

ELEKTROMAGNETIZAM

OSNOVI ELEKTROENERGETIKE

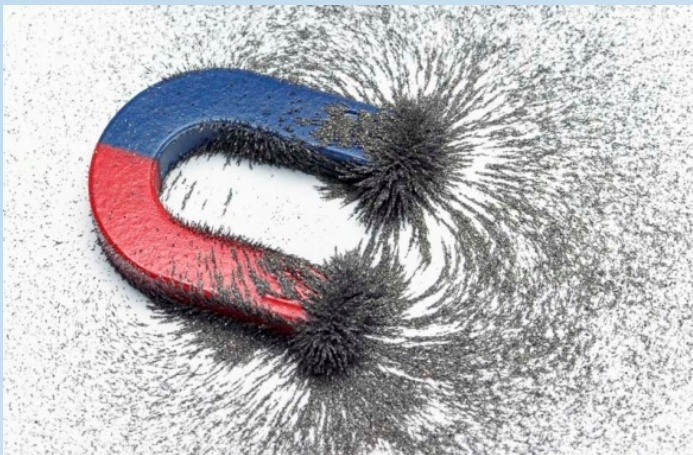
Dr Ivana Vlajić-Naumovska

SADRŽAJ

- ❖ Uvod
- ❖ Svojstva magnetnih materijala
- ❖ Magnetni fluks
- ❖ Elektromagnetna indukcija
- ❖ Magnetna permeabilnost
- ❖ Amperov zakon
- ❖ Bio-Savarov zakon
- ❖ Vrste magnetnih materijala
- ❖ Lencovo pravilo
- ❖ Faradejev zakon
- ❖ Primena

Uvod

- ❖ Prvi zapisi o magnetizmu potiču iz starog veka. Još stari Grci приметili su neobično svojstvo magnetne rude da privlači predmete od metala.
- ❖ Rimljanin Lukrecije (Titus Lucretius Carus, 95-55. g. pr. n. e.) u delu „*DeRerumNatura*” objašnjava da grčki naziv „*magnet*” potiče od pokrajine Magnezija u Maloj Aziji, gde se taj mineral nalazio.
- ❖ Prva praktična primena magneta je **kompas**, a pretpostavlja se da su ga prvi izumeli i upotrebili Kinezi.

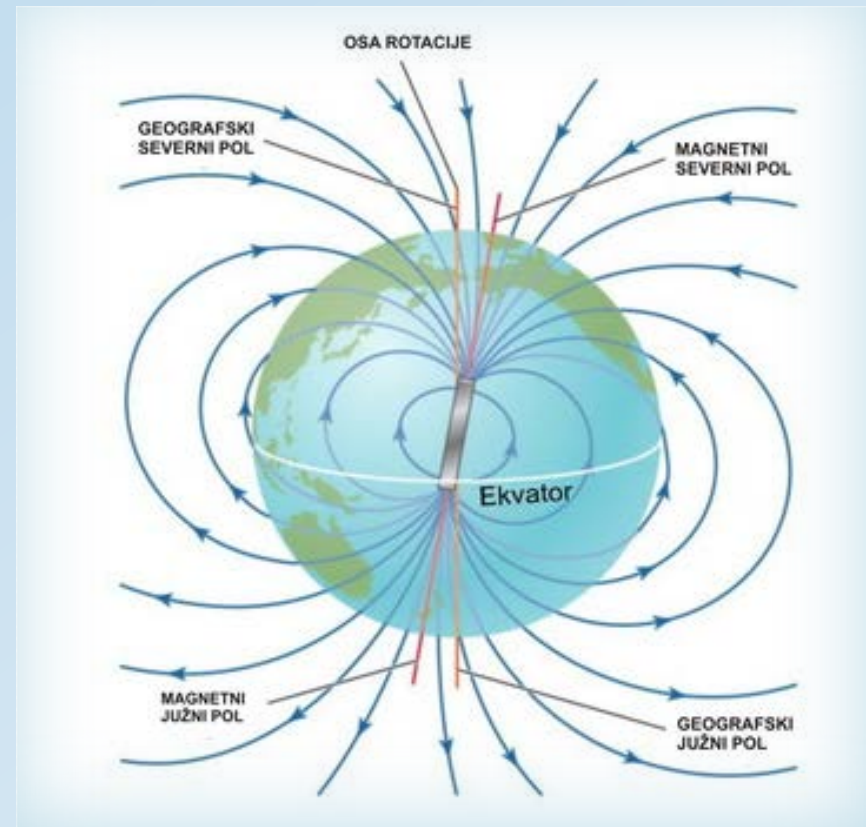


Uvod

❖ Engleski fizičar William Gilbert u knjizi „*De Magnete*” otkriva princip rada kompasa i zaključuje da je Zemlja veliki magnet, sa magnetnim poljem koje je nagnuto pod uglom od $11,5^\circ$ u odnosu na osu rotacije.

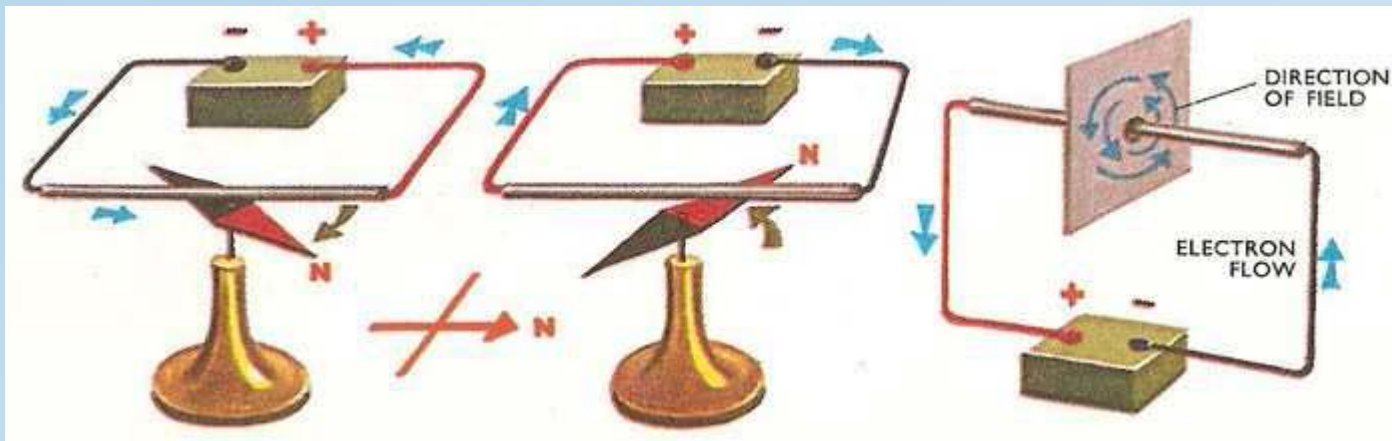
❖ Danski naučnik Ersted (Hans Christian Ørsted) je 1820. eksperimentalno utvrdio dejstvo električne struje na magnetnu iglu pozicioniranu u blizini provodnika, čime je otkrio postojanje magnetnog polja u okolini provodnika kroz koji protiče električna struja.

❖ Francuski fizičar Amper (André-Marie Ampère) je ubrzo nakon toga i matematički objasnio ovu pojavu. Ujedno, pokazao je i da se između dva provodnika kroz koje protiče struja javlja elektromagnetna sila.

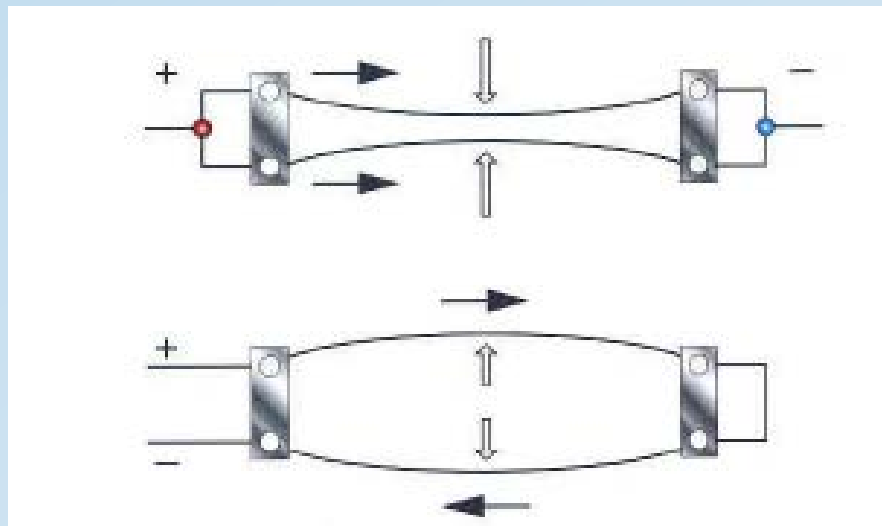


Uvod

❖ Erstedov ogled



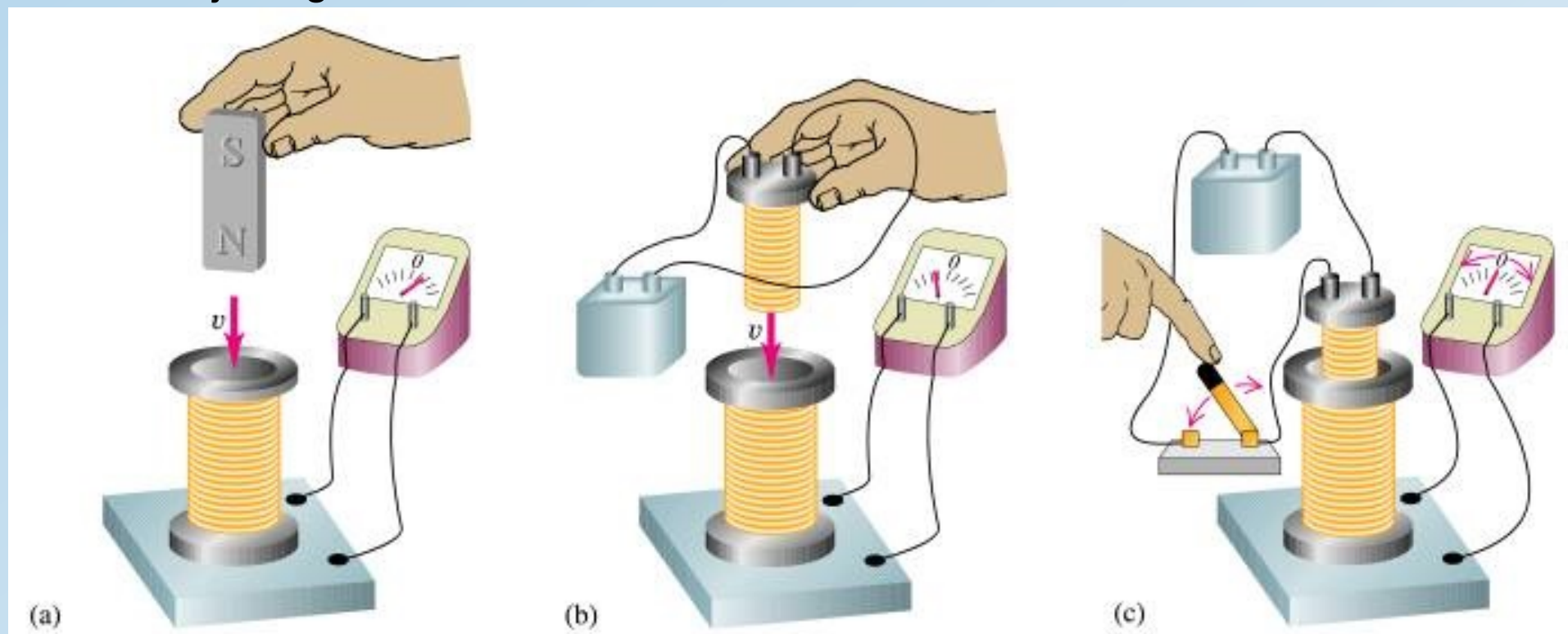
❖ Amperov ogled



Uvod

❖ 1830. godine engleski naučnik Faradej (Micheal Faraday) dolazi do koncepta magnetnog polja, utvrđuje vektor magnetne indukcije i postavlja princip rada prvog elektromotora.

❖ Faradejev ogled



Svojstva magnetnih materijala

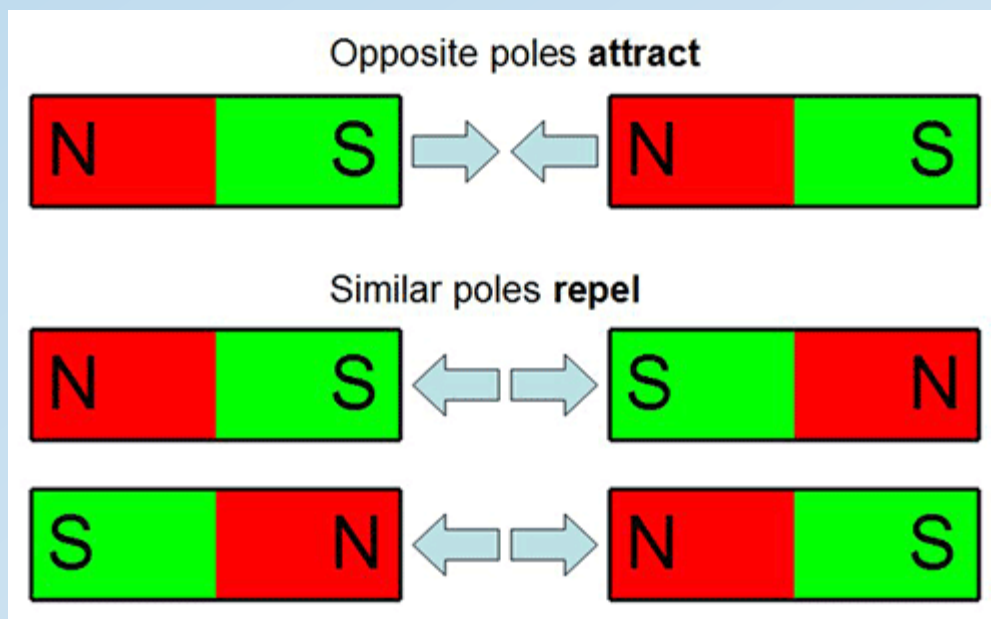
❖ Vrste magneta:

1. Prirodni magneti: - rude gvožđa (nikal, kobalt, i njihove legure)

2. Veštački magneti: - permanentni (stalni) magneti
- elektromagnetni

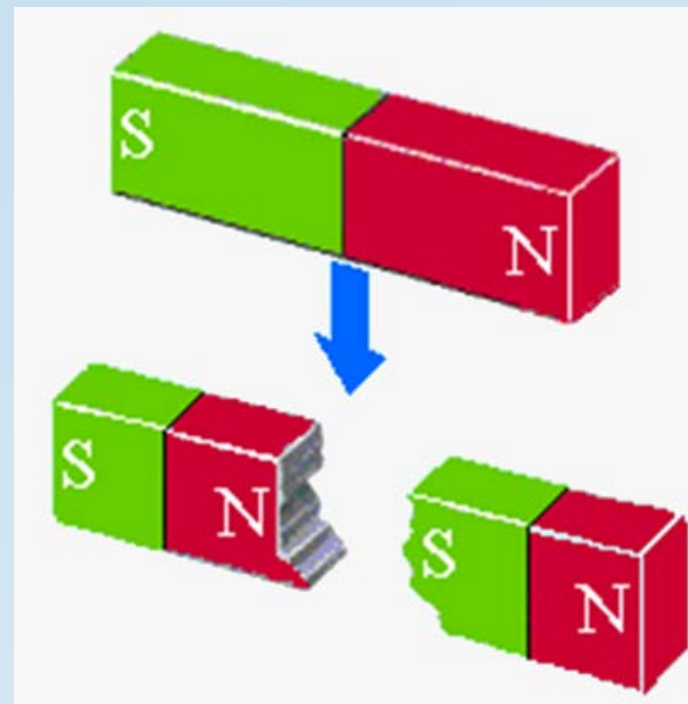
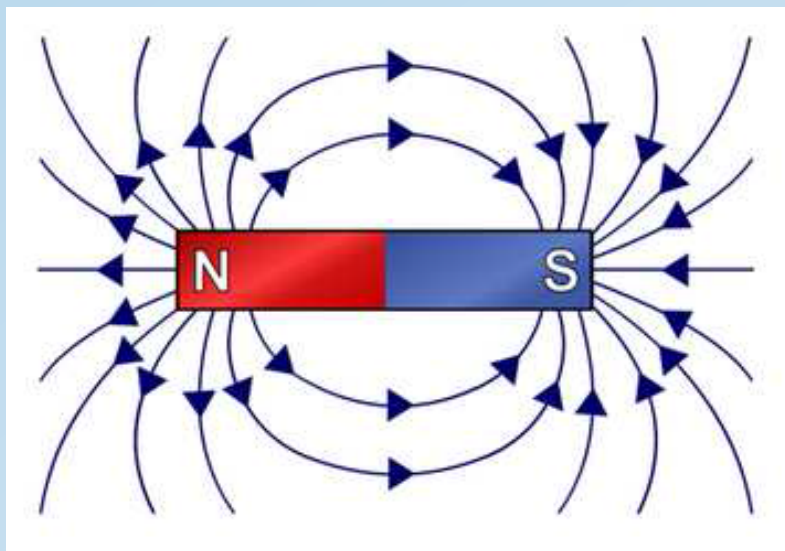
❖ Magnetni materijali imaju dva pola: severni N i južni S.

❖ Istoimeni polovi se odbijaju, a raznoimeni se privlače.



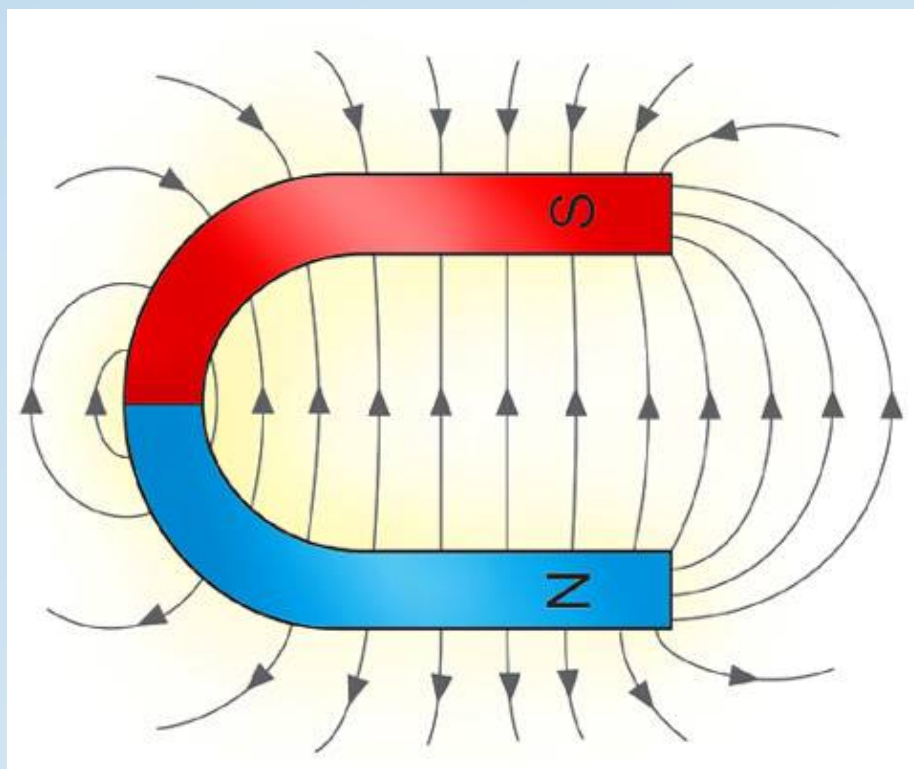
Svojstva magnetnih materijala

- ❖ Linije magnetnog polja izviru iz severnog magnetnog pola N i završavaju na južnom magnetnom polu S. Što su linije gušće to je polje intenzivnije. Uvek su zatvorene i nikada se ne seku.
- ❖ Ako se magnet u obliku šipke podeli, nastaju dva nova magneti. Svaki od njih ima po dva magnetna pola. Daljom deobom dobijaju se manji magneti. Magnet sa jednim polom nije moguće dobiti.



Svojstva magnetnih materijala

- ❖ Magnetno polje je prostor oko i unutar magneta, u kojem deluju magnetne sile, odnosno u kojem se manifestuje magnetni učinak.
- ❖ Magnetno polje može biti homogeno ili nehomogeno.
- ❖ Unutar potkovičastog magneta polje je homogeno, dok je van njega magnetno polje nehomogeno.



Magnetni fluks

❖ Broj linija magnetnog polja koje prolaze kroz neku površinu S naziva se magnetni fluks, a označava se slovom Φ . Tačnije, magnetni fluks kroz neku površinu dS je skalarni proizvod vektora $\vec{B} \cdot \vec{dS}$ (vektor $\vec{dS}$ je normalan na površinu i ima intenzitet jednak veličini date površine).

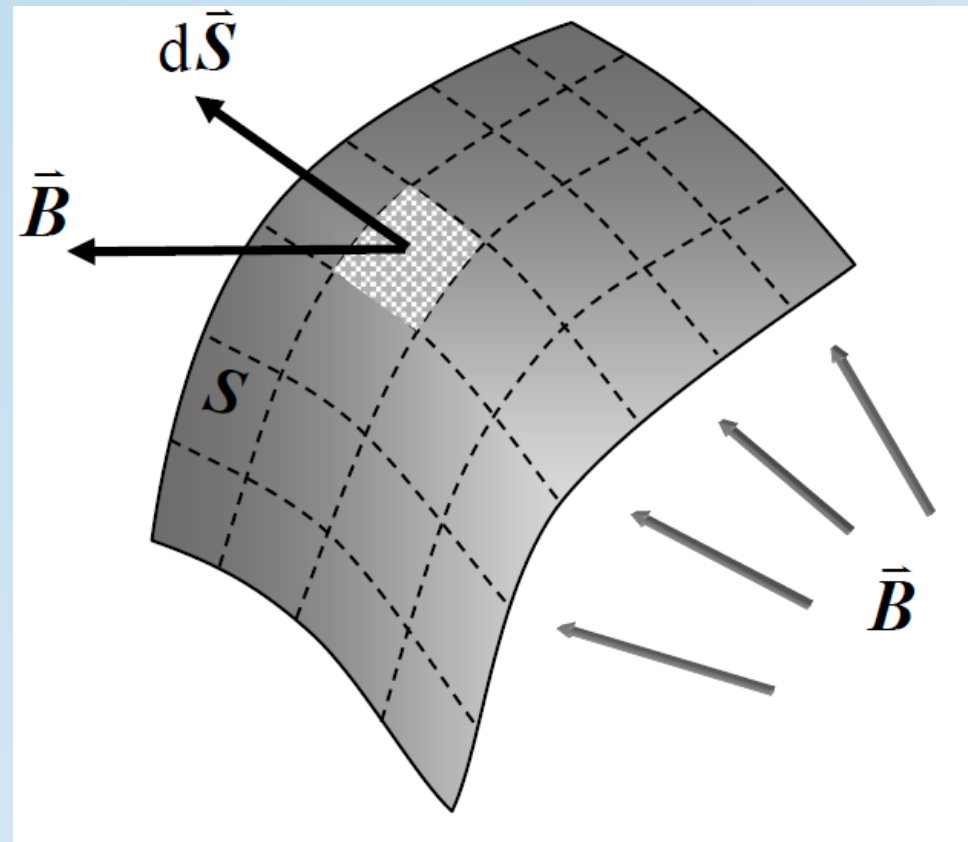
❖ Magnetni fluks je skalarna veličina.

❖ Ukupni magnetni fluks kroz neku površinu iznosi:

$$\Phi = \int_S \vec{B} \cdot \vec{dS} \text{ [Wb]} - \text{veber}$$

Ako je polje homogeno i normalno na površinu važi da je:

$$\Phi = B \cdot S$$



Magnetni fluks

❖ Primer: Odrediti magnetni fluks Φ kroz površ S sa slike, ako je ugao između njene ravni i vektora magnetne indukcije $\beta_1 = 60^\circ$. Magnetno polje je homogeno, a intenzitet vektora magnetne indukcije iznosi $B = \frac{4}{S}$ [T].

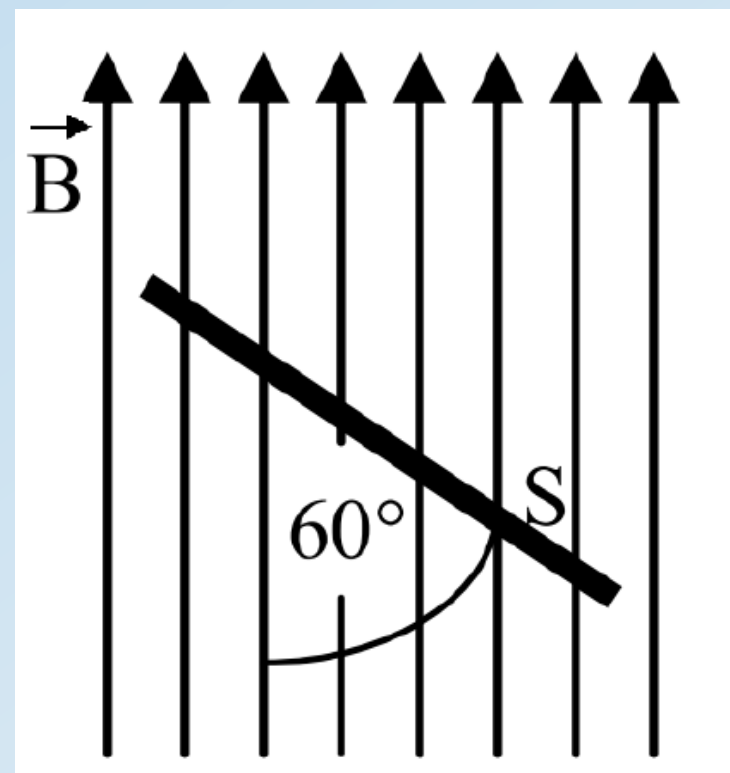
❖ Rešenje:

Obzirom da je polje homogeno, intenzitet, pravac i smer vektora $\vec{B}$ su konstantni. Odavde se može napisati:

$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos \alpha_1 = B \cdot S \cdot \sin \beta_1$$

$$\Phi = \frac{4}{S} \cdot S \cdot \sin 60^\circ$$

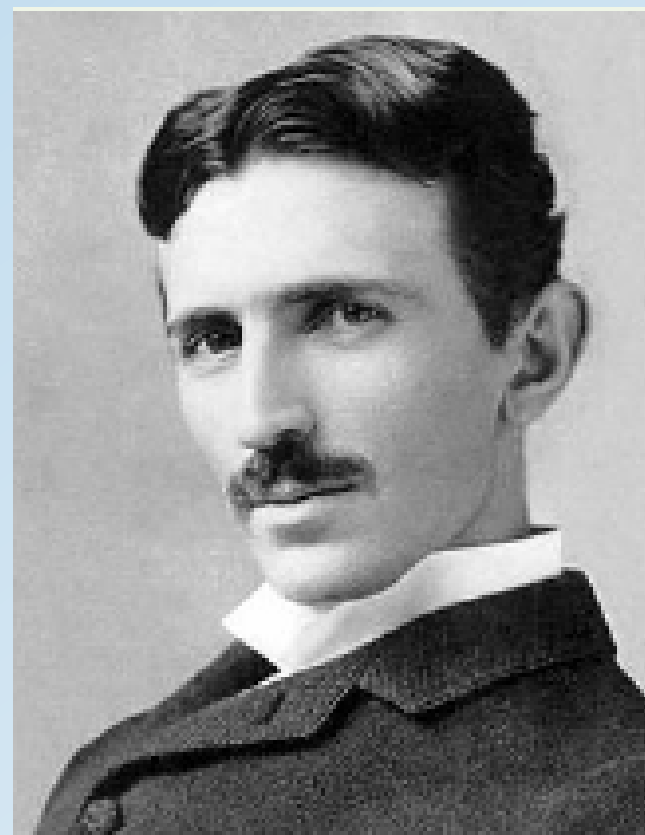
$$\Phi = 2\sqrt{3} \text{ [Wb]}$$



Elektromagnetna indukcija

- ❖ Osnovna veličina kojom se kvantitativno karakteriše magnetno polje je vektor magnetne indukcije $\vec{B}$, koji se može definisati u svakoj tački magnetnog polja.
- ❖ Jedinica za magnetnu indukciju naziva se „tesla“ i obeležava simbolom [T], u čast jednog od najpoznatijih svetskih pronalazača i naučnika u oblasti elektrotehnike, radiotehnike i fizike.
- ❖ Fluks vektora $\vec{B}$ podleže veoma važnom zakonu o konzervaciji fluksa, koji je jedan od osnovnih zakona teorije elektromagnetnih polja. Prema ovom zakonu, izlazni fluks vektora $\vec{B}$ kroz ma koju zatvorenu površinu jednak je nuli:

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$



Nikola Tesla (1856-1943)

Vektor jačine magnetnog polja

- ❖ Pored vektora $\vec{B}$, za kumulativno opisivanje magnetnog polja koristi se još jedna vektorska veličina - vektor jačine magnetnog polja $\vec{H}$.
- ❖ Svako magnetno polje u vakuumu može se opisati bilo pomoću magnetne indukcije $\vec{B}$, bilo pomoću jačine magnetnog polja $\vec{H}$ jer važi relacija:

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot \vec{H}$$

Pri čemu je μ_0 magnetna permeabilnost vakuuma i vazduha:

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \left[\frac{H}{m} \right]$$

- ❖ Jedinica za jačinu magnetnog polja je $\left[\frac{A}{m} \right]$.

Magnetna permeabilnost

- ❖ Koeficijent μ predstavlja magnetnu permeabilnost ili vodljivost materijala u kome se formira magnetno polje.
- ❖ Faktor za koji se permeabilnost μ nekog materijala razlikuje od magnetne permeabilnosti vakuuma naziva se relativna permeabilnost μ_r .

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r = \frac{B}{H}$$

- ❖ Veza između magnetne indukcije i jačine magnetnog polja u nekoj sredini relativne permeabilnosti μ_r opisana je izrazom:

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \vec{H}$$

Amperov zakon

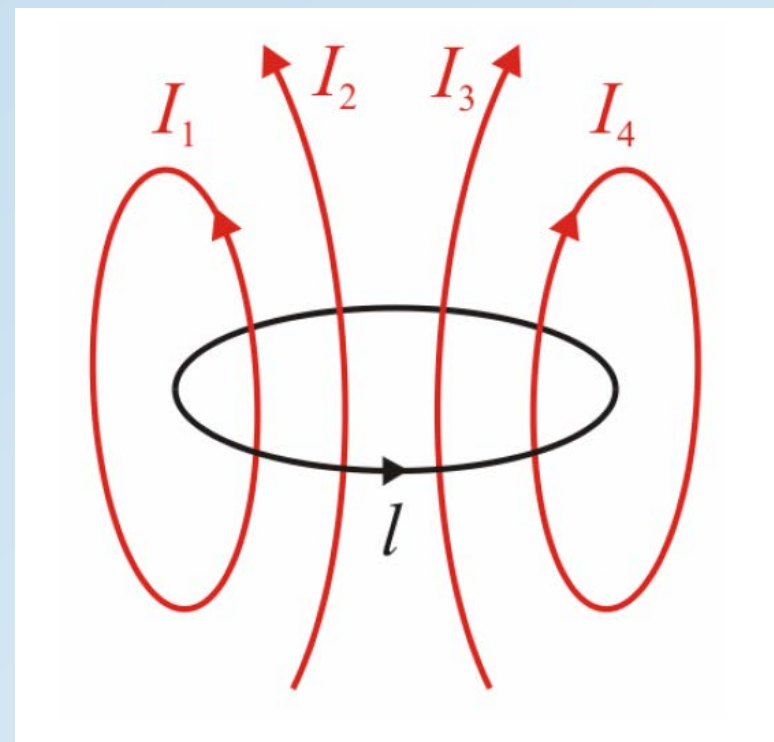
❖ Amperov zakon daje najopštiji kvantitativni odnos između magnetnih polja u vakuumu i stacionarnih električnih struja koje ta polja prouzrokuju.

❖ Cirkulacija vektora magnetne indukcije $\vec{B}$ duž zatvorene konture L proporcionalna je ukupnoj struji koja prolazi kroz površinu oivičenu tom konturom.

❖ U integralnom obliku, Amperov zakon se može zapisati:

$$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \sum_{i=1}^n I_i$$

❖ Pozitivan smer proticanje struje određuje se po pravilu desnog zavrtnja u odnosu na proizvoljno izabran smer obilaženja po konturi.



Amperov zakon

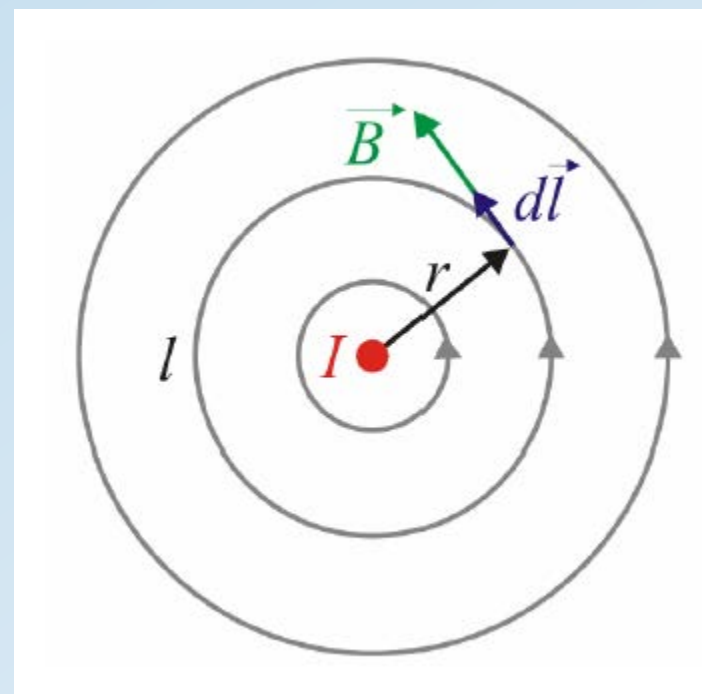
❖ Izvan vakuuma važi uopšteni Amperov zakon:

$$\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum_{i=1}^n I_i$$

❖ Pomoću Amperovog zakona o cirkulaciji vektora magnetne indukcije $\vec{B}$ može se lako izračunati intenzitet magnetne indukcije u slučajevima kada postoji visok stepen simetrije polja.

1) Magnetno polje u okolini beskonačno dugog provodnika kružnog preseka:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I}{2r\pi}$$

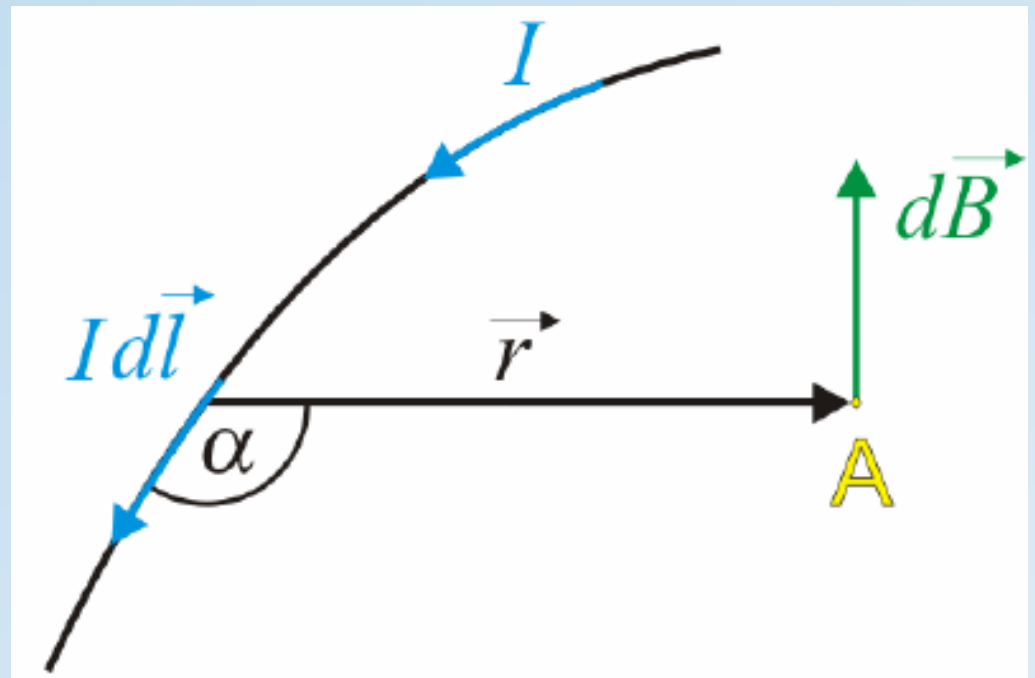


Bio-Savarov zakon

❖ Na osnovu eksperimentalnih rezultata francuskih naćnika Biot-a i Savart-a za polje pravolinijskog strujnog provodnika, Laplas je intuitivnim putem došao do zaključka da se vektor magnetne indukcije u proizvoljnoj taćki polja može predstaviti kao vektorski zbir vektora $d\vec{B}$ koji potiću od svakog elementa $I d\vec{l}$, pri ćemu je:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\vec{l} \times \vec{r}}{r^3}$$

Gde $\vec{r}$ predstavlja poloćaj taćke u kojoj se odrećuje $\vec{B}$ u odnosu na dati strujni element $I d\vec{l}$ (smer $d\vec{l}$ jednak je smeru struje kroz provodnik).

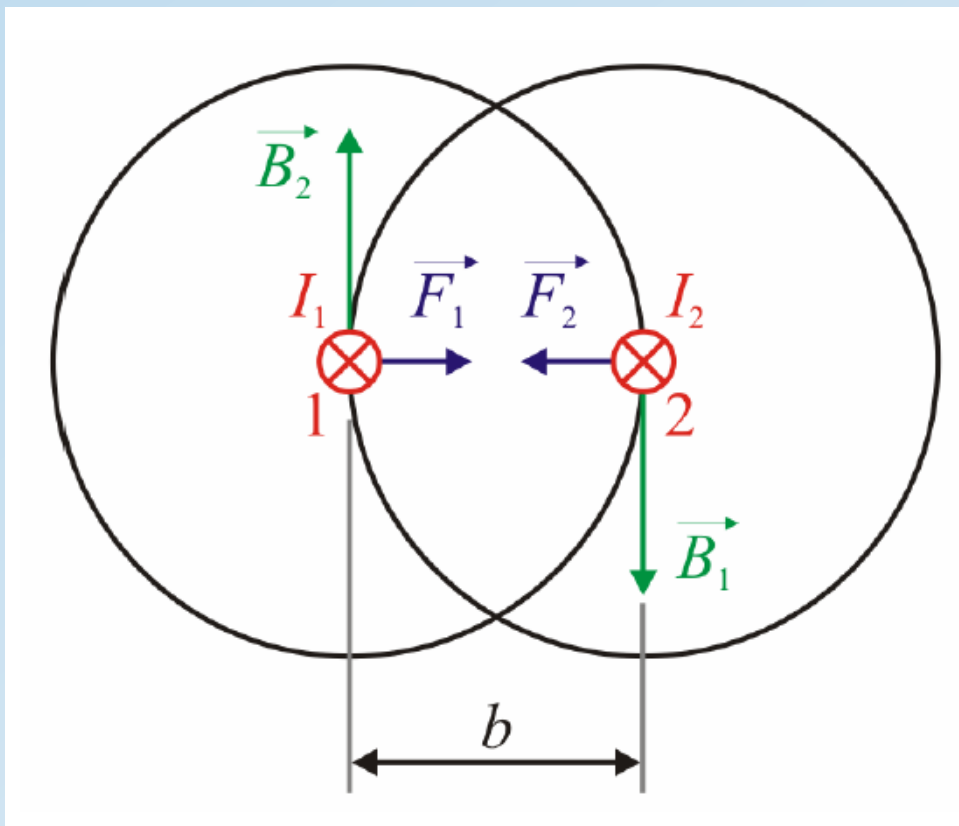


Sila interakcije između dva provodnika

❖ Iz Bio-Savarovog zakona, uz korišćenje Amperovog zakona elektromagnetne indukcije dolazimo do zaključka:

❖ Ako struje I_1 i I_2 imaju isti smer $\rightarrow$ provodnici se privlače.

❖ Ako su struje I_1 i I_2 različitih smerova $\rightarrow$ provodnici se odbijaju.



Vrste magnetnih materijala

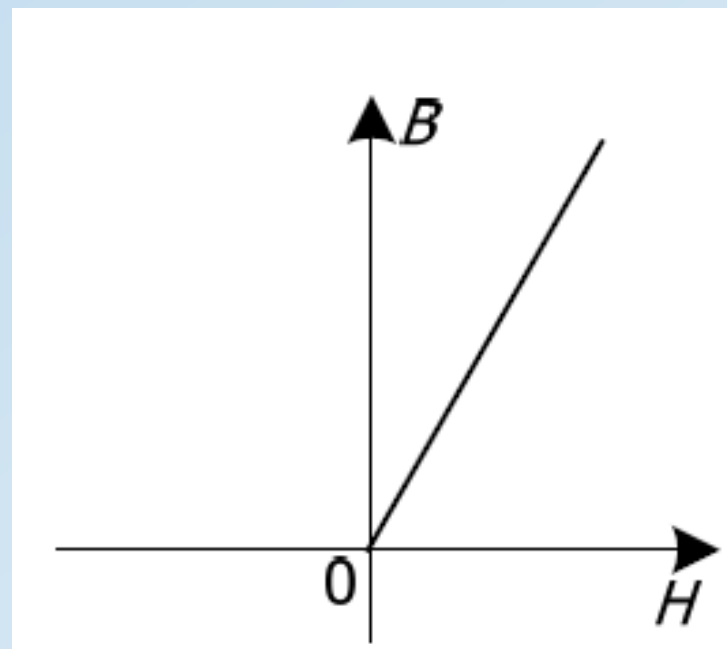
❖ Svi magnetni materijali, i prirodni i sintetički, mogu se podeliti prema svom magnetnom uređenju na:

- materijale sa slabim magnetnim uređenjem,
- materijale sa jakim magnetnim uređenjem.

❖ Materijali sa slabim magnetnim uređenjem su:

- *dijamagnetici* (relativna magnetna permeabilnost μ_r im je neznatno manja od 1);
- *paramagnetici* (relativna magnetna permeabilnost μ_r im je neznatno veća od 1).

❖ Kod ovih materijala je zavisnost između magnetne indukcije i jačine magnetnog polja linearna.



Vrste magnetnih materijala

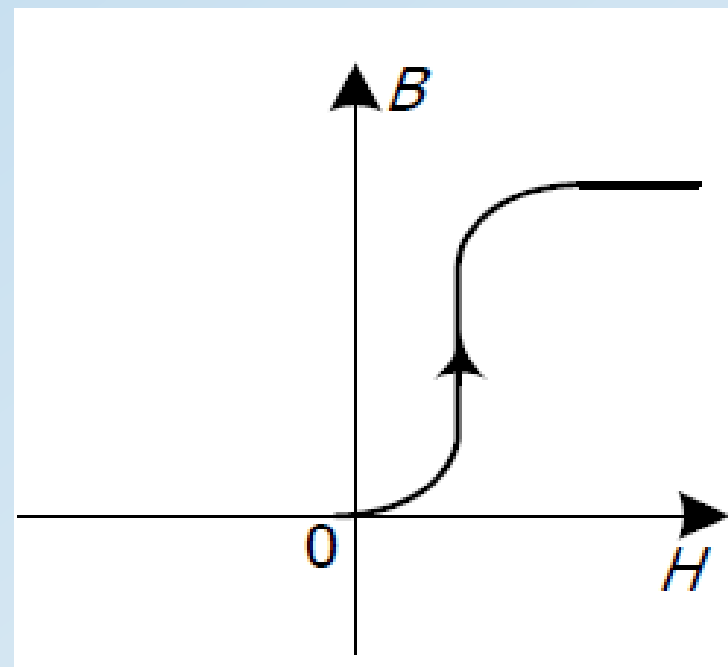
❖ Materijali sa jakim magnetnim uređenjem su:

- *feromagnetici* (relativna magnetna permeabilnost μ_r im je mnogo veća od 1),
- *ferimagnetici* (relativna magnetna permeabilnost μ_r im je mnogo veća od 1),
- *antiferomagnetici* (kod njih se međusobni uticaj domena poništava).

❖ Feromagnetici i ferimagnetici imaju značajnu ulogu u elektrotehničkoj praksi, a zbog sličnih magnetnih osobina za njih se obično koristi zajednički naziv “*feromagnetici*”.

❖ U feromagnetike spada malobrojna grupa materijala (gvožđe, kobalt, nikl i neke njihove legure).

❖ Kod ovih materijala zavisnost između magnetne indukcije i jačine magnetnog polja nije linearna.



Vrste magnetnih materijala

❖ Feromagnetski pod uticajem magnetnog polja i sami postaju magneti.

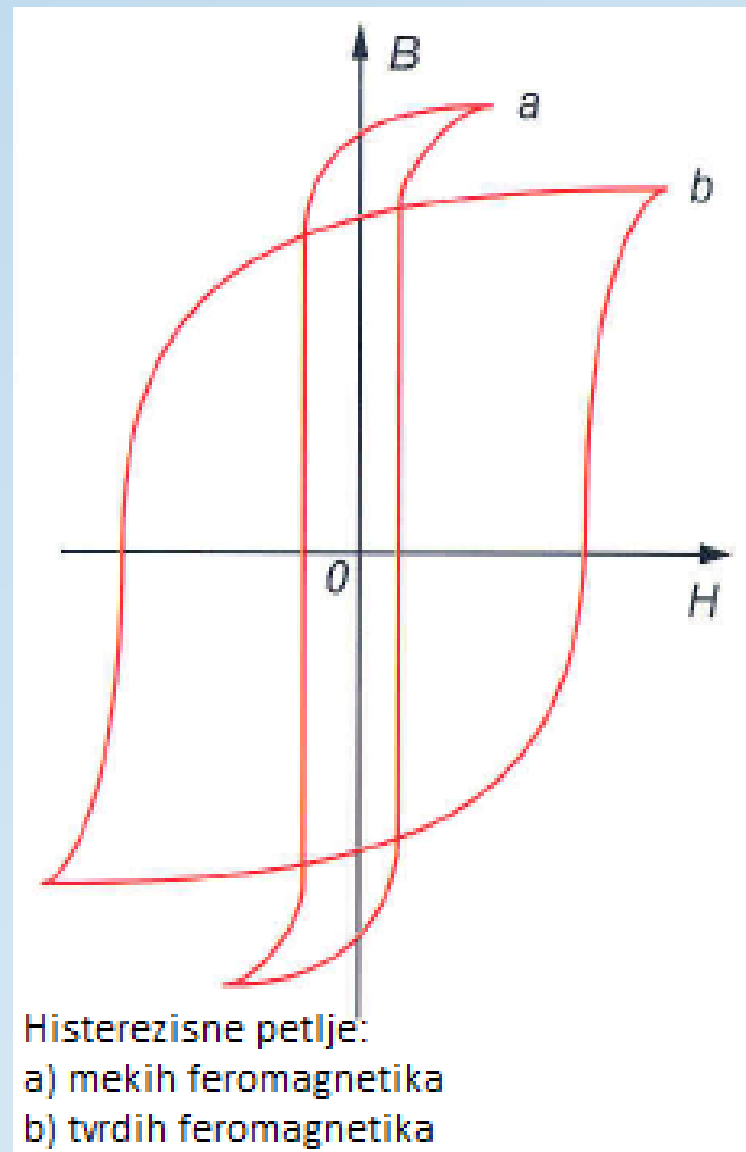
❖ Vrste feromagnetskih materijala:

- meki feromagnetici – po prestanku delovanja stranog magnetskog polja veći deo elementarnih dipola se vraća u prvobitno stanje

- tvrdi feromagnetici – po prestanku delovanja stranog magnetnog polja veći deo elementarnih dipola ostaje usmeren zbog čega zadržavaju magnetna svojstva (stalni magneti)

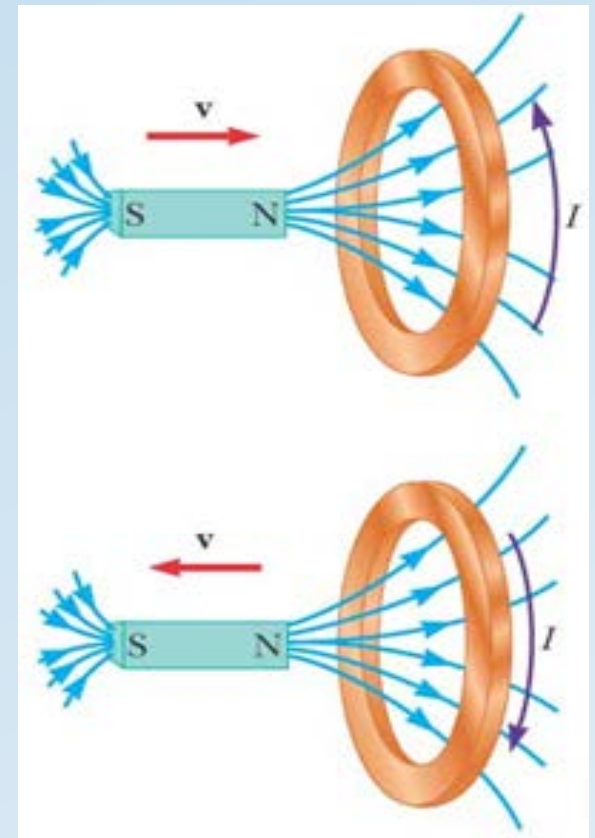
❖ Krive histerezisa tvrdih i mekih feromagnetika

$$B = f(H)$$



Lencovo pravilo

- ❖ Elektromagnetna indukcija je pojava nastajanja elektromotorne sile usled promene magnetnog fluksa.
- ❖ Promena magnetnog fluksa kroz neku provodnu konturu izaziva električnu struju u toj konturi.
- ❖ Dakle, strujna kontura reaguje na promenu magnetnog polja stvaranjem sopstvenog magnetnog polja (indukovane struje).
- ❖ ***Indukovana struja (elektromotorna sila) ima takav smer, da teži poništenju uzroka svog nastanka.***

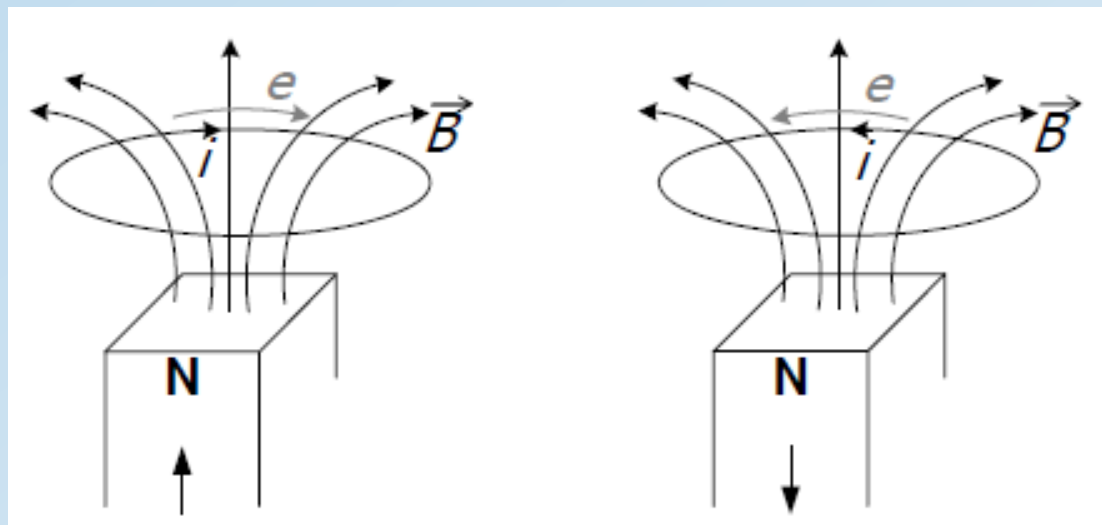


Faradejev zakon

❖ Indukovana elektromotorna sila u zatvorenoj konturi srazmerna je negativnoj brzini promene fluksa, što se može zapisati formulom:

$$e = - \frac{d\Phi}{dt}$$

❖ Negativan predznak proizilazi iz Lencovog pravila: indukovana ems (odnosno struja) ima takav smer da svojim poljem teži da spreči promenu fluksa, koja je prouzrokovala indukciju.



Statička i dinamička indukcija

❖ Izraz za indukovanu elektromotornu silu u opštem slučaju je:

$$e = - \int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{S} + \oint_C (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l}$$

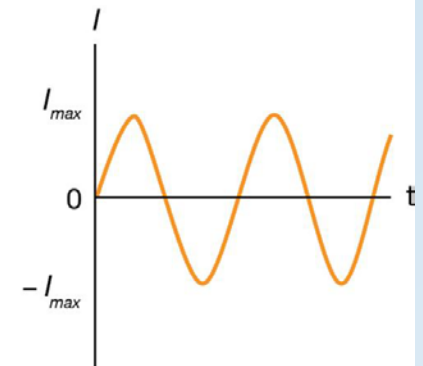
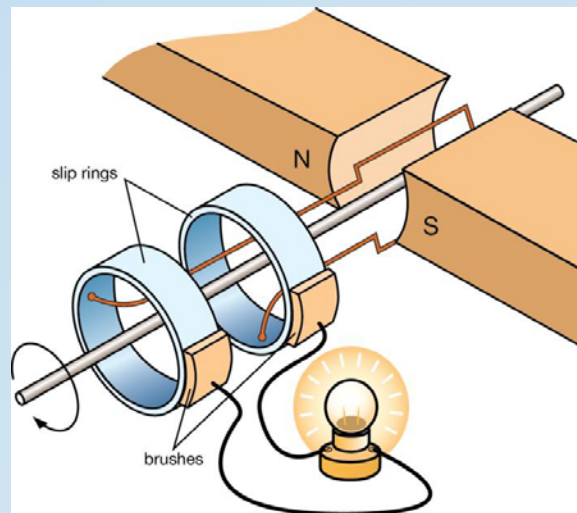
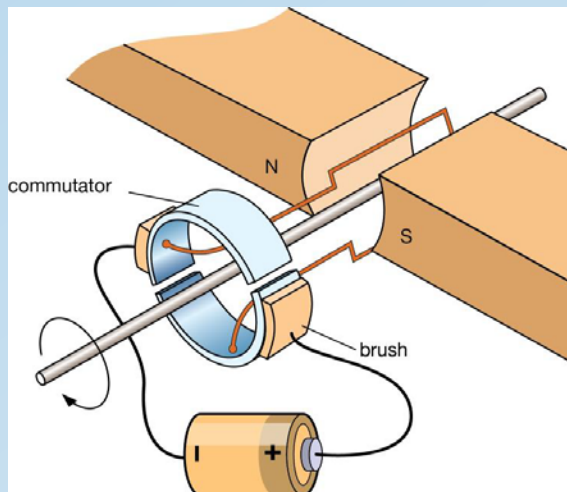
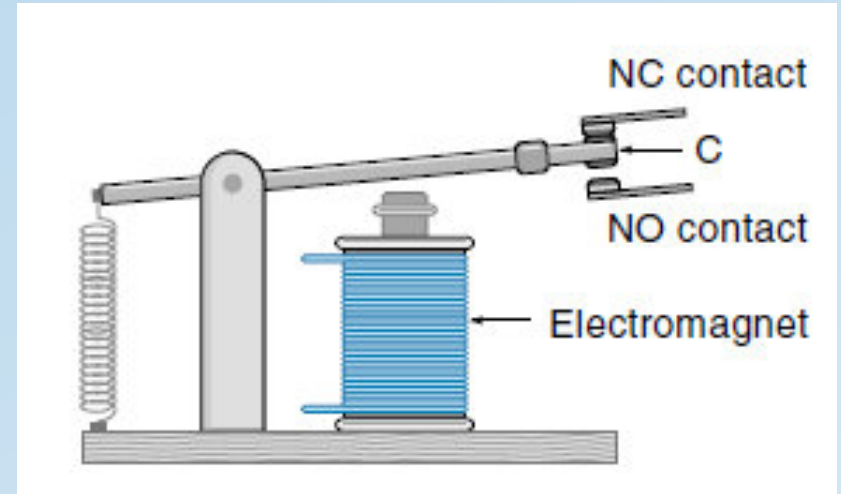
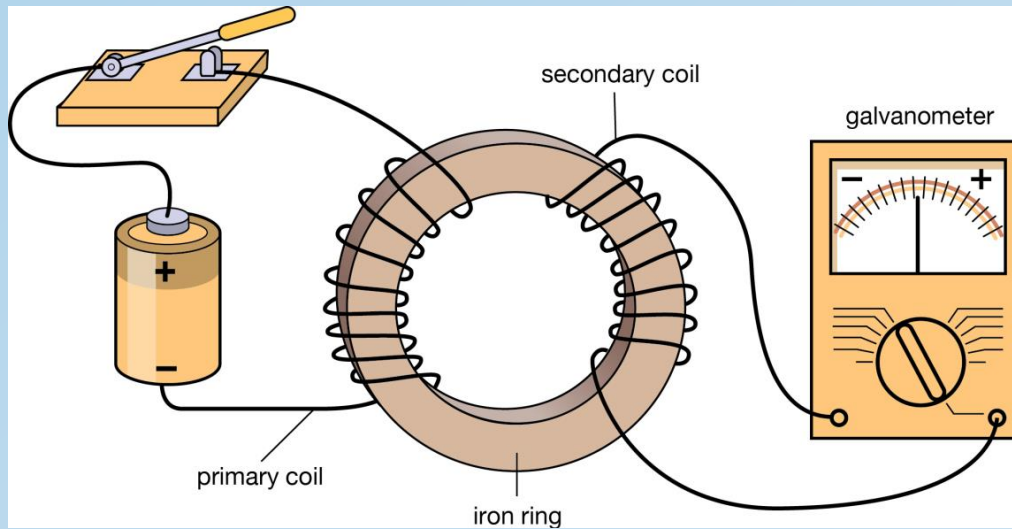
Statička indukcija

- Nastaje usled promene magnetne indukcije
- Kontura je nepokretna
- Menja se samo magnetno polje

Dinamička indukcija

- Nastaje kao posledica kretanja konture u magnetnom polju
- Magnetno polje je nepromenljivo
- Kontura se kreće

Primene elektromagnetizma



Literatura

- 1) M. Milanković, D. Perić, I. Vlajić-Naumovska, *“Osnovi elektroenergetike”*, Visoka škola elektrotehnike i računarstva strukovnih studija, Beograd, 2016.
- 2) I. Vlajić-Naumovska, B. Čupić, M. Ivezić, Đ. Pavlović, *“Zbirka zadataka iz osnova elektroenergetike”*, Visoka škola elektrotehnike i računarstva strukovnih studija, Beograd, 2018.
- 3) I. Vlajić-Naumovska, B. Čupić, M. Ivezić, *“Priručnik za laboratorijske vežbe iz osnova elektroenergetike”*, Visoka škola elektrotehnike i računarstva strukovnih studija, Beograd, 2018.
- 4) A. Đorđević, *„Osnovi elektrotehnike“*, Akademska Misao, Beograd, 2017.
- 5) F. T. Ulaby, U. Ravaioli, *„Fundamentals of Applied Electromagnetics“*, Pearson, 2014.