

Istorijski pregled –nauke o magnetima

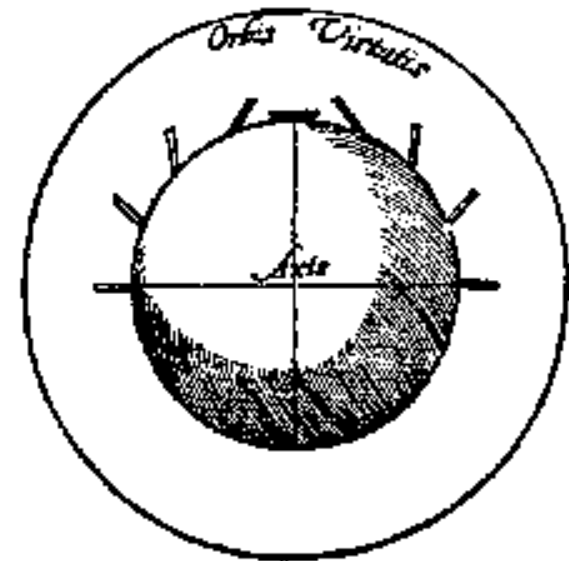
- grad Magnesia u Maloj Aziji - nalazište magnetita
- legenda: pastira Magnusa s Krita - okovana obuća i pastirski štap privučeni magnetskom rudom (magnetitom Fe_3O_4)
- Kina, 13. vijek p.n.e. korištenje magnetne igle
- Tales iz Mileta, 6. st. p.n.e. Grčka; Indija, Kina
- kompas: Kina (1. i 2. st. p.n.e.); Evropa 12. vijek



Kineski kompas

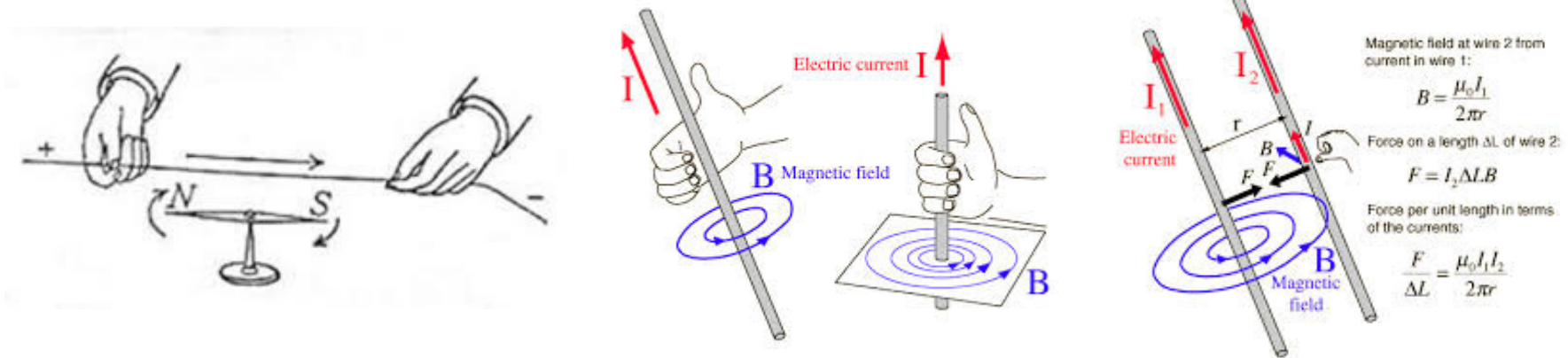
Istorijski pregled – naziv magnet

- **Petrus Peregrinus** (franc. **Pierre de Maricourt**) 1269. g. **Epistola de Magnete** - prva eksperimentalna istraživanja o magnetizmu
- **Vilijam Gilbert** 1600. godine napisao revolucinarnu studiju **De Magnete** - postavio je osnove današnjih saznanja o magnetizmu; opisuje sva dotadašnja saznanja o magnetizmu, nabraja sve izvedene eksperimente
- **Gilbert** je izradio je kuglu od magnetita: Zemlja ogromni magnet s magnetnim polovima i postavio osnove geomagnetizma



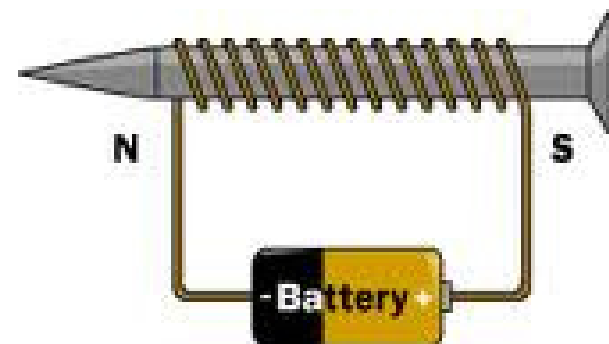
Istorijski pregled – naziv magnet

- **Hans Kristian Oersted** 1820 postavio je **kompas** blizu žice koju je spojio na bateriju. Kad je **struja potekla** žicom, **igla se pomakla**. Oersted je prvi pokazao da **električna struja proizvodi magnetno polje**
- **Andre Maria Amper** (1820) otkrio je postojanje **elektromagnetne sile** među provodnika kroz koje protiče struja i činjenicu da se gusto motana zavojnica ponaša kao cilindrični magnetni štap



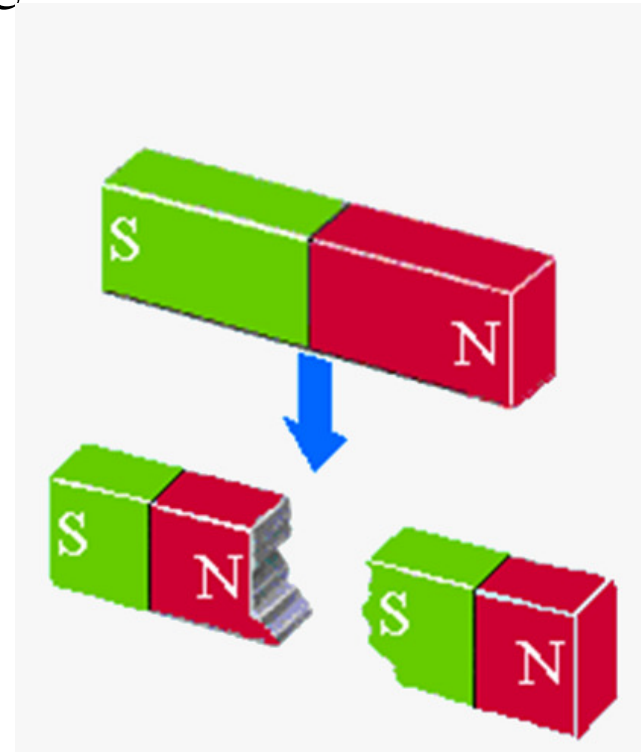
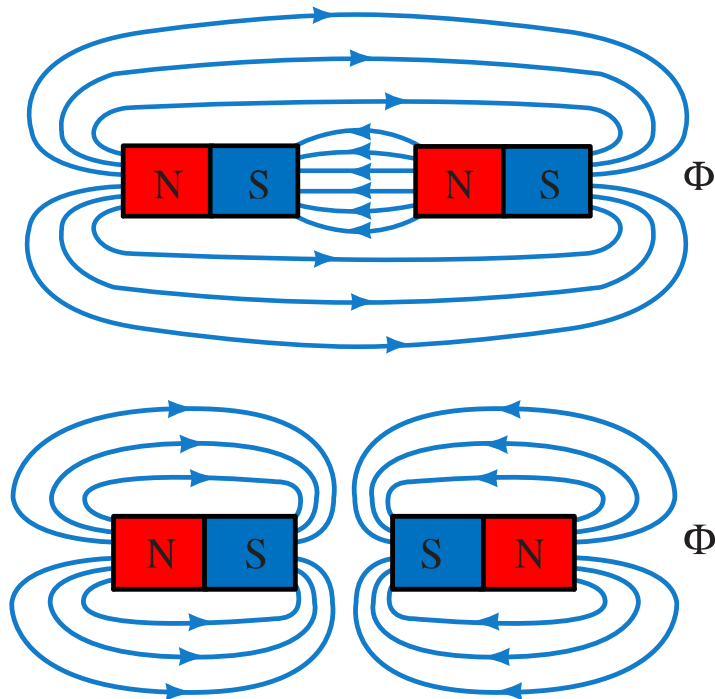
Vrste magneta

- Magneti su predmeti koji imaju osobine privlačenja željeznih predmeta
- Vrste magneta:
 1. **Prirodni magneti** – željezne rude (nikal, kobalt, i njihove legure)
 2. **Vještački magneti:**
 - **Permanentni (stalni) magneti** – posebne željezne rude (tvrdi feromagnetni materijali)
 - **Elektromagneti** - zavojnica s jezgrom od mekog magnetnog željeznog materijala



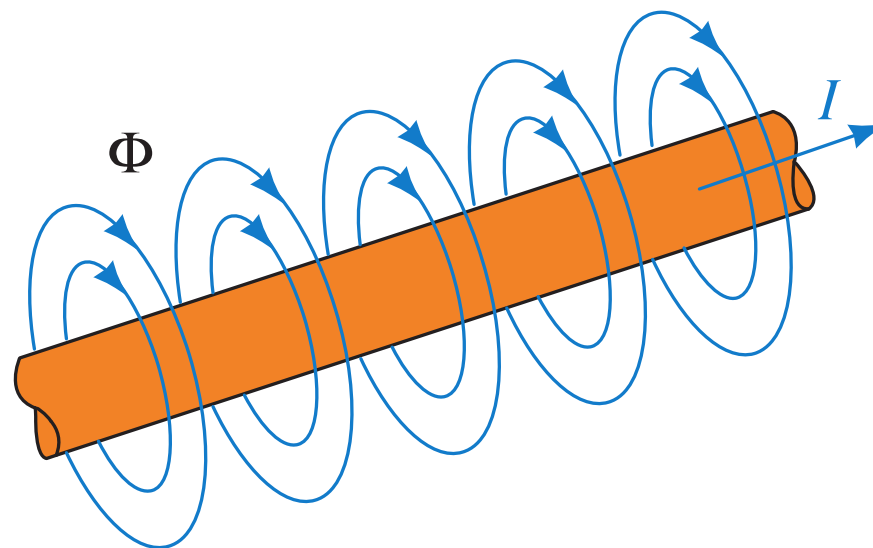
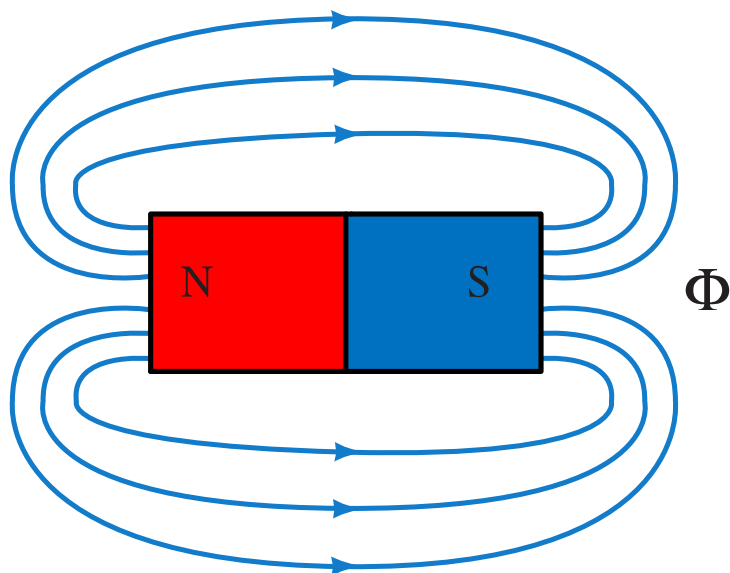
Osobine stalnih magneta

- Svaki magnet ima svoje magnetne polove, sjeverni (N) i južni (S)
- Istoimeni polovi se odbijaju, a raznoimeni privlače. Što je veće rastojanje između polova, dejstvo sile je manje
- Ako se magnet u obliku šipke podjeli nastaju dva nova manja magneta. Daljom dibom dobijaju se samo još manji magneti sa po dva pola.
- Magneti sa samo jednim polom ne mogu se fizički ostvariti



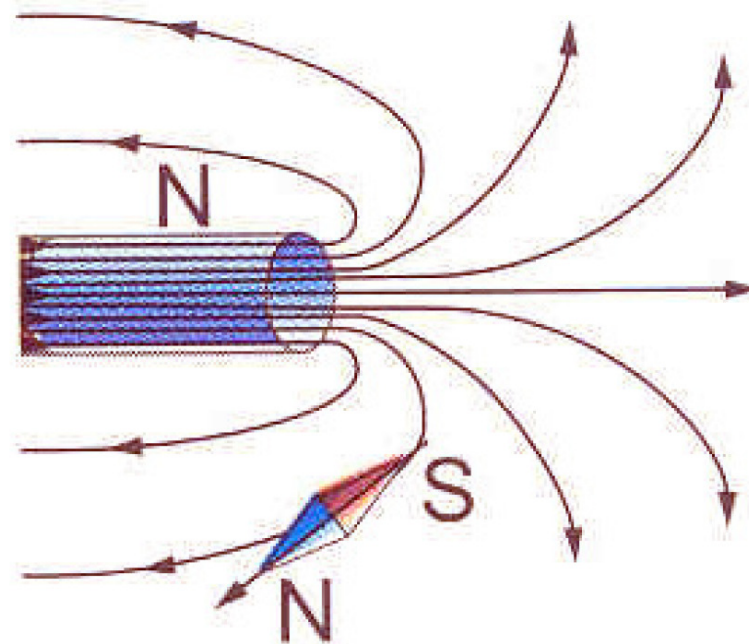
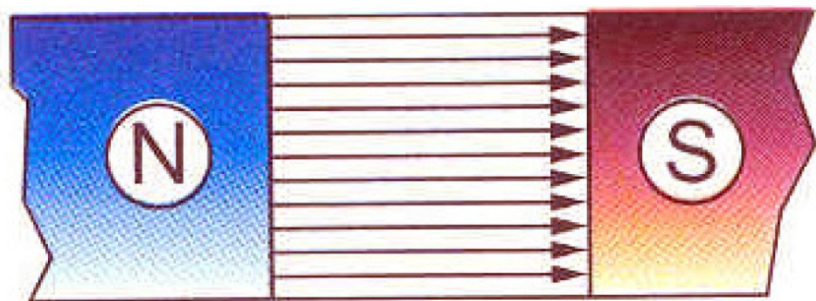
Pojam magnetnog polja

- Magnetno polje je prostor u kome se osjeća djelovanje magnetne sile
- Postojanje magnetnog polja prezentuje se linijama magnetnog polja ili linijama magnetnog fluksa Φ
- Magnetske silnice su u sebe zatvorene linije bez početka i završetka
- Gustina silnica određuje jačinu polja, a tangente na silnicu određuje smjera polja
- Izvor magnetnog polja može biti stalni magnet ili provodnik sa strujom



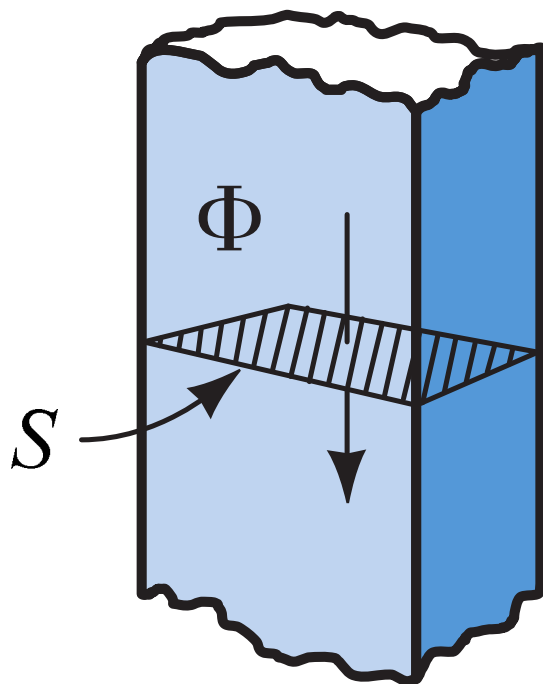
Homogeno i nehomogeno magnetno polje

- Homogeno magnetno polje je polje čije su silnice paralelne i jednako udaljene jedna od druge,
- Kod nehomogenog magnetnog polja silnice su neravnomjerno i neparalelno raspoređene oko magnetnog izvora



Osnovne veličine u magnetnom polju

- **Magnetni fluks Φ [1 Wb - Veber]** predstavlja ukupni broj magnetnih silnica koje izlaze iz magnetskog pola stalnog magneta
- Broj silnica **magnetnog gluksa Φ** koje prolaze kroz posmatranu **površinu S** predstavlja **magnetnu indukciju B [1T - Tesla]** (gustinu magnetnog fluksa)



$$B = \frac{\Phi}{S} = \frac{1Wb}{1s} = 1T [Tesla]$$

$$\Phi = B \cdot S = 1Wb [Veber]$$

Magnetna indukcija $\mathbf{B}$ u materijalima

- Magnetno polje uspostavljeno u nekom materijalu (sredini) razlikuje se u poređenju sa istim u vakuumu
- Materijali koji značajno utiču na magnetno polje nazivaju se **magnetici**
- U magneticima je magnetna indukcija $\mathbf{B}$ različita od magnetne indukcije u vakuumu $\mathbf{B}_0$
- Sami magnetici prelaze u stanje namagnetisanja i daju dopunsku magnetnu indukciju $\mathbf{B}'$
- Magnetna indukcija $\mathbf{B}$ u nekom magnetiku jednaka je vektorskom zbiru magnetne indukcije u vakuumu $\mathbf{B}_0$ i dopunske magnetne indukcije $\mathbf{B}'$

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}'$$

Magnetna indukcija B u materijalima

- Rezultujuća magnetna indukcija B' samih magnetnih dipola materijala srazmjerna je spoljašnjoj magnetnoj indukciji B_0 u vakuumu :

$$B' = \lambda_m \cdot B_0$$

- λ_m – magnetna susceptibilnost (osjetljivost) materijala

$$B = B_0 + \lambda_m \cdot B_0 = (1 + \lambda_m) \cdot B_0$$

$$B = \mu_r \cdot B_0$$

- **Relativna magnetna permeabilnost** μ_r pokazuje koliko se puta magnetna indukcija B u nekom materijalu promjeni u odnosu na magnetnu idnukciju B_0 u vakuumu

Magnetna indukcija B u materijalima

- Prema vrijednosti **relativne magnetne permeabilnosti** μ_r materijali se mogu podijeliti u tri osnovne vrste:
 1. **Dijamagnetici** su materijali čiji atomi i molekuli nemaju stalne magnetne momente. Pod dejstvom vanjskog polja u njima se indukuju (stvaraju) magnetni dipoli suprotno orijentisani od B_0 – **magnetna indukcija je u njima neznatno oslabljena**

$$\mu_r < 1$$

- U ove materijale ubrajamo: **bakar** ($\mu_r = 0,999991$), **srebro, cink, zlato**
- Nakon uklanjanja vanjskog polja **dijamagnetici** se vraćaju u prethodno stanje – stanje bez usmjerenih magnetnih momenata (tačnije, magnetni momenti su potpuno haotično usmjereni)
- **Dijamagnetici se ne mogu** namagnetisati

Magnetna indukcija B u materijalima

2. **Paramagnetici** su materijali čiji atomi posjeduju permanentni magnetni moment (nespareni elektroni), a koji se u prisustvu spoljašnjeg polja djelimično orijentišu u smjeru vanjske magnetne indukcije B_0 – **polje je u njima neznatno pojačano**

$$\mu_r > 1$$

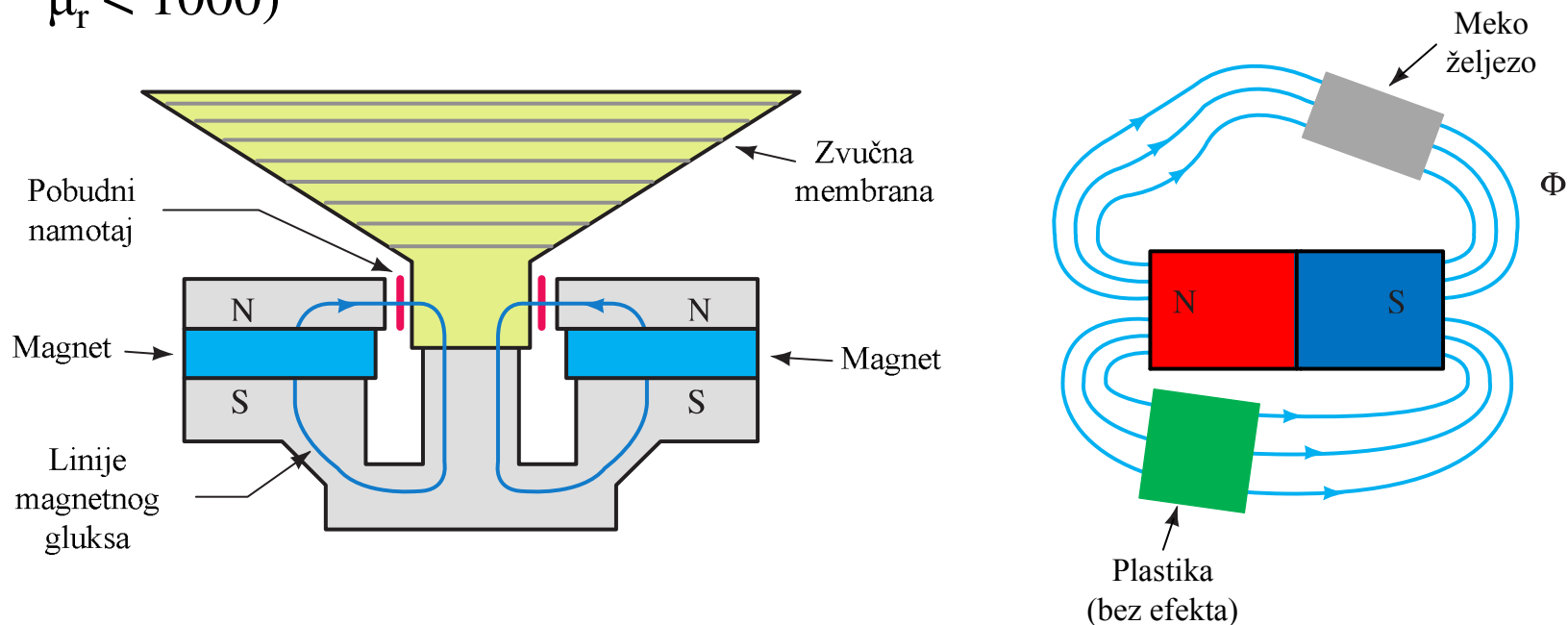
- U ove materijale ubrajamo: **aluminijum** ($\mu_r = 1,00002$), **volfram, platina, krom**
- Nakon uklanjanja vanjskog polja **paramagnetici** se vraćaju u prethodno stanje – stanje bez usmjerenih magnetnih momenata (tačnije, magnetni momenti su potpuno haotično usmjereni)
- **Paramagnetici se ne mogu** namagnetisati

Magnetna indukcija B u magneticima

3. **Feromagnetici** su materijali iz grupe jakih magnetika koji posjeduju permanentne magnetne momente koji su, usljed međusobne interakcije paralelno usmjereni unutar malih oblasti, tzv. domena u materijalu. Usljed djelovanja spoljašnjeg polja feromagnetik se trajno namagnetiše (postaje permanentni magnet)

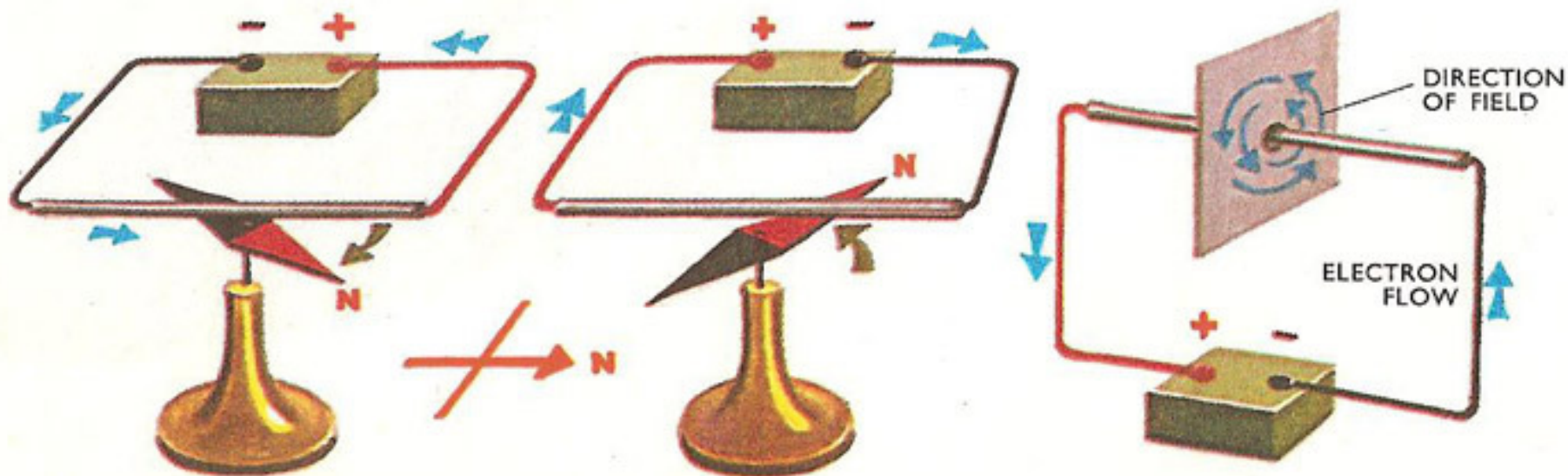
$$\mu_r \gg 1$$

- U ove materijale ubrajamo: željezo, nikal, kobalt i njihove legure ($100 < \mu_r < 1000$)



Elektromagnetizam

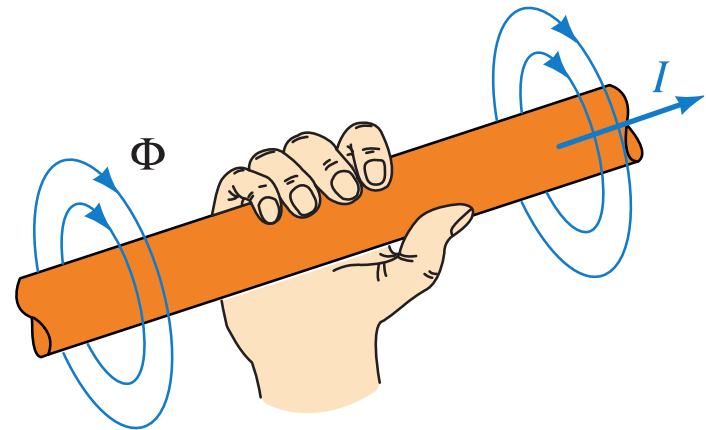
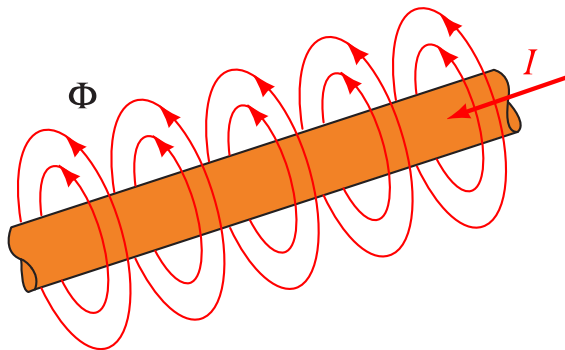
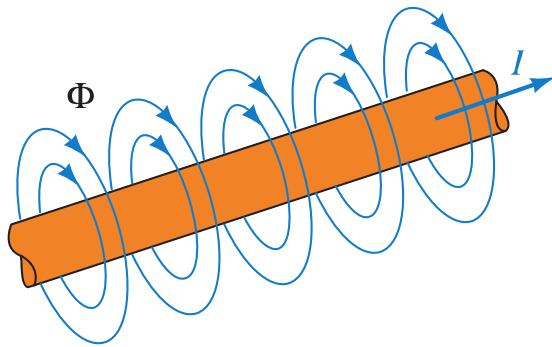
- Godine 1821. Ersted je otkrio da magnetna igla (kompas) skreće sa pravca sever-jug, ako se u njenoj blizini nalazi provodnik kroz koji protiče električna struja
- **Električna struja u okolnom prostoru stvara magnetno polje**
- Eksperimenti ukazuju da ovo magnetno polje, stvoreno strujom ima sve osobine magnetnog polja koje potiče od permanentnog magneta



Erstedov eksperiment

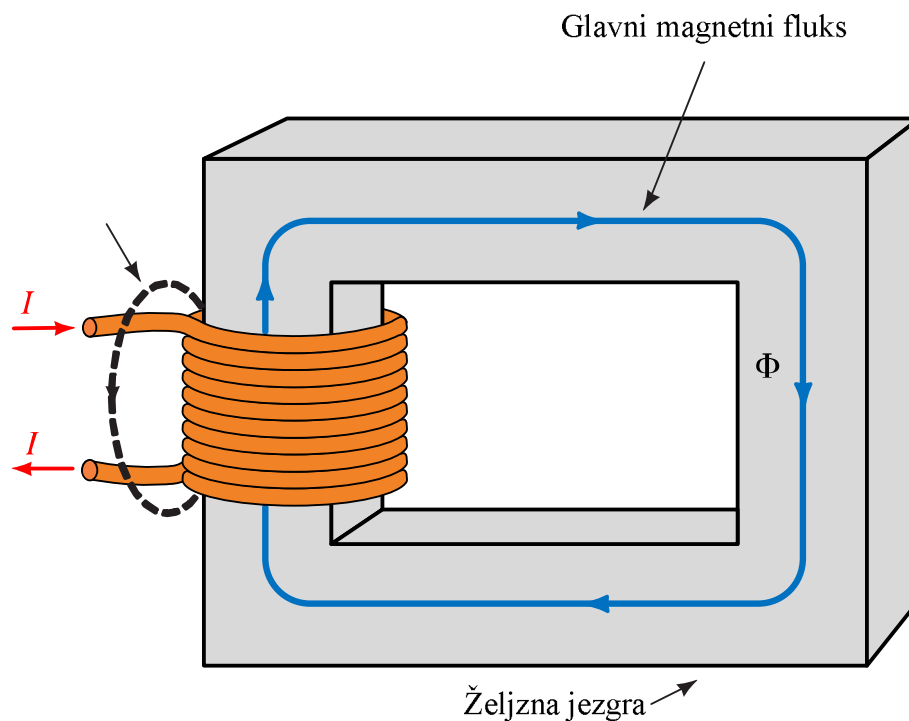
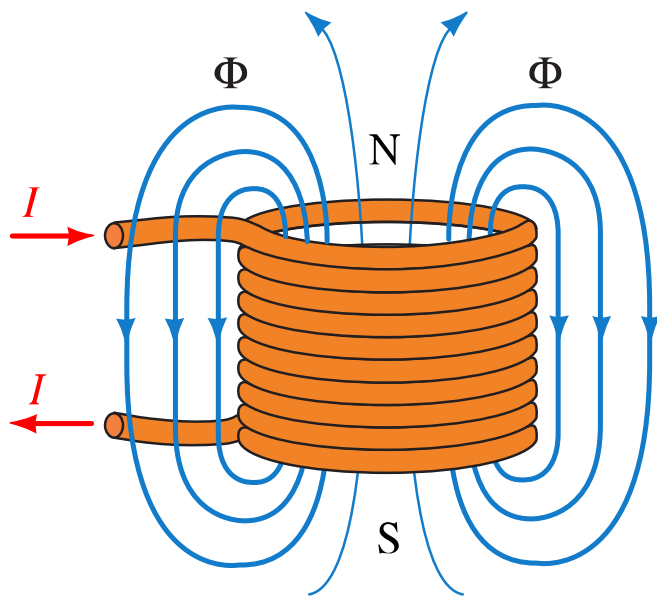
Magnetno polje ravnog provodnika sa strujom

- **Struja I** koja teče kroz usamljeni provodnika u njegovoj okolini stvara **magnetno polje** čije su **linije koncentrične kružnice**
- Smijer polja određuje se **pravilom desne ruke**: Obuhvatimo provodnik tako da izpruženi palac pokazuje smijer struje, tada savijeni prsti pokazuju smijer silnica magnetnog polja



Magnetno polje zavojnice sa strujom

- Rezultantno magnetno polje zavojnice određuje se **pravilom desne ruke**: Obuhvatimo zavojnicu tako da savijeni prsti desne ruke pokazuju smjer struje kroz navoje, tada ispruženi palac desne ruke pokazuje smjer magnetnog polja
- Ako se zavojnica namota na nekom feromagnetnom materijalu većina silnica magnetnog fluksa prolazi kroz feromagnetni materijal, a samo mali dio kroz okolni vazduh

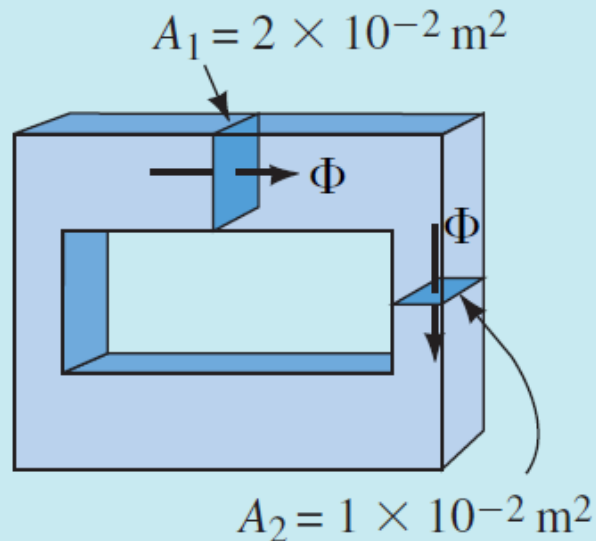


Magnetni fluks i magnetna indukcija

Primjer:

EXAMPLE 12–1 For the magnetic core of Figure 12–9, the flux density at cross section 1 is $B_1 = 0.4 \text{ T}$. Determine B_2 .

FIGURE 12–9



Solution $\Phi = B_1 \times A_1 = (0.4 \text{ T})(2 \times 10^{-2} \text{ m}^2) = 0.8 \times 10^{-2} \text{ Wb}$. Since all flux is confined to the core, the flux at cross section 2 is the same as at cross section 1. Therefore,

$$B_2 = \Phi/A_2 = (0.8 \times 10^{-2} \text{ Wb})/(1 \times 10^{-2} \text{ m}^2) = 0.8 \text{ T}$$

Magnetni fluks i magnetna indukcija

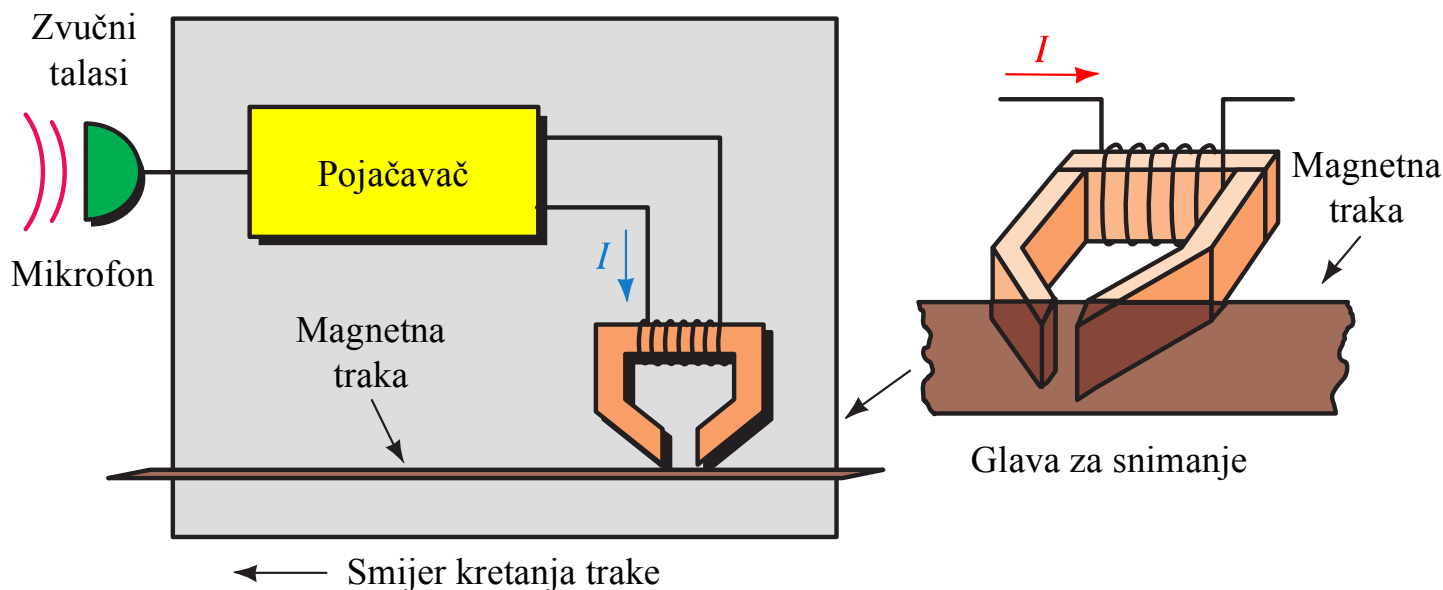
Primjer:

1. Refer to the core of Figure 12–8:
 - a. If A is $2\text{ cm} \times 2.5\text{ cm}$ and $B = 0.4\text{ T}$, compute Φ in webers.
 - b. If A is 0.5 inch by 0.8 inch and $B = 0.35\text{ T}$, compute Φ in webers.
2. In Figure 12–9, if $\Phi = 100 \times 10^{-4}\text{ Wb}$, compute B_1 and B_2 .

Answers: 1. a. $2 \times 10^{-4}\text{ Wb}$ b. $90.3\text{ }\mu\text{Wb}$ 2. 0.5 T ; 1.0 T

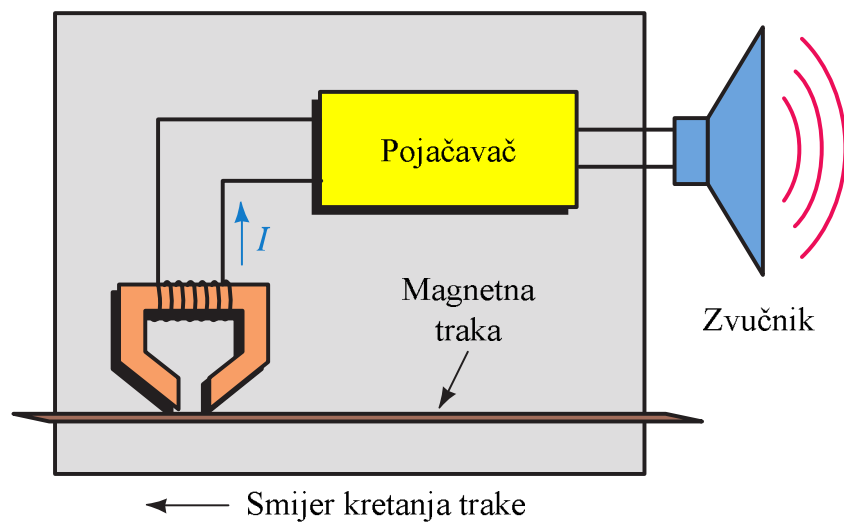
Magnetno kolo

- U praktičnim primjenama magneta **magnetne strukture** se koriste za **provođenje i oblikovanje silnica magnetnog polja**
- Takve strukture se zovu **magnetna kola**
- Magnetna kola nalazimo u motorima, generatorima, tvrdim diskovima računara, magnetnim memorijskim trakama, ...

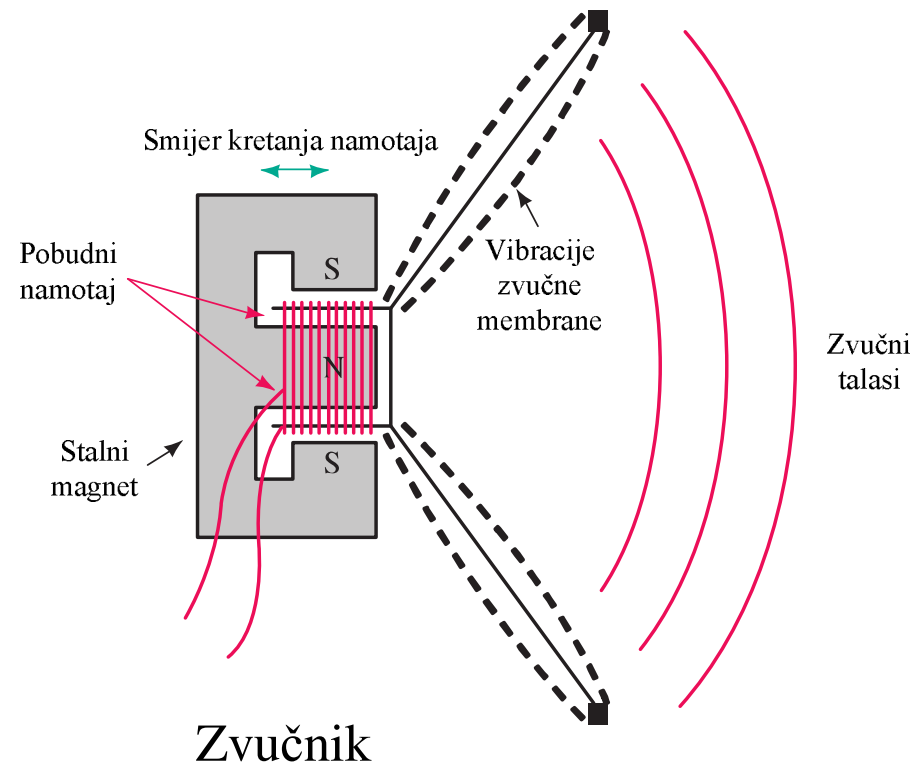


Snimanje zvuka na magnetnu traku

Magnetno kolo – praktične primjene

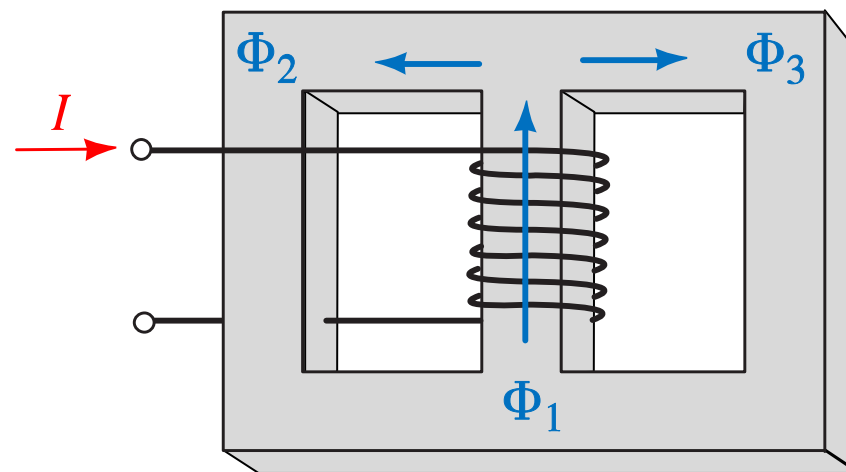
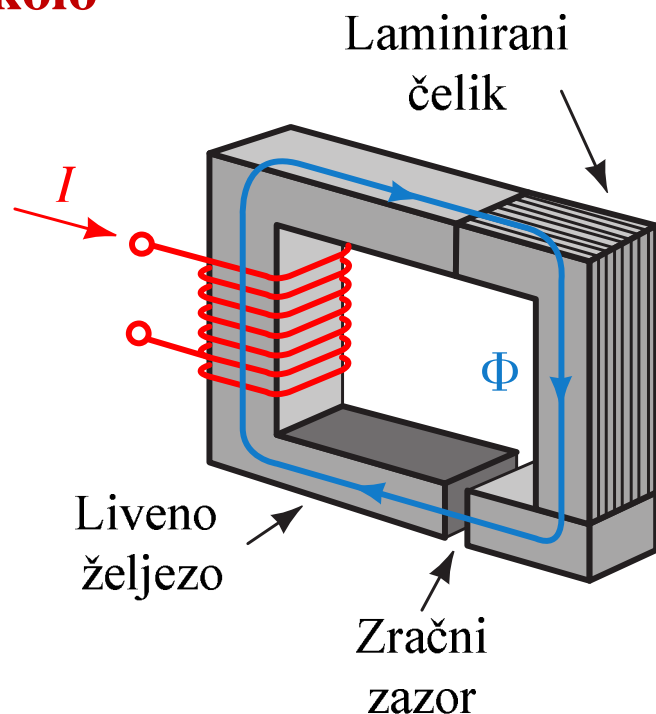


Reprodukcija zvuka sa
magnetne trake



Šerijska i paralelna magnetna kola

- Magnetna kola u opštem slučaju mogu biti sastavljena od različitih materijala: liveno željezo, laminirani čelik, zračni procjep,...
- Ako jedan te isti **magnetni fluks Φ** protiče kroz sve dijelove kola, tada se takvo kolo naziva **serijsko magnetno kolo**
- Ako magnetno kolo posjeduje **grane** koje omogućavaju grananje **magnetnog fluksa Φ** onda se takvo kolo naziva **paraleleno magnetno kolo**

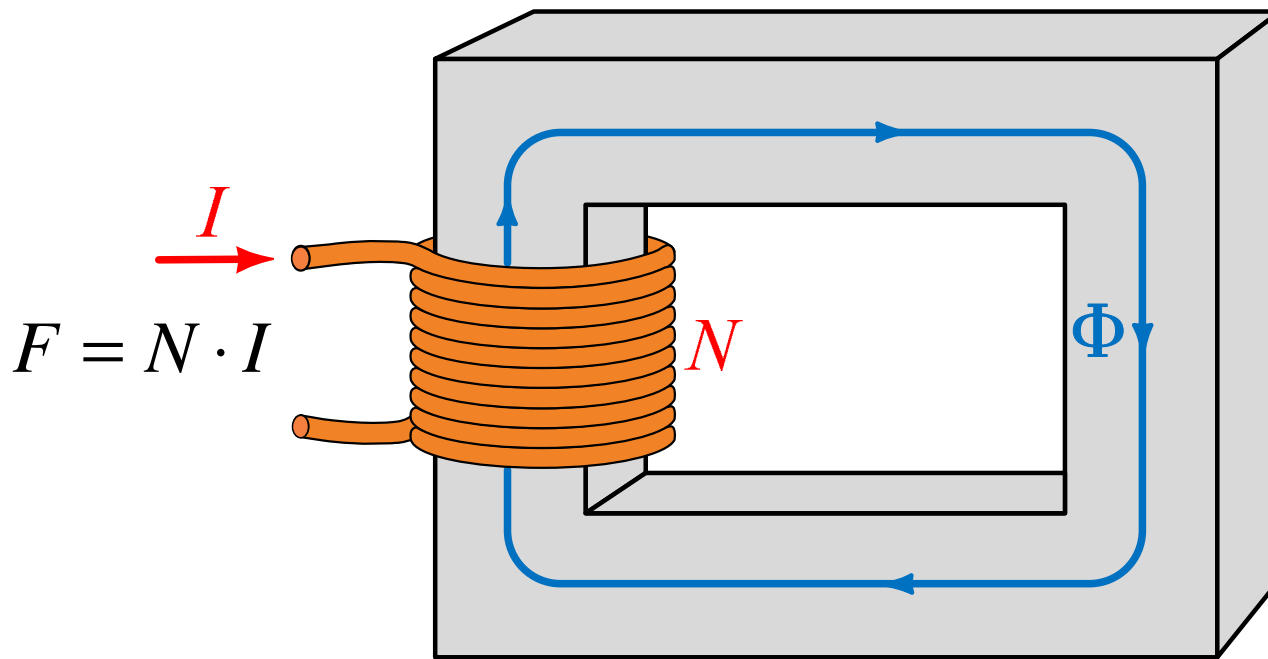


$$\Phi_1 = \Phi_2 + \Phi_3$$

Magnetno kolo sa jednosmjernom pobudom

- Struja I koja protiče kroz namotaj sa N zavoja su magnetnom kolu stvara magnetni fluks Φ
- Proizvod struje I i broja navojaka N predstavlja magnetomotornu silu F

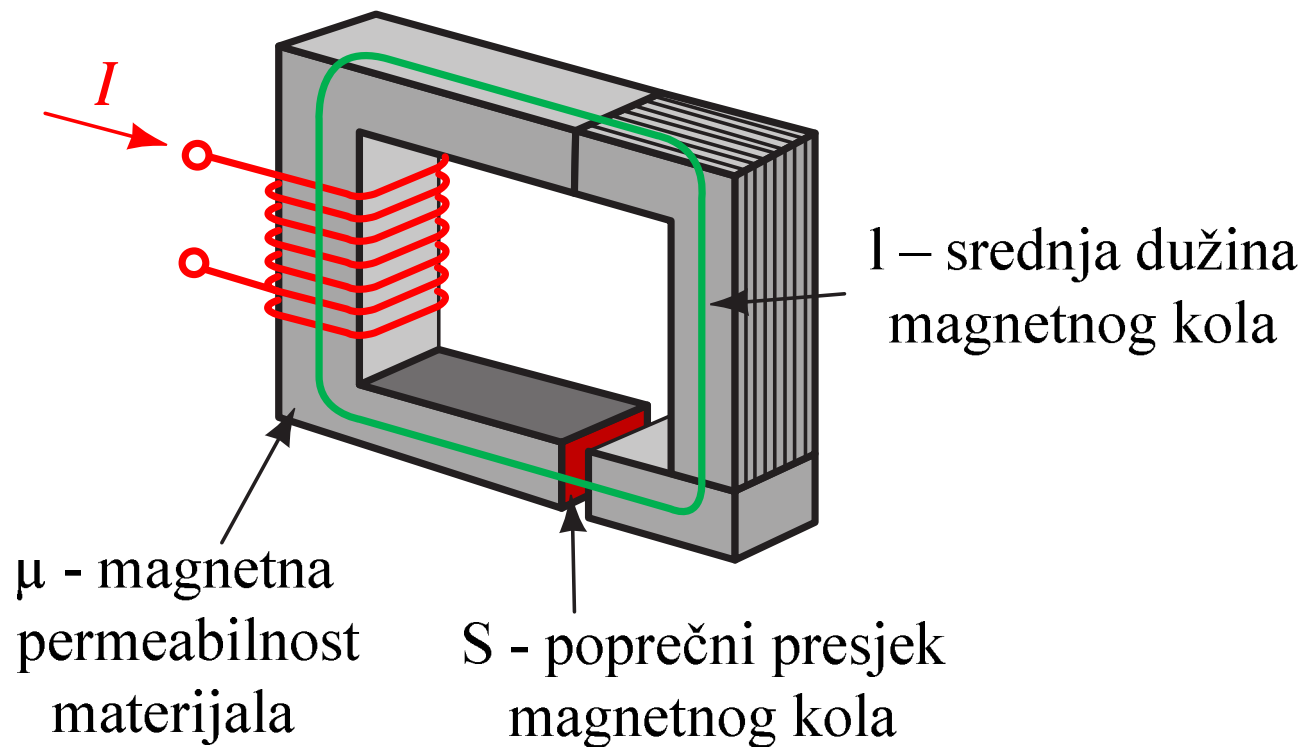
$$F = N \cdot I \text{ (Amper – zavoja)}$$



Otpor magnetnog kola - reluktansa

- Analogno električnoj otpornosti i **magnetno kolo** posjeduje **otpornost** kojom se protivi proticanju **magnetnog fluksa Φ** . Ta otpornost se naziva **magnetna reluktansa R_m** :

$$R_m = \frac{l}{\mu \cdot S} \text{ (Amper - zavoja / Wb)}$$



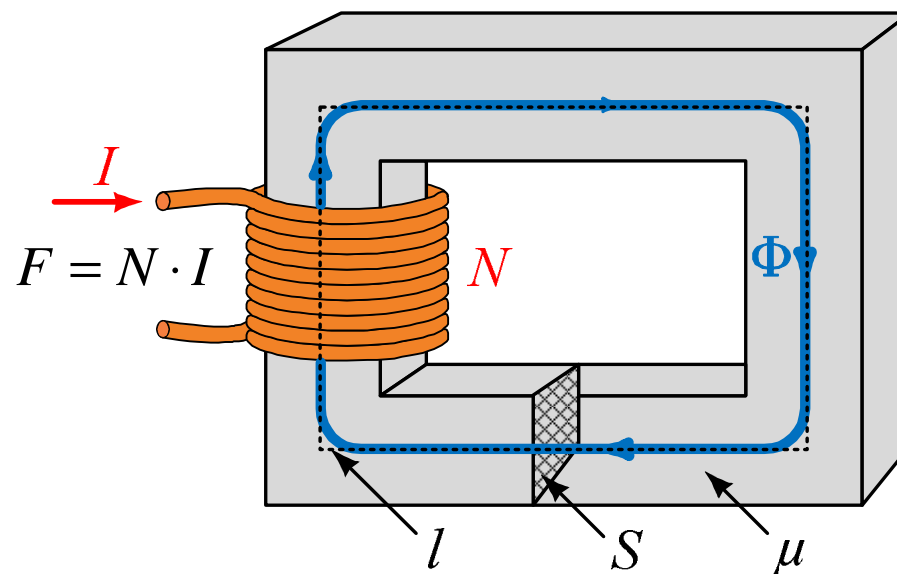
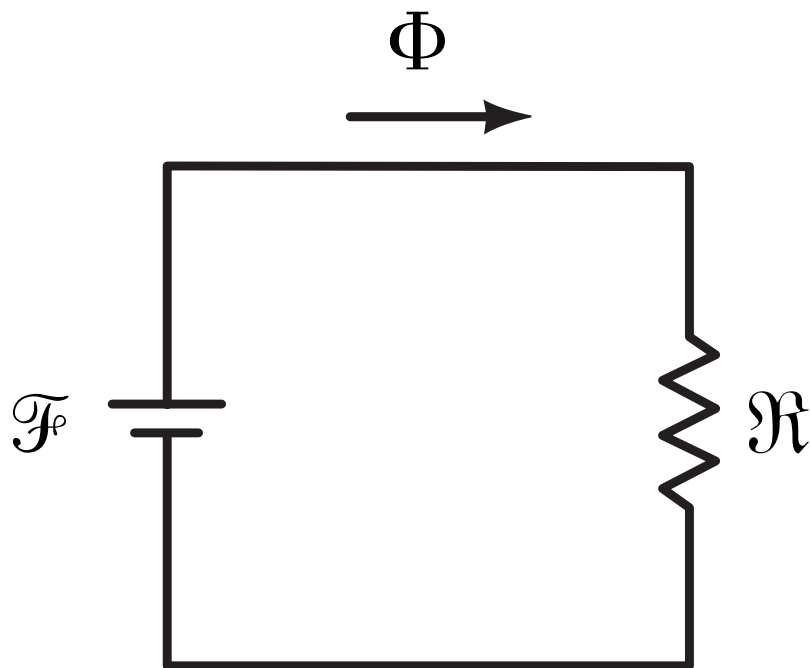
Omov zakon u magnetnom kolu

- Veza između **magnetnog fluksa Φ** , **magnetomotorne sile (mms) F** i **reluktanse R** poznata je kao **Omov zakon** u magnetnom kolu:

$$\Phi = \frac{F}{R_m} \text{ [Wb]}$$

$$F = \Phi \cdot R_m \text{ [A-zav.]}$$

$$R_m = \frac{F}{\Phi} \text{ [A-zav./Wb]}$$



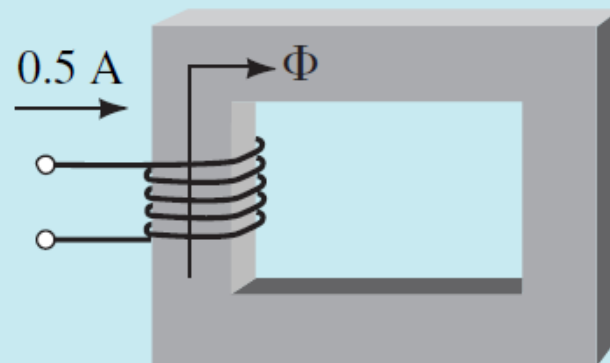
$$R_m = \frac{l}{\eta \cdot S}$$

Omov zakon u magnetnom kolu

Primjer:

EXAMPLE 12-3 For Figure 12-16, if the reluctance of the magnetic circuit is $\mathfrak{R} = 12 \times 10^4 \text{ At/Wb}$, what is the flux in the circuit?

FIGURE 12-16



$N = 300$ turns

Solution

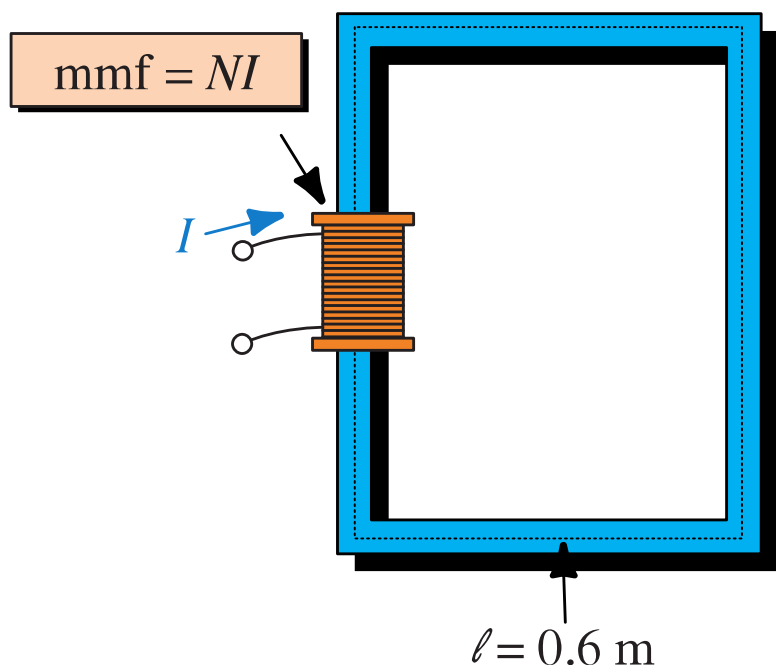
$$\mathcal{F} = NI = (300)(0.5 \text{ A}) = 150 \text{ At}$$

$$\Phi = \mathcal{F}/\mathfrak{R} = (150 \text{ At})/(12 \times 10^4 \text{ At/Wb}) = 12.5 \times 10^{-4} \text{ Wb}$$

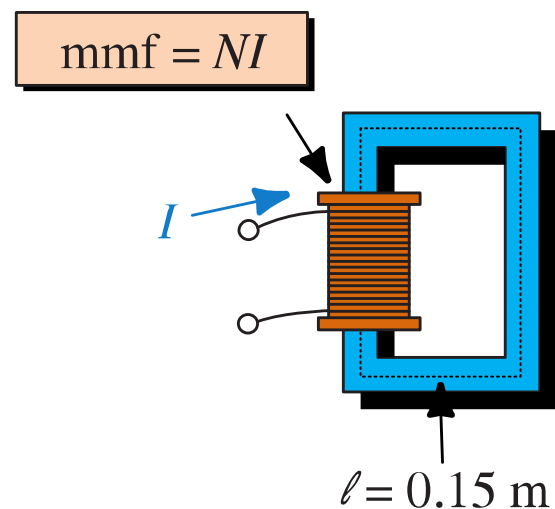
Jačina magnetnog polja H

- Odnos između primjenjene magnetomotorne sile (mms) F i srednje dužine magnetnog kola l predstavlja **jačinu magnetnog kola H**

$$H = \frac{F}{l} = \frac{N \cdot I}{l} \left(\frac{A - zav.}{m} \right)$$



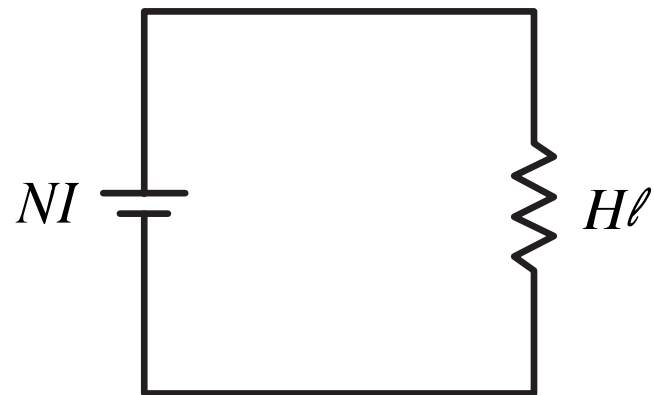
Velika srednja dužina magnetnog kola



Mala srednja dužina magnetnog kola

Jačina magnetnog polja H – pad mms

- Jednačina $H = \frac{N \cdot I}{l}$ može se napisati u obliku: $N \cdot I = H \cdot l$
- Po analogiji sa električnim kolom, ako **magmetomotorna sila (mms) $N \cdot I$** predstavlja **izvor**, onda proizvod **$H \cdot l$** predstavlja **pad magnetomotorne sile (magnetni napon)**
- Magnetno kolo se po analogiji sa električnim može predstaviti elvivalentnom šemom



$$NI = H\ell$$

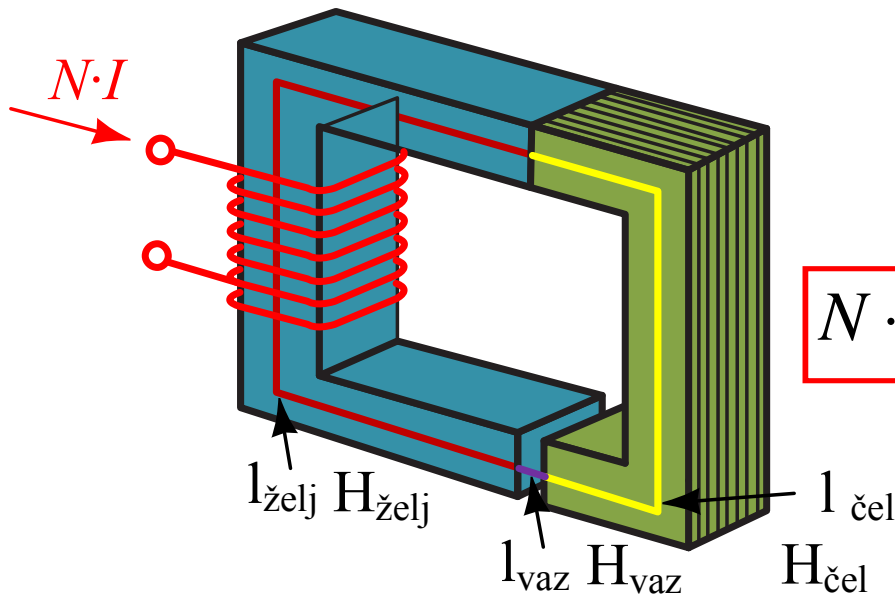
Amperov zakon u magnetnom kolu

- Amperov zakon je određen eksperimentalno i predstavlja generalizaciju veze između magnetomotornih sila (mms) $N \cdot I$ i magnetnih napona $H \cdot l$

Amperov zakon glasi: U zatvorenom magnetnom kolu **suma magnetomotornih sila $N \cdot I$ jednaka je sumi magnetnih napona $H \cdot l$**

$$\sum N \cdot I = \sum H \cdot l$$

$$\sum N \cdot I - \sum H \cdot l = 0$$

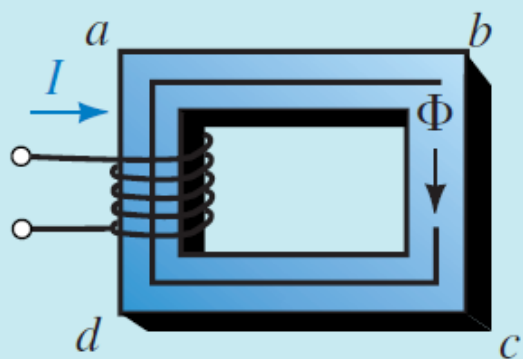


$$N \cdot I = H_{\text{želj}} \cdot l_{\text{želj}} + H_{\text{vaz}} \cdot l_{\text{vaz}} + H_{\text{čel}} \cdot l_{\text{čel}}$$

Amperov zakon u magnetnom kolu

Primjer:

EXAMPLE 12-5 If the core of Figure 12-24 is cast iron and $\Phi = 0.1 \times 10^{-3} \text{ Wb}$, what is the coil current?



Mean length $abcd a = 0.25 \text{ m}$

$N = 500$ turns

$A = 0.2 \times 10^{-3} \text{ m}^2$

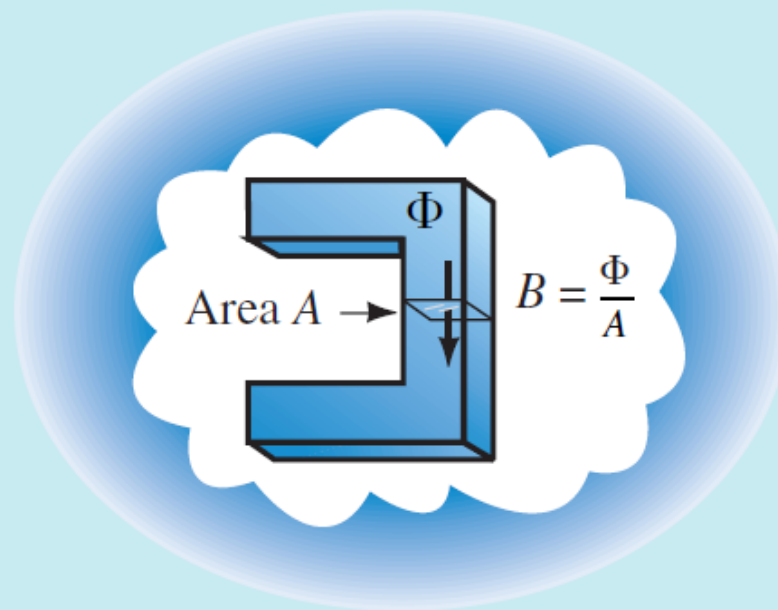


FIGURE 12-24

Amperov zakon u magnetnom kolu

Primjer:

Solution Following the four steps outlined above:

1. The flux density is

$$B = \frac{\Phi}{A} = \frac{0.1 \times 10^{-3}}{0.2 \times 10^{-3}} = 0.5 \text{ T}$$

2. From the B - H curve (cast iron), Figure 12–19, $H = 1550 \text{ At/m}$.

3. Apply Ampere's law. There is only one coil and one core section. Length = 0.25 m. Thus,

$$NI = H\ell = 1550 \times 0.25 = 388 \text{ At}$$

4. Divide by N :

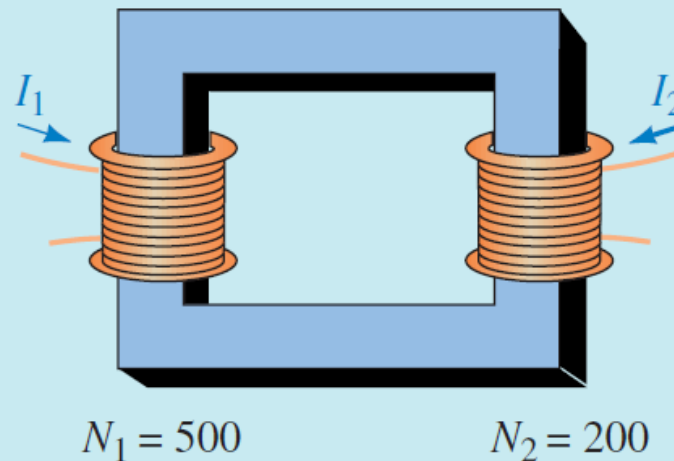
$$I = 388/500 = 0.78 \text{ amps}$$

Amperov zakon u magnetnom kolu

Primjer:

EXAMPLE 12-6 A second coil is added as shown in Figure 12-25. If $\Phi = 0.1 \times 10^{-3} \text{ Wb}$ as before, but $I_1 = 1.5 \text{ amps}$, what is I_2 ?

FIGURE 12-25



Solution From the previous example, you know that a current of 0.78 amps in coil 1 produces $\Phi = 0.1 \times 10^{-3} \text{ Wb}$. But you already have 1.5 amps in coil 1. Thus, coil 2 must be wound in opposition so that its mmf is subtractive. Applying Ampere's law yields $N_1 I_1 - N_2 I_2 = H\ell$. Hence,

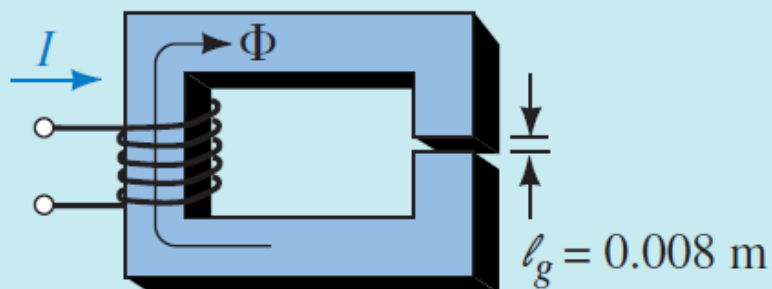
$$(500)(1.5 \text{ A}) - 200I_2 = 388 \text{ At}$$

and so $I_2 = 1.8 \text{ amps}$.

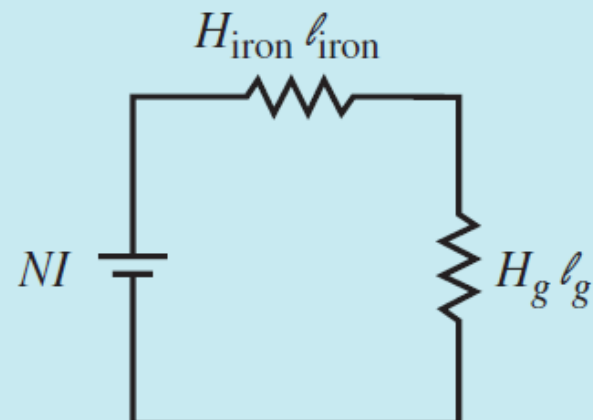
Amperov zakon u magnetnom kolu

Primjer:

EXAMPLE 12-7 The core of Figure 12-24 has a 0.008-m gap cut as shown in Figure 12-26. Determine how much the current must increase to maintain the original core flux. Neglect fringing.



(a)



(b)

FIGURE 12-26

Amperov zakon u magnetnom kolu

Primjer:

Solution

Iron

$\ell_{\text{iron}} = 0.25 - 0.008 = 0.242$ m. Since Φ does not change, B and H will be the same as before. Thus, $B_{\text{iron}} = 0.5$ T and $H_{\text{iron}} = 1550$ At/m.

Air Gap

B_g is the same as B_{iron} . Thus, $B_g = 0.5$ T and $H_g = 7.96 \times 10^5 B_g = 3.98 \times 10^5$ At/m.

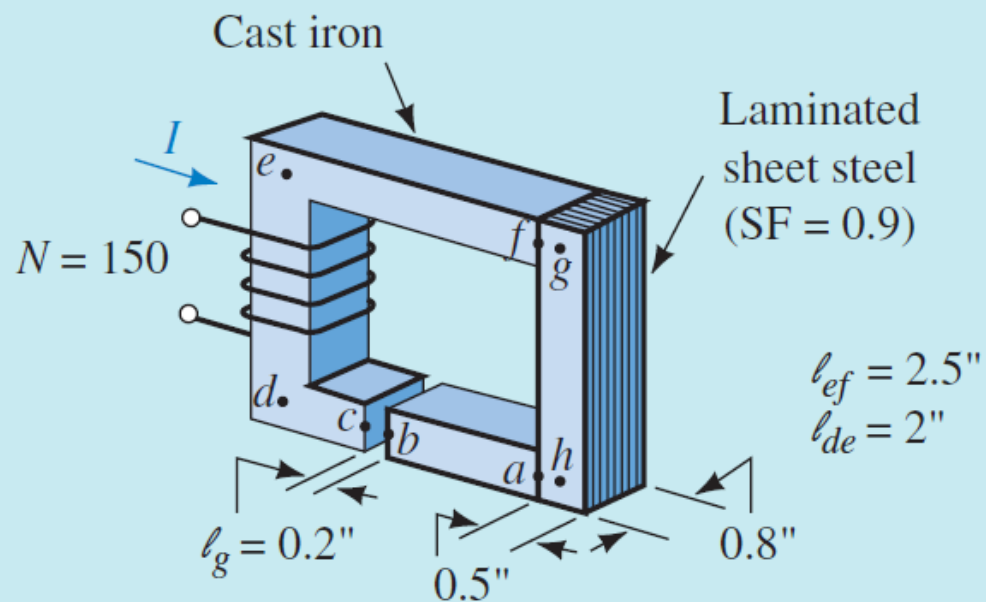
Ampere's Law

$NI = H_{\text{iron}}\ell_{\text{iron}} + H_g\ell_g = (1550)(0.242) + (3.98 \times 10^5)(0.008) = 375 + 3184 = 3559$ At. Thus, $I = 3559/500 = 7.1$ amps. Note that the current had to increase from 0.78 amp to 7.1 amps in order to maintain the same flux, over a ninefold increase.

Amperov zakon u magnetnom kolu

Primjer:

EXAMPLE 12-8 The laminated sheet steel section of Figure 12-27 has a stacking factor of 0.9. Compute the current required to establish a flux of $\Phi = 1.4 \times 10^{-4}$ Wb. Neglect fringing.



Cross section = $0.5'' \times 0.8''$ (all members)
 $\Phi = 1.4 \times 10^{-4}$ Wb

FIGURE 12-27

Amperov zakon u magnetnom kolu

Primjer:

Solution Convert all dimensions to metric.

Cast Iron

$$\ell_{\text{iron}} = \ell_{ab} + \ell_{cdef} = 2.5 + 2 + 2.5 - 0.2 = 6.8 \text{ in} = 0.173 \text{ m}$$

$$A_{\text{iron}} = (0.5 \text{ in})(0.8 \text{ in}) = 0.4 \text{ in}^2 = 0.258 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$B_{\text{iron}} = \Phi/A_{\text{iron}} = (1.4 \times 10^{-4})/(0.258 \times 10^{-3}) = 0.54 \text{ T}$$

$$H_{\text{iron}} = 1850 \text{ At/m} \quad (\text{from Figure 12-19})$$

Sheet Steel

$$\ell_{\text{steel}} = \ell_{fg} + \ell_{gh} + \ell_{ha} = 0.25 + 2 + 0.25 = 2.5 \text{ in} = 6.35 \times 10^{-2} \text{ m}$$

$$A_{\text{steel}} = (0.9)(0.258 \times 10^{-3}) = 0.232 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$B_{\text{steel}} = \Phi/A_{\text{steel}} = (1.4 \times 10^{-4})/(0.232 \times 10^{-3}) = 0.60 \text{ T}$$

$$H_{\text{steel}} = 125 \text{ At/m} \quad (\text{from Figure 12-19})$$

Amperov zakon u magnetnom kolu

Primjer:

Air Gap

$$\ell_g = 0.2 \text{ in} = 5.08 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$B_g = B_{\text{iron}} = 0.54 \text{ T}$$

$$H_g = (7.96 \times 10^5)(0.54) = 4.3 \times 10^5 \text{ At/m}$$

Ampere's Law

$$\begin{aligned} NI &= H_{\text{iron}}\ell_{\text{iron}} + H_{\text{steel}}\ell_{\text{steel}} + H_g\ell_g \\ &= (1850)(0.173) + (125)(6.35 \times 10^{-2}) + (4.3 \times 10^5)(5.08 \times 10^{-3}) \\ &= 320 + 7.9 + 2184 = 2512 \text{ At} \end{aligned}$$

$$I = 2512/N = 2512/150 = 16.7 \text{ amps}$$

Veza između B i H

- Na osnovu **Omogovog zakona** u magnetnom kolu važi: $\Phi \cdot R_m = N \cdot I$
- Zamjenom $N \cdot I = H \cdot l$ Omov zakon postaje: $\Phi \cdot R_m = H \cdot l$
- Zamjenom magnetne reluktanse u posljedni izraz dobija se:

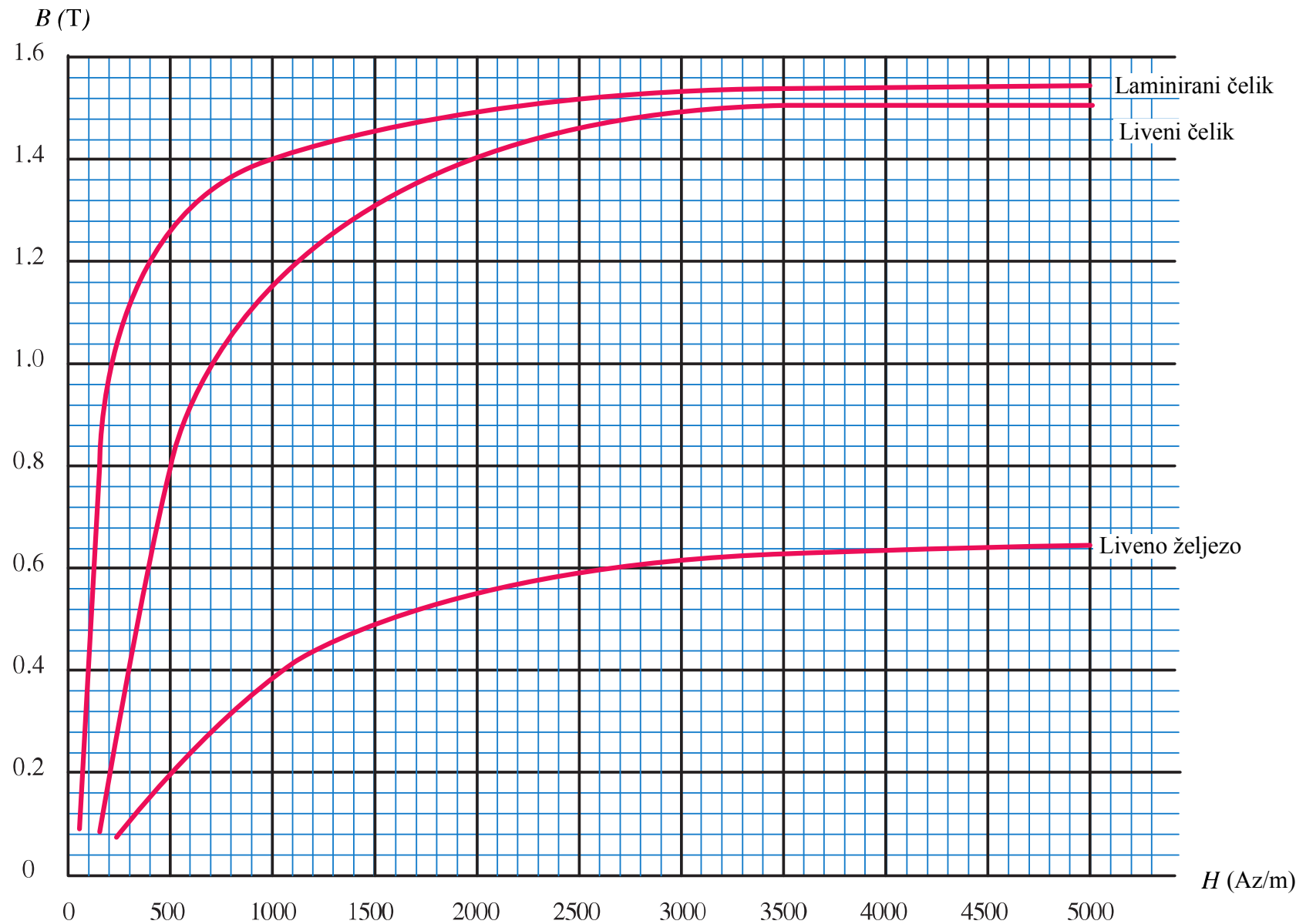
$$\Phi \cdot \frac{l}{\mu \cdot S} = H \cdot l$$

- Sređivanjem posljednjeg izraza dobija se veza između B i H:

$$\frac{\Phi}{S} = \mu \cdot H \Rightarrow B = \mu \cdot H$$

- Kod feromagnetnih materijala magnetna permeabilnost μ nije konstantna i teško se analitički izračunava
- Veza između B i H obično se daje **grafičkim putem preko krive magnetizacije**

Veza između B i H



Veza između B i H

Primjer:

EXAMPLE 12-4 If $B = 1.4$ T for sheet steel, what is H ?

Solution Enter Figure 12-19 on the axis at $B = 1.4$ T, continue across until you encounter the curve for sheet steel, then read the corresponding value for H as indicated in Figure 12-20: $H = 1000$ At/m.

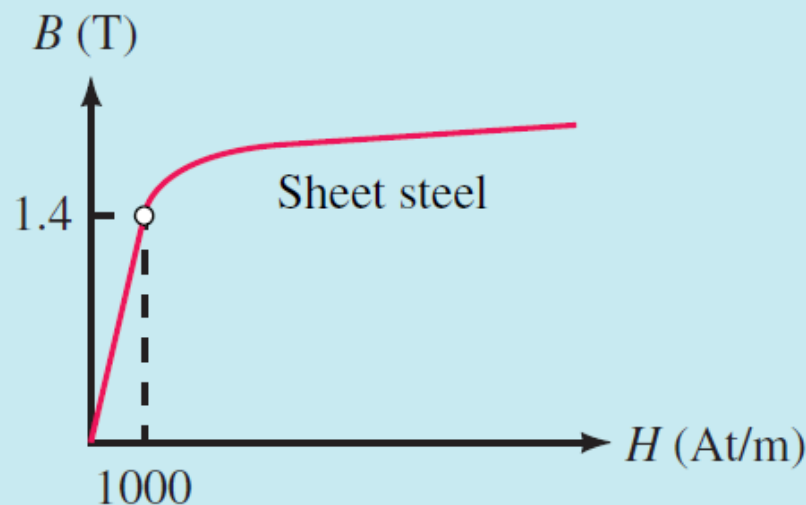


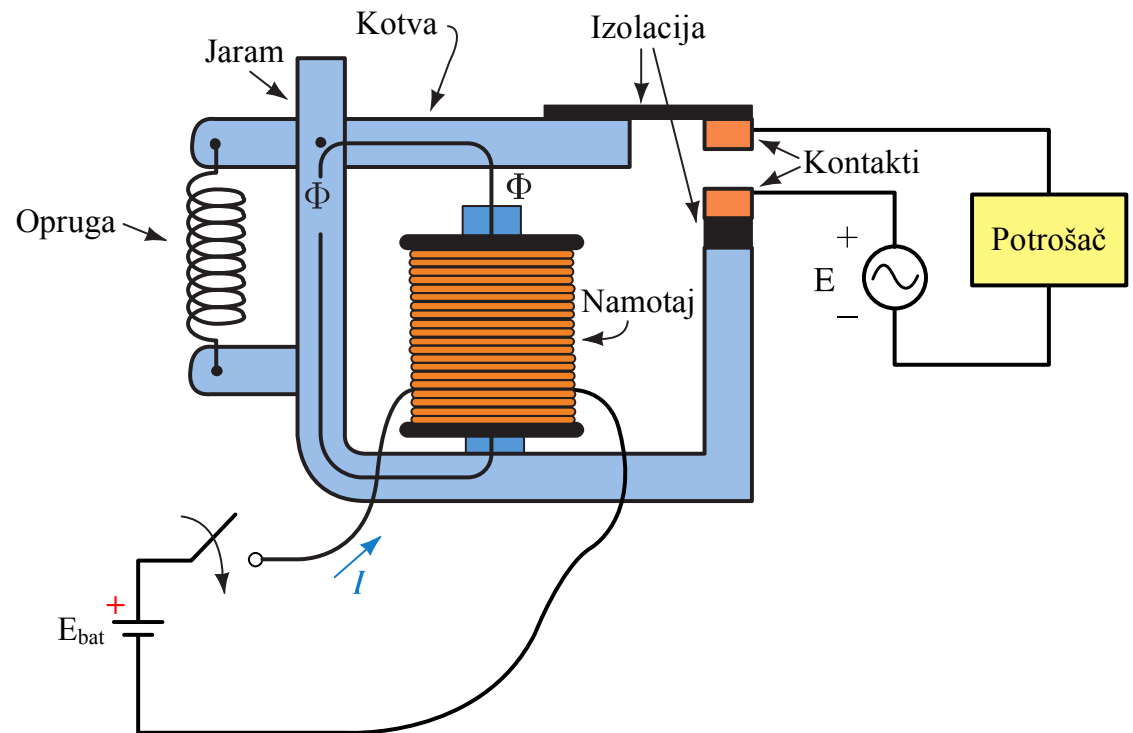
FIGURE 12-20 For sheet steel, $H = 1000$ At/m when $B = 1.4$ T.

Elektromehanička sila elektromagneta

- Elektromagneti se koriste u relejima, solenoidima kućnim zvoncima, magnetima za dizanje tereta, itd...
- Mehanička sila kod elektromagnetnih releja koja pokreće kotvu i zatvara kontakte releja data je izrazom:

$$F = \frac{B_g^2 \cdot S_g}{2\mu_0} [N - Njutn]$$

- B_g – Jačina magnetne indukcije u zračnom zazoru releja
- S_g – poprečni presjek zračnog zazora



Elektromehanička sila elektromagneta

Primjer:

EXAMPLE 12-14 Figure 12-33 shows a typical relay. The force due to the current-carrying coil pulls the pivoted arm against spring tension to close the contacts and energize the load. If the pole face is $\frac{1}{4}$ inch square and $\Phi = 0.5 \times 10^{-4}$ Wb, what is the pull on the armature in pounds?



FIGURE 12-33 A typical relay.

Elektromehanička sila elektromagneta

Primjer:

Solution Convert to metric units.

$$A_g = (0.25 \text{ in})(0.25 \text{ in}) = 0.0625 \text{ in}^2 = 0.403 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$B_g = \Phi/A_g = (0.5 \times 10^{-4})/(0.403 \times 10^{-4}) = 1.24 \text{ T}$$

Thus,

$$F = \frac{B_g^2 A}{2\mu_0} = \frac{(1.24)^2 (0.403 \times 10^{-4})}{2(4\pi \times 10^{-7})} = 24.66 \text{ N} = 5.54 \text{ lb}$$