgleda poput one koja je iscrtana isprekidanom linijom na slici 4.14.b. Veliko koercitivno polje znači da se teško mogu razmagnetisati. Potrebno je veliko  $H_c$  koje bi poništilo zaostalu indukciju  $B_r$ . Koriste se za magnetske memorije. Nekada ranije za magnetske trake, a danas za magnetske diskove.

## 4.6. Prav provodnik

Provodnici koji služe za prenos električne energije stvaraju u svojoj okolini magnetsko polje. Magnetsko polje u slučaju pravog provodnika se opisuje kružnicama sa centrom u osi provodnika, kao što je ilustrovano na slici 4.15.a. Na slici 4.15.b je prikazan poprečni presek provodnika. Simbolom kruga sa tačkom u sredini je predstavljen poprečni presek provodnika sa smerom struje iz papira. Smer magnetskog polja je određen pravilom desne ruke. Pravci vektora magnetske indukcije i vektora jačine magnetskog polja u proizvoljnoj tački u okolini provodnika su tangentni na kružnicu koja prolazi kroz tu tačku. Smer vektora  $\vec{B}$  i  $\vec{H}$  je u smeru linija magnetskog polja, kao što je ilustrovano na slici 4.15.b.

Intenzitete vektora jačine magnetskog polja  $H$  na rastojanju  $r$  od ose provodnika sa strujom jačine  $I$  se određuje primenom izraza:

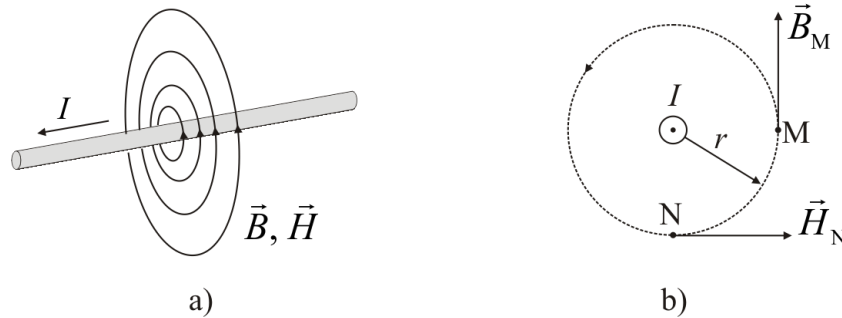
$$H = \frac{I}{2\pi r}. \quad (4.4)$$

Intenzitete vektora magnetske indukcije  $B$  na rastojanju  $r$  od ose provodnika sa strujom jačine  $I$  se određuje primenom izraza:

$$B = \mu_0 \mu_r H = \mu_0 \mu_r \frac{I}{2\pi r}. \quad (4.5)$$

Sredina koja okružuje provodnike je najčešće vazduh, kao što je to slučaj kod nadzemnih vodova za prenos električne energije, tzv. dalekovodi. Vazduh spada u nemagnetske materijale, tako da je u izrazu (4.5) potrebno uvrstiti  $\mu_r = 1$ . Ukoliko je sredina vazduh izraz (4.5) se svodi na izraz:

$$B = \mu_0 H = \mu_0 \frac{I}{2\pi r}. \quad (4.6)$$



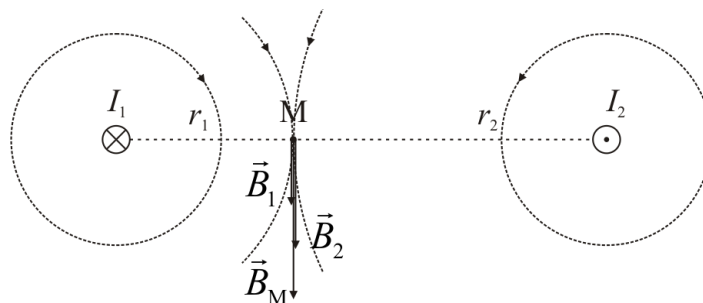
4.15 Vektor magnetske indukcije u proizvoljnoj tački na rastojanju  $r$  od ose provodnika.

#### Primer 4.1

Nacrtati pravac i smer vektora magnetske indukcije u tački M koji stvaraju svaki od provodnika prikazanih na slici. Smer struje u levom provodniku od vas dok je u desnom provodniku struja usmerena prema vama. Izračunati intenzitet rezultantnog vektora magnetske indukcije ako je:  $I_1 = 5 \text{ A}$ ,  $I_2 = 20 \text{ A}$ ,  $r_1 = 10 \text{ cm}$ ,  $r_2 = 20 \text{ cm}$ ,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$ .



Rešenje. Najpre ćemo izračunati magnetsko polje levog provodnika. Smer magnetskog polja levog provodnika je određen pravilom desne ruke. Prst je usmeren u papir pa su prsti u smeru kazaljke na satu. Linije magnetskog polja su kružnice sa centrom u levom provodniku. Vektor magnetske indukcije  $\vec{B}_1$  je tangentan na tu kružnicu a počinje u tački M. Pravac tog vektora je normalan na duž koju obrazuju levi provodnik i tačka M, smer je na dole dok je intenzitet  $B_1 = (\mu_0 \cdot I_1) / (2 \cdot \pi \cdot r_1) = 10 \mu\text{T}$ .

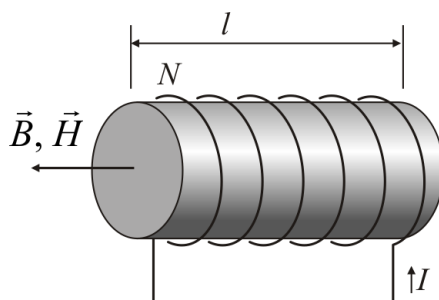


Na isti način se određuje i vektor magnetske indukcije u tački M koji stvara desni provodnik sa strujom  $I_2$  usmerenom iz papira. Pravilom desne ruke dolazimo do zaključka da je magnetsko polje desnog provodnika u smeru suprotnom od smera kazaljke na satu. Vektor magnetske indukcije  $\vec{B}_2$  je tangentan na tu kružnicu a počinje u tački M. Pravac tog vektora je normalan na duž koju obrazuju desni provodnik i tačka M, smer je na dole, dok je intenzitet  $B_2 = (\mu_0 \cdot I_2) / (2 \cdot \pi \cdot r_2) = 20 \mu\text{T}$ .

Rezultantni vektor se nalazi vektorskim sabiranjem, odnosno  $\vec{B}_M = \vec{B}_1 + \vec{B}_2$ . Kako su oba vektora u istom smeru to znači i da je rezultantni vektor u istom smeru. Njegov intenzitet je  $B_M = 30 \mu\text{T}$ . ■

#### 4.7. Solenoid

Solenoid stvara magnetsko polje kako unutar tako i van solenoida. Linije magnetskog polja solenoida su prikazane ranije na slici 4.9. Određivanje inenziteta magnetskog polja u proizvoljnoj tački u okolini solenoida je veoma teško i izlazi iz okvira ovog udžbenika. Ovde ćemo razmotriti samo određivanje intenziteta vektora jačine magnetskog polja i magnetske indukcije unutar solenoida pod pretpostavkom da je polje unutar solenoida homogeno. Pravac i smer vektora je određen pravilom desne ruke, videti sliku 4.9.



4.16 Vektor magnetske indukcije unutar solenoida.

Intenzitet vektora jačine magnetskog polja unutar solenoida dužine  $l$  i sa  $N$  zavoja u kojima postoji struja jačine  $I$  se određuje pomoću izraza:

$$H = \frac{NI}{l}. \quad (4.7)$$

Ukoliko se kao jezgro solenoida koriste nemagnetski materijali ( $\mu_r \approx 1$ ) kažemo da je u pitanju vazdušno jezgro pa je za određivanje intenziteta vektora magnetske indukcije unutar solenoida dovoljno da koristimo permeabilnost vakuuma  $\mu_0$ , prema izrazu:

$$B = \mu_0 H = \mu_0 \frac{NI}{l} \quad (4.8)$$

Ukoliko se kao jezgro kalema koriste magnetski materijali ( $\mu_r \gg 1$ ) tada se vektor magnetske indukcije u solenoidu sa feromagnetskim jezgrom se određuje pomoću izraza

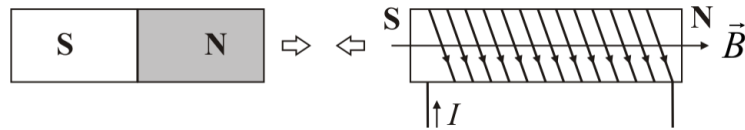
$$B = \mu_0 \mu_r H = \mu_0 \mu_r \frac{NI}{l}. \quad (4.9)$$

#### Primer 4.2

Nacrtati smer vektora magnetske indukcije solenoida, označiti polove i odgovoriti da li će sila između stalnog magneta i elektromagneta biti privlačna ili odbojna.



Rešenje. Pravilom desne ruke određujemo da je smer magnetske indukcije na desno. To znači da je levi kraj solenoida južni magnetski pol, a desni kraj severni magnetski pol. Elektromagnet i stalni magnet se privlače.



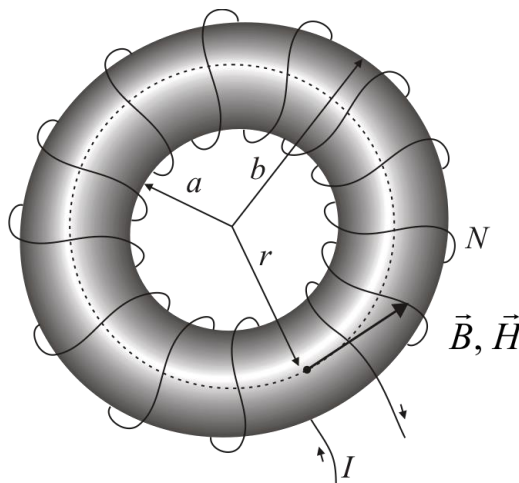
Kada bi se promenio smer struje u solenoidu tada bi sila bila odbojna. ■

#### 4.8. Torus

Spiralni namotaj žičanog provodnika u obliku torusa je postavljen na jezgro u obliku prstena. Jezgro može da bude od nemagnetskog ili magnetskog materijala. Magnetsko polje generalno posmatrano može da postoji unutar i van torusa. Međutim, ukoliko je jezgro od nemagnetskog materijala a zavojci žice gusto motani tada magnetsko polje postoji samo unutar torusa, kao što je ilustrovano ranije na slici 4.10. Ako je namotaj postavljen na jezgro od magnetskog materijala tada zavojci i ne moraju biti gusto motani. Jezgro kanališe magnetsko polje tako da postoji samo unutar jezgra. Ovo je velika prednost torusa u odnosu na solenoid kod koga magnetsko polje postoji i izvan jezgra.

Intenzitet vektora jačine magnetskog polja unutar solenoida poluprečnika srednje linije  $r$ , sa  $N$  zavoja u kojima postoji struja jačine  $I$  se određuje pomoću izraza:

$$H = \frac{NI}{2\pi r}. \quad (4.10)$$



4.17 Vektor magnetske indukcije unutar torusa.

Ukoliko se kao jezgro torusa koriste nemagnetski materijali ( $\mu_r \approx 1$ ) kažemo da je u pitanju vazdušno jezgro pa je za određivanje intenziteta vektora magnetske indukcije unutar torusa dovoljno da koristimo permeabilnost vakuuma  $\mu_0$ , prema izrazu:

$$B = \mu_0 H = \mu_0 \frac{NI}{2\pi r}. \quad (4.11)$$

Ukoliko se kao jezgro kalema koriste magnetski materijali ( $\mu_r \gg 1$ ) tada se vektor magnetske indukcije u solenoidu sa feromagnetskim jezgrom se određuje pomoću izraza

$$B = \mu_0 \mu_r H = \mu_0 \mu_r \frac{NI}{2\pi r} \quad (4.12)$$

Kod torusa se u praksi definišu unutrašnji,  $a$ , i spoljašnji,  $b$ , poluprečnik. Unutar torusa magnetsko polje se predstavlja kružnicama koji imaju poluprečnike  $r$  između  $a$  i  $b$ . Magnetsko polje je jače kod kružnica sa manjim poluprečnikom. Međutim, radi lakšeg računanja u praksi se magnetsko polje određuje samo duž srednje linije,  $r = r_{sr}$ . Ako su poznati unutrašnji i spoljašnji poluprečnici tada se poluprečnik srednje linije određuje kao srednja vrednost,  $r_{sr} = (a + b) / 2$ . Ponekad se u zadacima zadaje dužina srednje linije koja je povezana sa srednjim poluprečnikom preko izraza za obim kruga,  $l_{sr} = 2\pi r_{sr}$ . Prema tome za vektor magnetske indukcije unutar torusa se uzima vrednost duž srednje linije koji se određuje kao

$$B = \mu_0 \mu_r \frac{NI}{2\pi r_{sr}} = \mu_0 \mu_r \frac{NI}{l_{sr}} \quad (4.13)$$

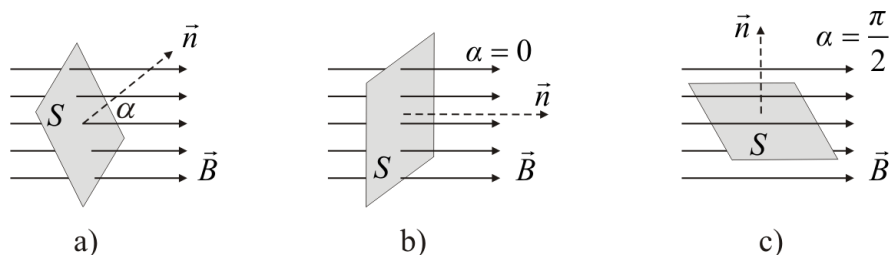
#### 4.9. Magnetski fluks

Magnetski fluks ima veliki značaj u tehnici, posebno pri projektovanju električnih mašina. Zamislimo ravnu površinu  $S$  u homogenom magnetskom polju indukcije  $\vec{B}$  kao što je prikazano na slici 4.18.a. Ako zamislimo normalu na tu površinu i jedinični vektor  $\vec{n}$  duž te normale, tada možemo da definišemo vektor površine  $\vec{S}$ , kao  $S \cdot \vec{n}$ . Magnetski fluks  $\Phi$  u homogenom magnetskom polju indukcije  $\vec{B}$  kroz ravnu površinu  $S$  određuje se kao

$$\Phi = \vec{B} \cdot \vec{S} = BS \cos \alpha \quad (4.14)$$

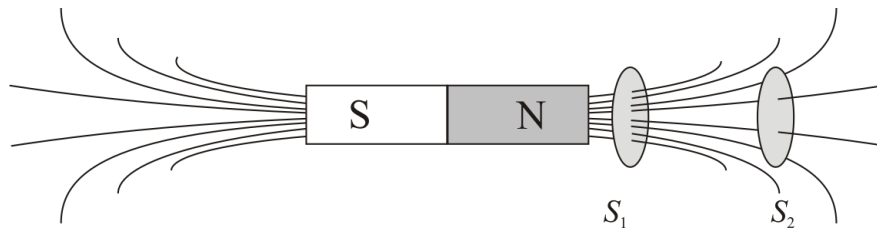
gde je  $\alpha$  ugao između vektora magnetske indukcije i normale  $\vec{n}$  na površ  $S$ . Jedinica za magnetski fluks je veber, (Wb). Vidimo da fluks zavisi od intenziteta magnetske indukcije, površine kroz koju se taj fluks posmatra ali i od ugla koji normala površine zaklapa sa pravcem magnetske indukcije.

Kada je vektor magnetske indukcije normalan na površinu, ( $\alpha = 0$ ), tada se izraz svodi na  $\Phi = BS$ , slika 4.18.b. Kada je vektor magnetske indukcije tangentan na površinu, ( $\alpha = \pi / 2$ ), tada je fluks jednak nuli, slika 4.18.c.

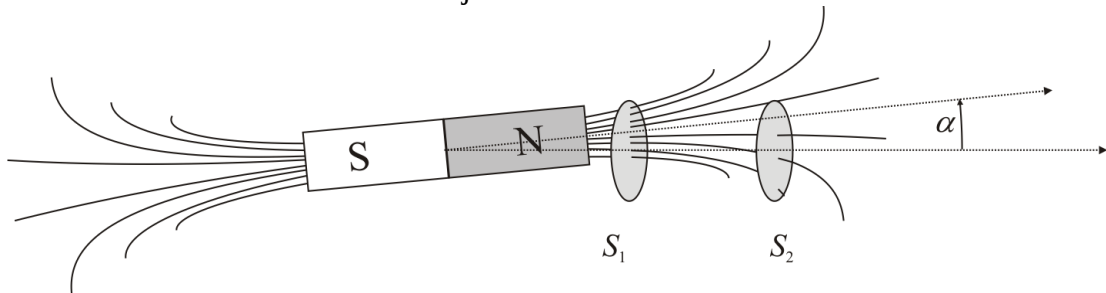


4.18 Primeri fluksa vektora  $B$  kroz površ  $S$  za tri različita položaja površine.

Na slici 4.19 je prikazano nehomogeno magnetsko polje koje stvara solenoid ili stalni magnet u obliku šipke i dve površine  $S_1$  i  $S_2$  postavljene kao na slici. Ugao između normala tih površina i vektor magnetske indukcije je nula. Ako su površine jednake,  $S_1 = S_2 = S$ , tada je  $\Phi_1 = B_1 S$  i  $\Phi_2 = B_2 S$ . Zbog manjeg magnetskog polja koje postoji u delu prostora gde je površina  $S_2$ , manji je i fluks kroz tu površinu, tako da je  $\Phi_2 < \Phi_1$ .

4.19 Primeri fluksa vektora  $B$  kroz dve iste površi  $S$  u nehomogenom polju.

Ukoliko bi se magnet zarotirao oko svoje ose za neki mali ugao  $\alpha$ , kao što je prikazano na slici 4.20 tada bi oba fluksa bila manja.

4.20 Primeri fluksa vektora  $B$  pod uglom  $\alpha$  kroz dve iste površi  $S$  u nehomogenom polju.

Fluksevi kroz  $S_1$  i  $S_2$  postavljeni pod uglom  $\alpha$  imaju sledeće vrednosti  $\Phi_1 = B_1 S \cos \alpha$  i  $\Phi_2 = B_2 S \cos \alpha$ .

#### Primer 4.3

U homogenom magnetskom polju indukcije  $B$  postavljena je ravan površine  $S$ . Ravan kroz koju se određuje fluks vektora magnetske indukcije je nagnuta u odnosu na linije magnetskog polja tako da vektor normale na površinu  $\vec{n}$  zaklapa sa vektorom  $\vec{B}$  ugao  $\pi/3$ . Pri tome fluks iznosi 6 mWb. Koliki bi bio fluks da je ravan normalna na linije magnetskog polja?

Rešenje. U prvom položaju ravni  $\Phi_1 = B \cdot S \cdot \cos \alpha_1$ . U drugom položaju ravni  $\Phi_2 = B \cdot S \cdot \cos \alpha_2$ . U oba položaja intenzitet vektora magnetske indukcije je isti zato što je ravan u homogenom magnetskom polju. Poređenjem flukseva sledi da je  $\Phi_2/\Phi_1 = \cos \alpha_2/\cos \alpha_1$ . Kako je  $\alpha_1 = \pi/3$  a  $\alpha_2 = 0$ , sledi da je  $\Phi_2/\Phi_1 = 2$ . To znači da je  $\Phi_2 = 2\Phi_1$ . Fluks bi se povećao dva puta. ■

#### Primer 4.4

Izračunati fluks vektora magnetske indukcije kroz poprečni presek solenoida kružnog poprečnog preseka dužine 5 cm i debljine 2 cm, sa 100 zavoja žice. Solenoid ima jezgro od gvožđa relativne permitivnosti 2000. U namotajima je uspostavljena struja jačine 100 mA.

Rešenje. Linije magnetskog polja unutar solenoida su paralelne osi solenoida. Osim toga magnetsko polje unutar solenoida je homogeno. Kako je potrebno odrediti fluks u poprečnom preseku to znači da su linije magnetskog polja upravne na površ  $S$ . Prema tome izraz za fluks je se  $\Phi = B \cdot S \cdot \cos 0 = B \cdot S$ . Intenzitet vektora magnetske indukcije je dat izrazom (4.9) tako da je  $B = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 2000 \cdot 100 \cdot 0,1 / 0,05 = 0,5 \text{ T}$ . Kako je poprečni presek solenoida krug, površinu možemo odrediti na osnovu debljine pomoću izraza  $S = r^2 \cdot \pi = (d/2)^2 \cdot \pi$ , gde je  $d$  debljina jezgra (solenoida). Brojna vrednost površine je  $3,14 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ , do j je brojna vrednost fluksa  $1,57 \cdot 10^{-4} \text{ Wb}$  ili  $157 \mu\text{Wb}$ . ■

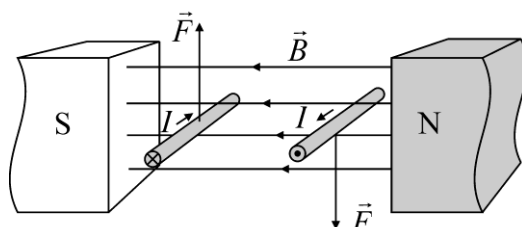
#### 4.10. Magnetska sila

Već smo pokazali da se elektromagneti ponašaju kao i stalni magneti i da mogu da se međusobno privlače i odbijaju. Smer magnetskog polja zavisi od smera struje. To znači i da magnetska sila zavisi od smera struje.

U slučaju elektrostatičke sile, jedan izvor deluje na drugi preko svog električnog polja. U slučaju magnetizma, jedan provodnik sa strujom stvara magnetsko polje, a drugi provodnik sa strujom se našao u tom magnetskom polju. Ako pretpostavimo da se provodnik sa strujom  $I$  našao u magnetskom polju indukcije  $\vec{B}$ , tada magnetsko polje deluje na provodnik silom  $\vec{F}$ . Pod dejstvom te sile provodnik počinje da se kreće. Magnetsko polje može da potiče od nekog drugog provodnika sa strujom ili od stalnog magneta. Na slici 4.21 je ilustrovano dejstvo magnetskih sila na dva provodnika sa strujama suprotnih smerova. Smer magnetske sile zavisi od smera magnetskog polja i smera struje u provodniku. Sila se može odrediti kao

$$\vec{F} = I \vec{l} \times \vec{B}, \quad (4.15)$$

pri čemu je  $I$  jačina struje,  $l$  dužina provodnika, vektor  $\vec{l}$  u pracu provodnika i smeru struje, a  $\vec{B}$  vektor magnetske indukcije stalnog magneta.



4.21 Magnetska sila na provodnike sa strujom.

Ukoliko imamo samo dva pravolinijska provodnika postavljena paralelno sa strujama  $I_1$  i  $I_2$ , istog smera, tada je njihova međusobna sila privlačna. U slučaju da su struje suprotnih smerova, sila je odbojna. Na slikama 4.22.a i 4.22.b je prikazan poprečni presek dva pravolinijska provodnika sa strujama istog i suprotnog smera. Provodnik sa strujom  $I_1$  stvara magnetsko polje  $\vec{B}_1$  koje, na provodnik sa strujom  $I_2$ , deluje silom  $\vec{F}_{12}$  prema izrazu

$$\vec{F}_{12} = I_2 \vec{l}_2 \times \vec{B}_1. \quad (4.16)$$

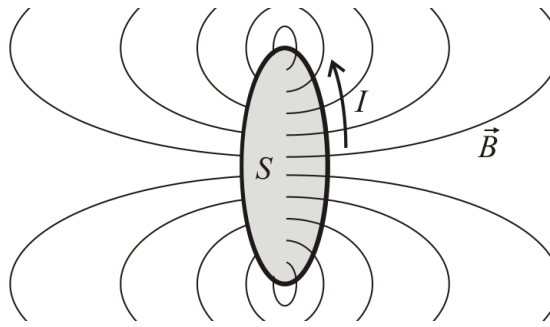
Ako su struje istog smera, sila je privlačna. Ako su struje suprotnog smera, sila je odbojna. Sila kojom prvi provodnik deluje na drugi je ista kao sila kojom drugi provodnik deluje na prvi.



4.22 Magnetska sila između dva pravolinijska provodnika u slučaju struja a) istog i b) suprotnog smera.

#### 4.11. Induktivnost

Videli smo da svaka žičana struktura sa strujom stvara u svojoj okolini magnetsko polje. Na slici 4.23 je prikazan prsten sa strujom jačine  $I$  koji stvara magnetsko polje indukcije  $B$ .



4.23 Magnetsko polje prstena i magnetski fluks kroz površinu koja se oslanja na prsten.

Linije magnetskog polja prolaze kroz površinu  $S$  koja se oslanja na samu konturu koja je i izazvala magnetsko polje. Fluks koji magnetsko polje žičane konture pravi kroz sopstvenu površinu zove se sopstveni fluks,  $\Phi = BS$ . Kako fluks zavisi od magnetske indukcije, a magnetska indukcija zavisi od struje, očigledno je da postoji veza između sopstvenog fluksa i struje. Povećanjem struje povećava se i fluks. Sopstveni magnetski fluks  $\Phi$  je linearno srazmeran jačini struje  $I$  u konturi i može da se napiše u obliku

$$\Phi = LI, \quad (4.17)$$

odakle sledi da se induktivnost provodne strukture određuje iz izraza

$$L = \frac{\Phi}{I}. \quad (4.18)$$

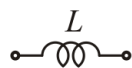
Jedinica za induktivnost je henri, (H). Na slici 4.23 je prikazan jedan kružni zavojak u vazduhu. To može biti i žičana struktura sa više zavoja koja je postavljena na neko jezgro. Videćemo u nastavku da induktivnost zavisi od geometrije provodnika, broja zavoja i permeabilnosti materijala upotrebljenog kao jezgro.

U odeljku 4.5 je objašnjeno nelinearno ponašanje feromagnetskog materijala. Videli smo da permeabilnost zavisi od jačine magnetskog polja a samim tim i od jačine struje. To znači da i induktivnost ponekad zavisi od jačine struje ali to izlazi iz okvira ovog udžbenika. Ovde ćemo smatrati da su feromagnetski materijali u linearnom delu BH karakteristike koja je prikazana na slici 4.11. Zbog toga ćemo smatrati da induktivnost ne zavisi od jačine struje.

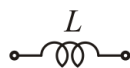
U nastavku ćemo pokazati kako se određuje induktivnost kalema u obliku solenoida i torusa.

## 4.12. Kalem

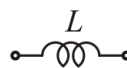
Električna komponenta koja je dizajnirana da ima unapred zadatu induktivnost se naziva kalem ili induktor. To su najčešće namotaji žice u formi solenoida ili torusa na nekom jezgrom. Jezgra mogu biti raznih oblika i dimenzija i od različitog materijala. Grafički simbol za kalem sa jezgrom od nemagnetskog materijala je prikazan na slici 4.24.a, dok je simbol za kalem sa feromagnetskim jezgrom prikazan na slici 4.24.b. U poslednjih 20 godina u velikoj su upotrebi feritna jezgra. To su jezgra od materijala koji imaju veliku permeabilnost ali veoma malu provodnost. To su keramička jezgra. Simbol je prikazan na slici 4.24.c. Danas zamenjuju feromagnetska jezgra u elektronskim uređajima. Mnogo su manjih dimenzija i mnogo su lakši od feromagnetskih jezgara. Najočigledniji primer su punjači za mobilni telefon. Nekada su bili veći i teži nego što su to danas. Razlog za to su, upravo, feritna jezgra kalemova.



b)



b)



c)

4.24 Grafički simbol klena sa a) vazdušnim jezgrom, b) feromagnetskim jezgrom i c) feritnim jezgrom.

Induktivnost solenoida postavljenog na jezgro permeabilnosti  $\mu$ , površine poprečnog preseka  $S$ , i dužine  $l$  na koje je postavljen namotaj sa  $N$  zavojaka se određuje primenom izraza:

$$L = \mu \frac{N^2 S}{l} = \mu_0 \mu_r \frac{N^2 S}{l} \quad (4.19)$$

Induktivnost torusnog namotaja postavljenog na jezgro permeabilnosti  $\mu$ , površine poprečnog preseka  $S$ , i srednjeg poluprečnika  $r$  na koje je postavljen namotaj sa  $N$  zavojaka se određuje primenom izraza:

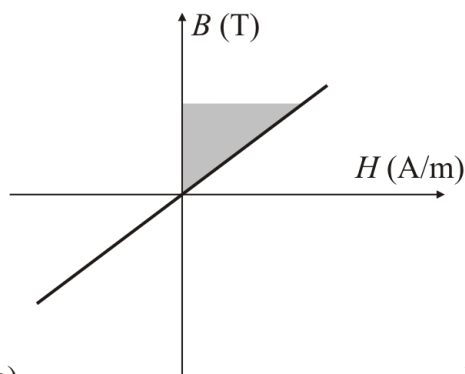
$$L = \mu \frac{N^2 S}{2\pi r_{sr}} = \mu_0 \mu_r \frac{N^2 S}{2\pi r_{sr}} \quad (4.20)$$

### 4.13. Energija magnetskog polja

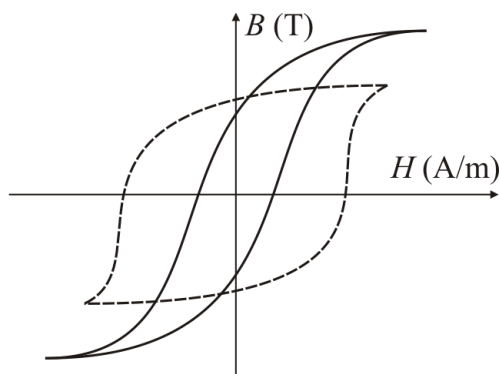
Kada se kalem priključi na električni izvor tada se uspostavi struja kroz kalem i magnetsko polje u okolini kalema. Za stvaranje tog magnetskog polja potrebna je energija. Električna energija izvora se pretvorila u magnetsku energiju. Ukoliko poznajemo jačinu struje  $I$ , i induktivnost kalema  $L$ , možemo da izračunamo i magnetsku energiju sadržanu u magnetskom polju kalema. Energija se određuje pomoću izraza:

$$W_m = \frac{1}{2} L \cdot I^2. \quad (4.21)$$

Prilikom isključenja električnog izvora magnetska energija kalema se vraća u električnu, odnosno kalem varača energiju izvoru. Kalemovi sa vazdušnim jezgrom ili kalemovi sa jezgrom od materijala koji imaju linearanu zavisnost vektora  $B$  i  $H$  u potpunosti vraćaju svu energiju srazmernu osenčenoj površini na slici 4.25. Kalemovi koji imaju jezgra od feromagnetskih materijala po pravilu vraćaju samo deo energije. Ostatak energije je potrošen na zakretanje domena prikazanih na slici 4.13. Ta energija je izgubljena. Što je šira histerezijsna petlja veći su i gubici. Ti gubici se zovu histerezijsni gubici.



a)

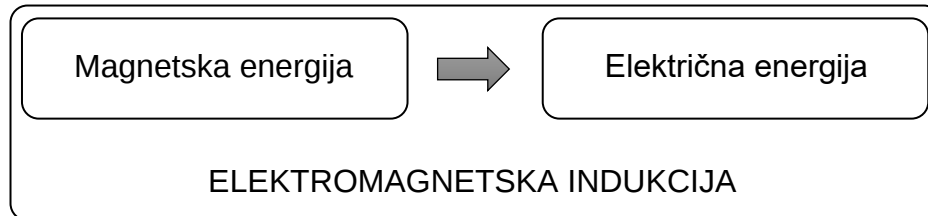


b)

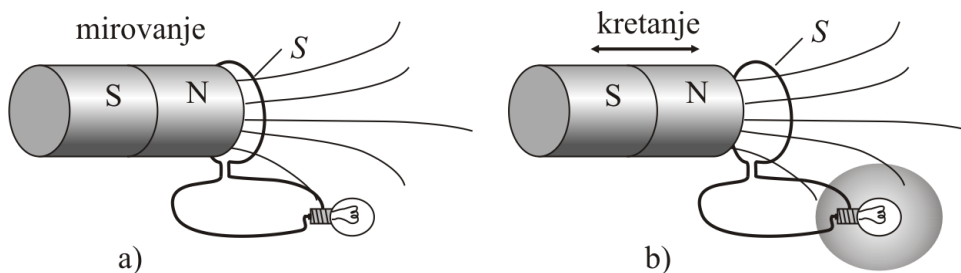
4.25 a) Energija kalema sa vazdušnim jezgrom. b) Gubici energije kalema sa feromagnetskim jezgrom.

#### 4.14. Elektromagnetska indukcija

U prethodnom delu smo videli da vremenski konstantna električna struja može da stvori vremenski konstantno magnetsko polje. Dakle električna energija se pretvorila u magnetsku. Ovde ćemo da pokažemo da je moguće i obrnuto. Da se magnetska energija pretvori u električnu.



Eksperimentima je utvrđeno da pomeranje stalnog magneta u blizini žičane konture stvara električnu struju u toj žici. Dokaz za postojanje te struje je sijalica koja svetli bez prisustva baterije, kao što je ilustrovano na slici 4.26. Kasnije je utvrđeno da se usled promene magnetskog fluksa kroz poprečni presek žičane konture u žičanoj 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.



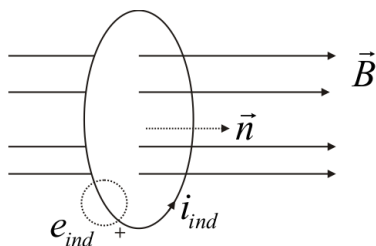
4.26 a) Mirovanje magneta ne stvara struju. b) Kretanje magneta stvara električnu struju u žičanoj konturi.

Svojim eksperimentima je Faradej utvrdio da je veličina elektromotorne sile, indukovane u zatvorenoj konturi, direktno proporcionalna promeni fluksa kroz konturu. Vrednost indukovane elektromotorne sile,  $e_{ind}$ , u jednom zavojku je direktno proporcionalna brzini promene magnetskog fluksa kroz zavojak. Faradajev zakon elektromagnetske indukcije je opisan izrazom

$$e_{ind} = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (4.22)$$

Jedinica za indukovanu ems je volt, (V). Znak “-” pokazuje da se indukovana elektromotorna sila suprotstavlja promeni fluksa. Ako nema promene fluksa onda neće biti ni indukovane elektromotorne sile.

Referentni smer indukovane ems u konturi je povezan pravilom desne ruke sa smerom jediničnog vektora normale na površinu konture,  $\vec{n}$ , kao što je prikazano na slici 4.27. Na osnovu smera vektora  $\vec{B}$  i smera vektora  $\vec{n}$  vidi se da je promena fluksa,  $\Delta\Phi$ , pozitivna ako je  $\Delta B$  pozitivno, tj. ako vektor  $\vec{B}$  raste. To dalje znači da je, za referentni smer  $e_{ind}$  prikazan na slici 4.27, njegova brojna vrednost negativna kada vektor  $\vec{B}$  raste. Ako je  $e_{ind}$  negativno onda je i pravi smer struje  $i_{ind}$  u konturi na slici 4.27 suprotan od referentnog. Takav pravi smer struje bi stvarao magnetsko polje u levo želeći da smanji rast vektora  $\vec{B}$ .



4.27 Referentni smer indukovane ems i referentni smer struje uz definiciju Faradejevog zakona.

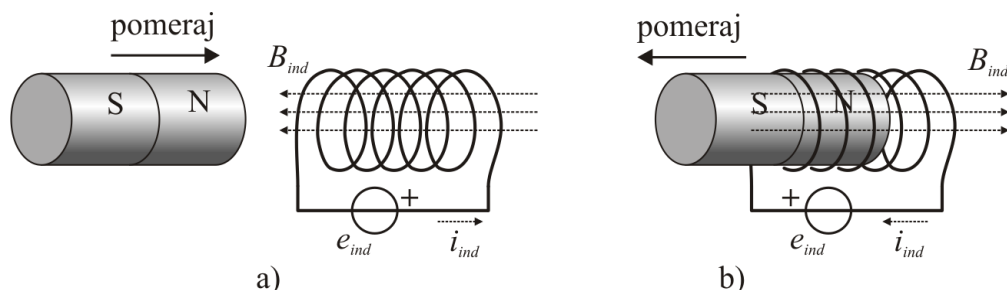
Obrnuto, ako bi magnetsko polje počelo da opada tada bi  $\Delta B$  bilo negativno pa bi i  $\Delta \Phi$  bilo negativno. U tom slučaju bi brojna vrednost  $e_{ind}$  bila pozitivna a smer struje  $i_{ind}$  bio isti kao i referentni. Takav smer indukovane struje bi stvarao magnetsko polje u desno želeći da smanji opadanje vektora  $\vec{B}$ .

To znači da se kontura uvek protivi promeni magnetskog polja koje prolazi kroz konturu, što je suština znaka „-“ u izrazu (4.22).

Ako se namotaj sastoji od  $N$  zavoja, tada će indukovana elektromotorna sila u celom namotaju biti  $N$  puta veća od one indukovane u jednom zavojku

$$e_{ind} = -N \frac{d\Phi}{dt}. \quad (4.23)$$

Posmatrajmo namotaj i stalni magnet koji su prikazani na slici 4.28. Elektromotorna sila se indukuje u namotaju kada se stalni magnet pomera levo ili desno. Kada se magnet pomera na desno u namotaju se indukuje ems  $e_{ind}$  koja stvara električnu struju  $i_{ind}$  takvog smera da je magnetsko polje  $B_{ind}$  suprotnog smera od magnetskog polja stalnog magneta, želeći da ga poništi. Kada se magnet pomera na levo u namotaju se indukuje struja koja bi želela da zadrži magnetsko polje stalnog magneta sprečavajući magnet da izađe.

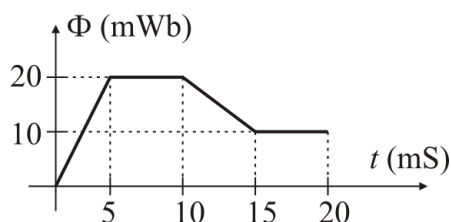


4.28 Pravi smer indukovane elektromotrne sile u slučaju kada se: a) fluks povećava i b) fluks smanjuje.

Umesto da se kreće magnet, potpuno isti efekat bi se dobio i ako bi se pomerao namotaj. Što je brže kretanje magneta ili namotaja, biće veća elektromotorna sila. Ako nema kretanja magneta i namotaja, elektromotorna sila jednaka je nuli.

### Primer 4.5

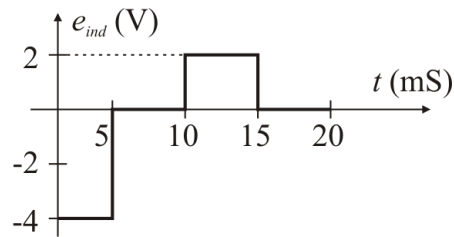
Na slici je prikazana promena fluksa kroz nepomičnu konturu prikazanu na slici 4.27. Odrediti indukovanu elektromotornu silu u konturi i prikazati je na vremenskom dijagramu.



Rešenje. Indukovana ems se određuje prema izrazu (4.22). Međutim ponekad se mogu koristiti i konačni priraštaji tako da se ems može odrediti kao

$$e_{ind} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

U intervalu vremena od 0 do 5 mS došlo je do porasta fluksa sa 0 na 20 mWb. To znači da je promena fluksa pozitivna,  $\Delta\Phi = 20 \text{ mWb}$ , pa je u tom intervalu vremena  $e_{ind} = -4\text{V}$ . U intervalu vremena od 5 do 10 mS nema promene fluksa pa je u tom intervalu vremena  $e_{ind} = 0$ . U intervalu vremena od 10 do 15 mS došlo je do opadanja fluksa sa 20 na 10 mWb. To znači da je promena fluksa negativna,  $\Delta\Phi = -10 \text{ mWb}$ , pa je u tom intervalu vremena  $e_{ind} = 2\text{V}$ . na kraju je u intervalu vremena od 15 do 20 mS fluks konstantan tako da je u tom intervalu vremena  $e_{ind} = 0$ . Vremenski dijagram indukovane ems je prikazan na sledećem grafiku.

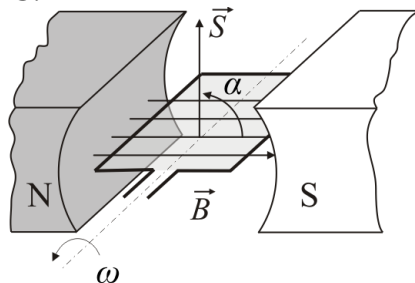


#### 4.15. Princip rada generatora

Električni generator je uređaj koji vrši konverziju mehaničke energije u električnu energiju uz neophodno prisustvo magnetskog polja. Na primer, izvor mehaničke energije može biti turbina koju pokreće voda, vodena para ili vetar. Svaki generator ima 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 na statoru ili na rotoru.

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.

Posmatrajmo pravougaonu konturu, stranica  $a$  i  $b$ , koja se, pod delovanjem neke strane sile, obrće konstantnom ugaonom brzinom  $\omega$  u homogenom magnetskom polju indukcije  $\vec{B}$ , kao što je prikazano na slici 4.29.



4.29 Princip rada generatora prostoperiodične elektromotorne sile sa namotajima postavljanim na rotoru.

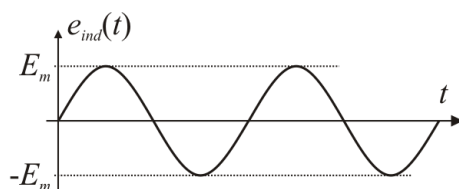
Magnetski fluks kroz površinu  $S = ab$  je definisan kao

$$\Phi = \vec{B} \cdot \vec{S} = BS \cos \alpha = \Phi_m \cdot \cos(\omega t), \quad (4.24)$$

gde je  $(\omega t)$  trenutna vrednost ugla  $\alpha$  između vektora magnetske indukcije  $\vec{B}$  i vektora površine  $\vec{S}$ , koja se oslanja na konturu. Proizvod  $BS$  predstavlja maksimalnu vrednost ili amplitudu fluksa  $\Phi_m$ . Kako se fluks kroz konturu u toku vremenu menja, u konturi će se prema Faradejevom zakonu javiti indukovana elektromotorna sila

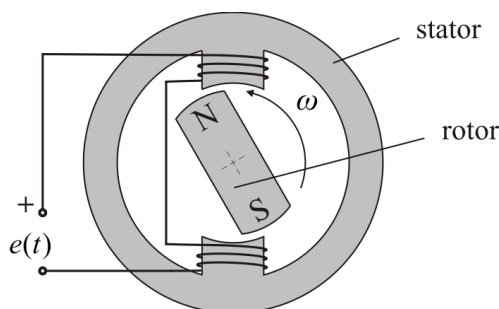
$$e_{ind} = -\frac{d\Phi}{dt} = \Phi_m \omega \sin(\omega t) = E_m \sin(\omega t) \quad (4.25)$$

čija vremenska zavisnost je prikazana na slici 4.30. Proizvod  $\Phi_m \omega$  se naziva maksimalna vrednost ili amplituda elektromotorne sile,  $E_m$ .



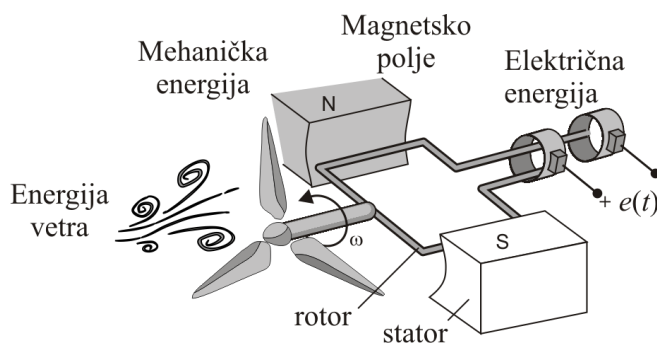
4.30 Vremenska zavisnost indukovane ems u konturi.

Za stvaranje indukovane elektromotorne sile potrebno je kretanje magneta u odnosu na žicu. Pri tome može da miruje magnet a žica da se kreće, kao što je to prikazano na slici 4.29, ili da miruje žica a magnet da se kreće, kao što je prikazano na slici 4.31. Umesto stalnog magneta može da se upotrebi i elektromagnet.



4.31 Princip rada generatora prostoperiodične elektromotorne sile sa namotajima postavljenim na statoru.

Da bi se kontura okretala potrebna je mehanička energija. Zato se ove vrste izvora zovu elektromehanički izvori. Mehanička energija može da se dobije na više načina. Tako razlikujemo hidroelektrane, termoelektrane i vetrogeneratore o čemu je više bilo reči u delu o izvorima električne energije. Na slici 4.32 je prikazan princip rada vetrogeneratora. Energija vetra okreće propeler i osovinu. Osovina okreće žičanu konturu koja se nalazi u magnetskom polju. Menja se fluks kroz konturu opisan izrazom (4.24), te se u konturi indukuje ems prema izrazu (4.25).

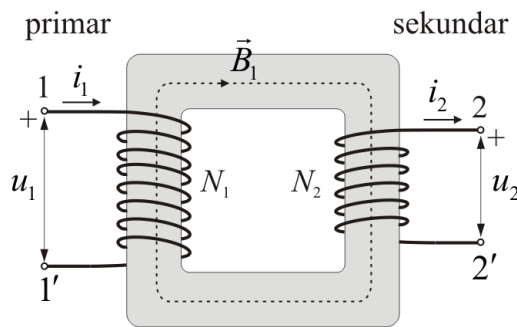


4.32 Princip rada vetrogeneratora sa namotajima postavljenim na rotoru.

#### 4.16. Princip rada transformatora

Kod generatora naizmenične ems bilo je potrebno da se žičana kontura kreće u magnetskom polju. Na taj način se menjao ugao u izrazu (4.24) čime su se stvorili uslovi da se fluks menja u vremenu. Drugi način da se fluks menja jeste promena vektora  $\vec{B}$  u vremenu. Već je rečeno ranije da električna struja u provodnicima stvara magnetsko polje u okolini provodnika. Ukoliko je ta struja vremenski promenljiva tada je i magnetsko polje vremenski promenljivo.

Zamislamo dve žičane strukture (dva namotaja) koja stoje jedan naspram drugog. Nazovimo ih primarni i sekundarni namotaj. Ukoliko se primarni namotaj priključi na generator vremenski promenljivog napona  $u_1(t)$ , tada će i struja  $i_1(t)$  u primarnom namotaju biti vremenski promenljiva. Struja primarnog namotaja stvara vremenski promenljivo magnetsko polje u jezgru ( $\vec{B}_1$  se menja u vremenu). U tom slučaju je i fluks vektora  $\vec{B}_1$  kroz površinu sekundarnog namotaja vremenski promenljiv. Vremenski promenljiv fluks će u žicama sekundarnog namotaja indukovati elektromotornu silu u skladu sa izrazom (4.23). Ta indukovana ems je jednaka naponu na sekundarnom namotaju  $u_2(t) = e_{ind}(t)$ .



4.33 Električni transformator.

Ovom prilikom je došlo do transformacije električne struje primara u magnetsko polje, a zatim do transformacije magnetskog polja ponovo u električnu struju sekundara. Ovakva struktura sa dva namotaja na jednom jezgru se naziva transformator.

Označimo sa  $N_1$  broj zavoja primara, a sa  $N_2$  broj zavoja sekundara. Kod idealnog transformatora, gde nema gubitka energije, naponi primara i sekundara se odnose kao brojevi zavoja

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}. \quad (4.26)$$

Vidi se da je napon veći tamo gde je broj namotaja veći. Transformator omogućava da se naizmenični napon na sekundaru 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 kolo sekundara. Ako je transformator idealan, tj. ako nema gubitaka, tada će se celokupna snaga primara preneti na sekundar, tako da je

$$P_1 = P_2, \quad (4.27)$$

gde je  $P_1 = U_1 \cdot I_1$  snaga primara a  $P_2 = U_2 \cdot I_2$  snaga sekundara. To znači da ako se napon poveća, struja se smanjuje za isti faktor. Odnos struja primara i sekundara se odnosi prema broju namotaja primara i sekundara kao:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}. \quad (4.28)$$