

3.

ELEKTROMAGNETIZAM

STALNA ELEKTROMAGNETNA POLJA

U prirodi su magnetne pojave prvi put uočene u okolini rude gvožđa magnetita, koja se ponaša kao stalni magnet.

Magnetne pojave postoje i u okolini svakog naelektrisanja koje se kreće. Zato je za objašnjavanje osnovnih magnetnih pojava uzeta mala zamišljena strujna kontura nekog naelektrisanja u kretanju (slično kao probno naelektrisanje u elektrostatici).

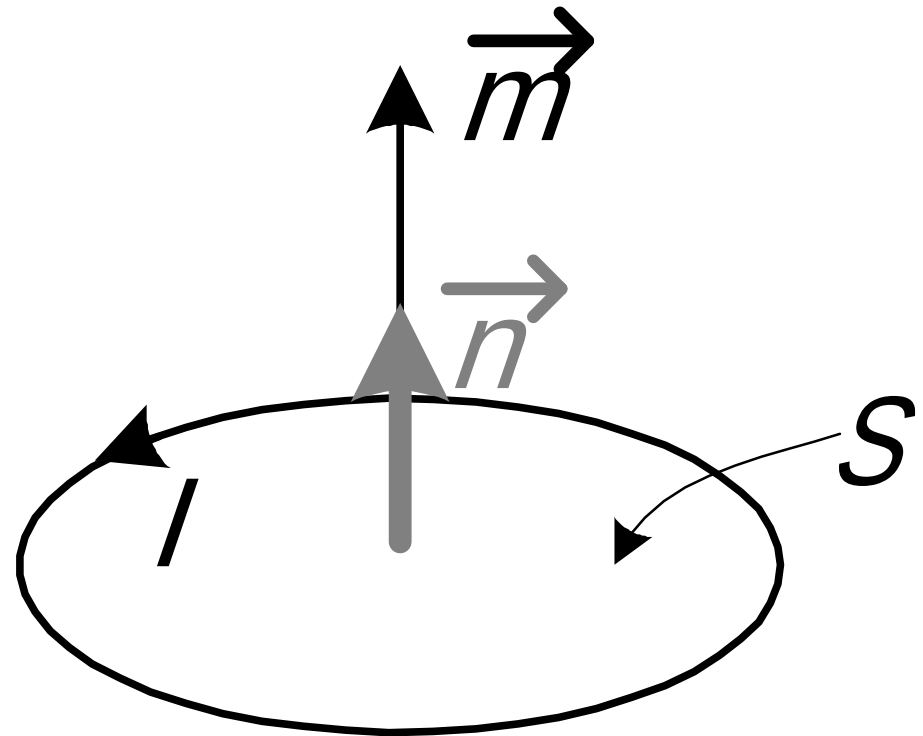
Šta je glavni parametar strujne konture?

Glavni parametar strujne konture (svake, pa i probne) je njen magnetni moment:

$$\vec{m} = I \cdot \vec{S}$$

Njega čine proizvod struje te električne strujne konture i orijentisane površine te strujne konture. Površina je orijentisana jediničnim vektorom normale:

$$\vec{S} = I \cdot \vec{n}$$



Šta se dogodi ako probnu konturu unesemo u magnetno polje?

Kontura će se postaviti tako da će pravac i smer normale na konturi definisati pravac i smer polja. Ako postavimo konturu u neki drugi položaj javiće se mehanički moment sila koji teži da vrati strujnu konturu u prvobitni položaj:

$$\vec{M} = \vec{m} \times \vec{B} = I \cdot \vec{S} \times \vec{B}$$

Brojni eksperimenti pokazuju da maksimalni mehanički moment ne zavisi od oblika konture (potrebno je da je ravna i dovoljno malih dimenzija), već je:

$$|\vec{M}_{\max}| = I \cdot |\vec{S}| \cdot |\vec{B}| \sin(\vec{n}, \vec{B}) = |\vec{m}| \cdot |\vec{B}|$$

MAGNETNA INDUKCIJA

Šta je magnetna indukcija?

Količnik maksimalnog mehaničkog momenta i magnetnog momenta konture:

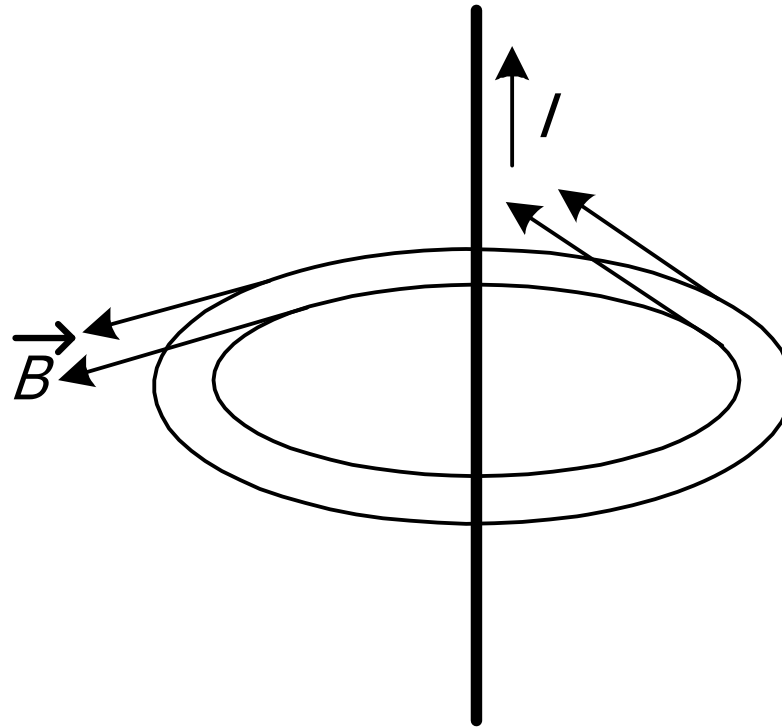
$$|\vec{B}| = \frac{|\vec{M}_{\max}|}{|\vec{m}|}$$

je uvek konstantan i jednak za sve probne konture. Zato je taj odnos proizveden u novu fizičku veličinu magnetnu indukciju.

Magnetna indukcija $\vec{B}$

je vektorska veličina (deluje različito u različitim pravcima i smerovima oko naelektrisanja koja se kreću).

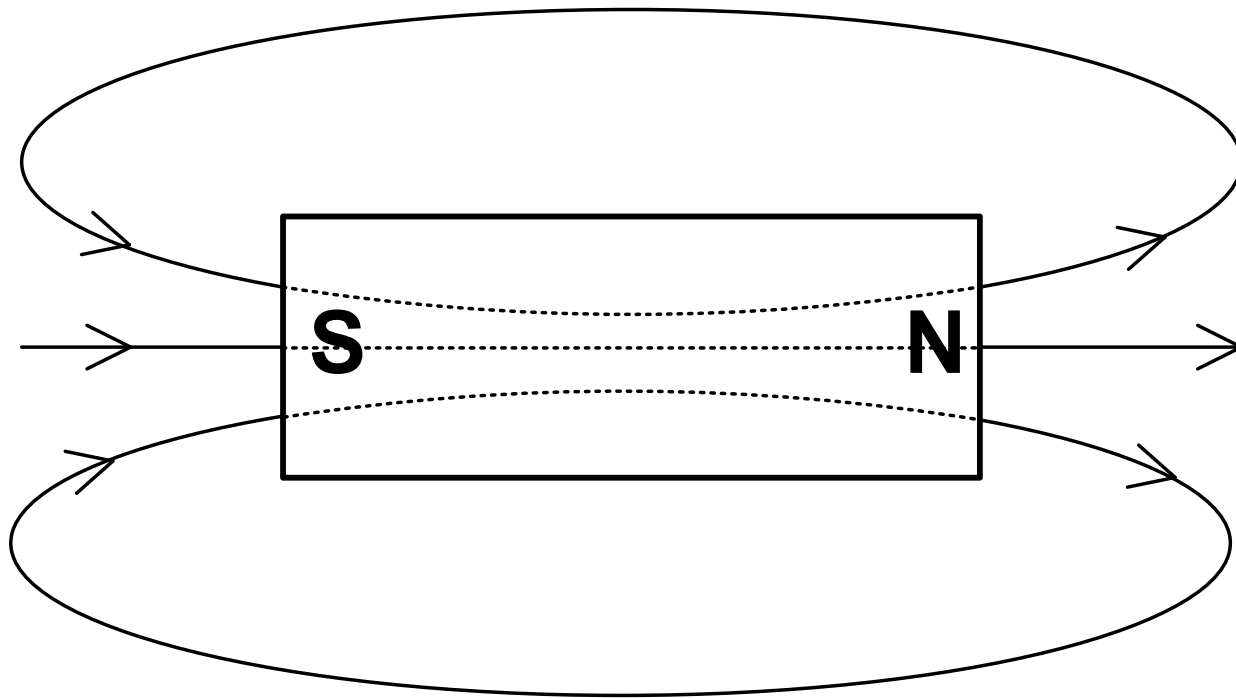
Linije magnetne indukcije u okolini provodnika sa strujom su koncentrične kružnice. Pretpostavlja se da je struja ravnomerno raspoređena po poprečnom preseku provodnika.



Šta su to linije magnetne indukcije?

Linije na koje je vektor magnetne indukcije uvek tangentan.

**Linije magnetne indukcije izvire iz severnog (N),
a uviru u južni (S) pol.**



Koja je jedinica za magnetnu indukciju?

Tesla [T]

Na pravolinijski provodnik dužine l kroz koji protiče električna struja I , koji se nalazi u spoljašnjem magnetnom polju indukcije $\vec{B}$ deluje magnetna sila:

$$\vec{F} = I \cdot \vec{l} \times \vec{B}$$

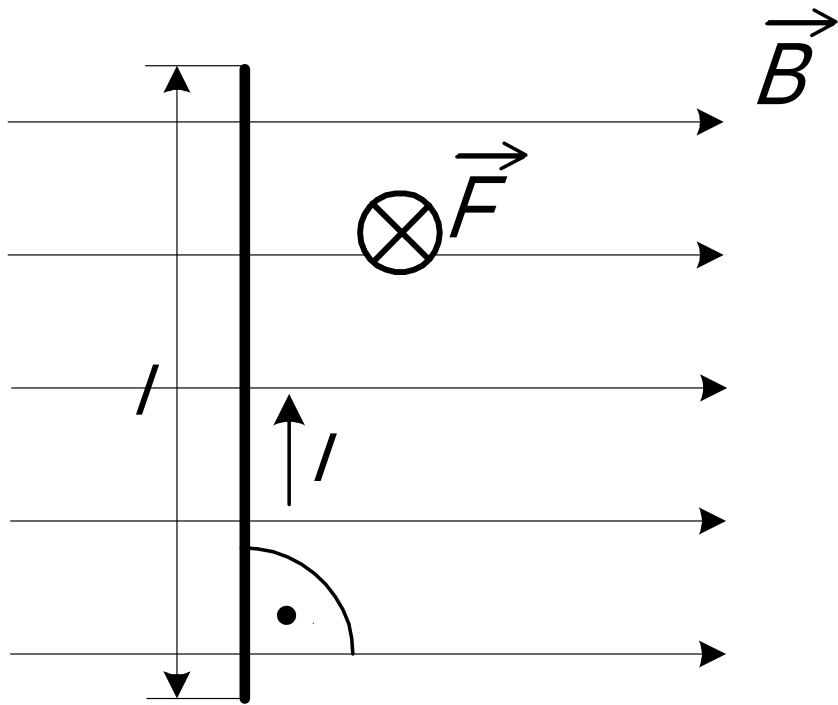
Ako se električna struja posmatra na nivou naelektrisanja koja se kreću, magnetna sila može se izračunati kao:

$$\vec{F} = Q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$$

Ova sila se zove Lorencova sila.

Primer: pravolinijski provodnik dužine l , kroz koji protiče stalna električna struja jačine I , nalazi se u spoljašnjem homogenom magnetnom polju indukcije $\vec{B}$.

Na njega deluje magnetna sila $\vec{F}$, smera kao na slici. (Orijentacija provodnika $\vec{l}$ uzima se prema smeru struje koja kroz njega prolazi.)



$$\vec{F} = I \cdot \vec{l} \times \vec{B}$$

$$|\vec{F}| = I |\vec{l}| \cdot |\vec{B}| \sin(\vec{l}, \vec{B}) = I |\vec{l}| \cdot |\vec{B}| \sin \frac{\pi}{2}$$

$$F = IlB$$

ZADACI:

2.1 Pravolinijski provodnik, dužine $l = 2 \text{ m}$, sa strujom jačine $I = 0.5 \text{ A}$, nalazi se u homogenom magnetnom polju, indukcije $B = 1 \text{ T}$ i postavljen je normalno na linije polja. Odrediti silu koja deluje na provodnik (njen intenzitet, pravac i smer).

OSNOVNI POJMOVI O MAGNETNIM MATERIJALIMA

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

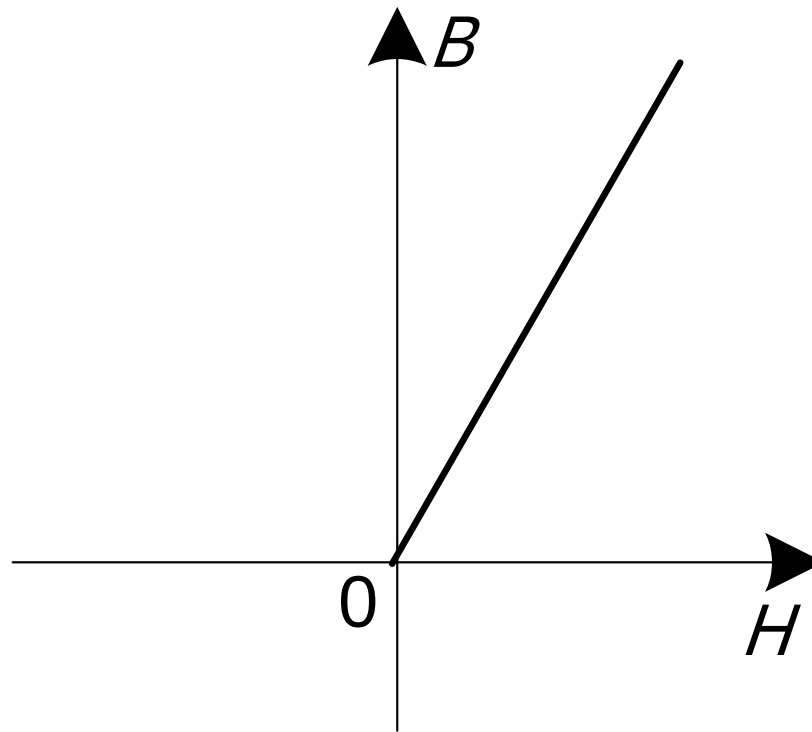
- materijale sa slabim magnetnim uređenjem**
- materijale sa jakim magnetnim uređenjem**

MATERIJALI SA SLABIM MAGNETNIM UREĐENJEM

To 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.

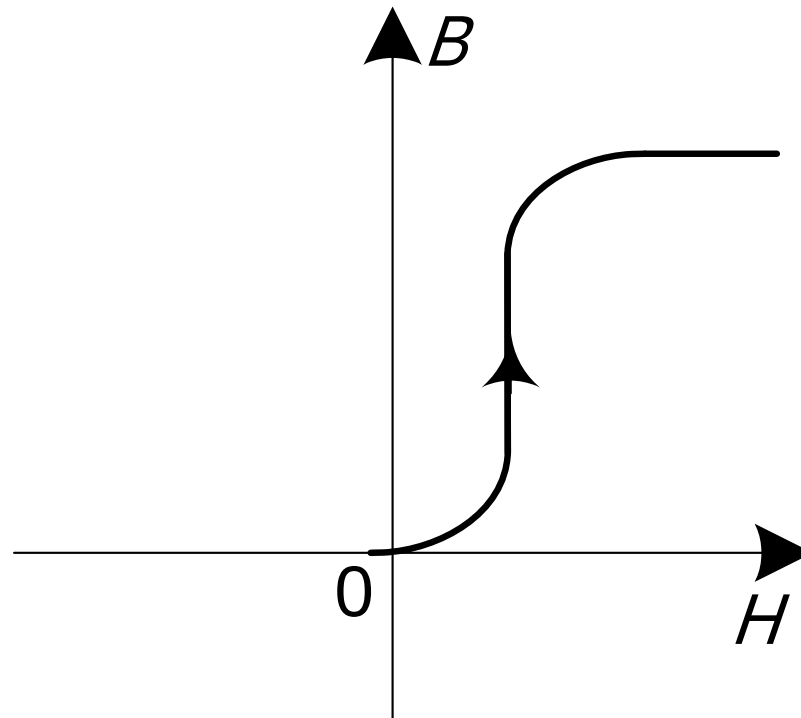


MATERIJALI SA JAKIM MAGNETNIM UREĐENJEM

To 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)**

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



Za primenu u elektrotehnici su najznačajniji fero i ferimagnatici. Oni se mogu podeliti i prema svojoj prvobitnoj krivoj magnećenja na:

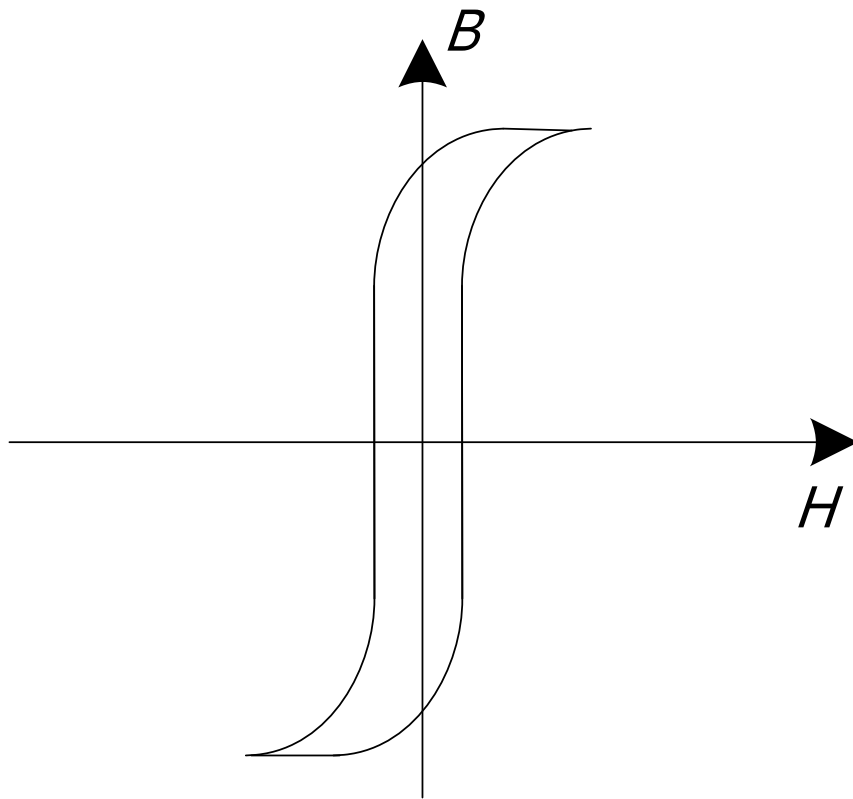
- magnetno meke**
- magnetno tvrde**

MAGNETNO MEKI MATERIJALI

Ovi materijali imaju uspravnu krivu prvobitnog magnećenja (jako veliku relativnu magnetnu permeabilnost μ_r)

Histerezisna petlja im je uska i uspravna, pa su i histerezisni gubici veoma mali.

Primenjuju se u naizmeničnim promenljivim magnetnim poljima, za izradu limova za transformatore i električne mašine.

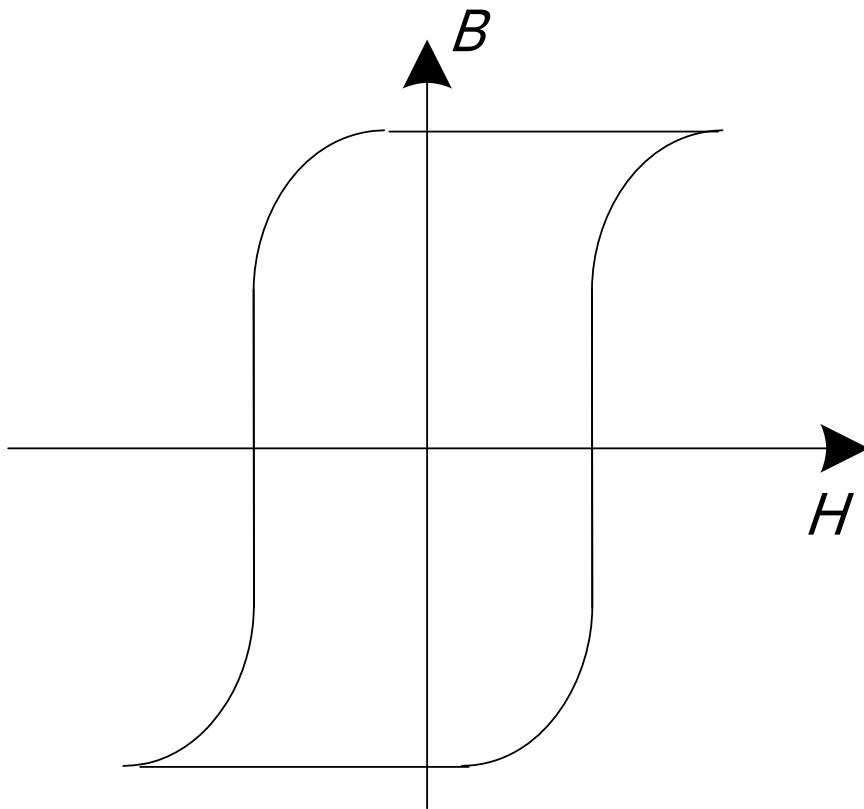


MAGNETNO TVRDI MATERIJALI

Ovi materijali imaju položenu krivu prvobitnog magnećenja (relativna magnetna permeabilnost μ_r im je velika, ali ne kao kod magnetno mekih materijala).

Histeresisna petlja im je položenuja i ima veću površinu, pa su i histeresisni gubici veliki.

Primenjuju se za izradu stalnih magneta (jer bi primena u naizmeničnom polju bila preskupa zbog velikih histerezisnih gubitaka).



AMPEROV ZAKON

Kako glasi Amperov zakon?

Cirkulacija vektora magnetne indukcije duž zatvorene konture jednaka je proizvodu magnetne permeabilnosti vakuma μ_0 i sume svih struja koje ta kontura obuhvata:

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \sum_k I_k$$

μ_0 je magnetna permeabilnost vakuuma i vazduha (i još nekih materijala sa slabim magnetnim uređenjem):

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{N}}{\text{A}^2}$$

ili

$$\frac{\text{H}}{\text{m}}$$

Šta se izračunava Amperovim zakonom?

Vektor magnetne indukcije $\vec{B}$

**Drugim rečima, Amperovim zakonom se posmatra
doprinos vektora**

$\vec{B}$

duž željene konture (putanje).

U kojoj materijalnoj sredini važi Amperov zakon?

U vakuumu, vazduhu i materijalnim sredinama sa slabim magnetnim uređenjem (na primer: paramagneticima).

A u drugim materijalnim sredinama?

U drugim sredinama važi uopšteni Amperov zakon.

U čemu je razlika između Amperovog i uopštenog Amperovog zakona? Zašto uopšte postoje dva zakona?

Uopšteni važi za sve materijalne sredine. Uključuje i magnetizaciju magnetika.

Kako glasi uopšteni Amperov zakon?

**Cirkulacija vektora jačine magnetnog polja duž
zatvorene konture jednaka je sumi svih struja
koje ta kontura obuhvata:**

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum_k I_k$$

Pri tome je vektor jačine magnetnog polja

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M}$$

gde je $\vec{M}$

vektor magnetizacije (vektor gustine magnetnog momenta).

Koja je jedinica za jačinu magnetnog polja?

$$\frac{\text{A}}{\text{m}}$$

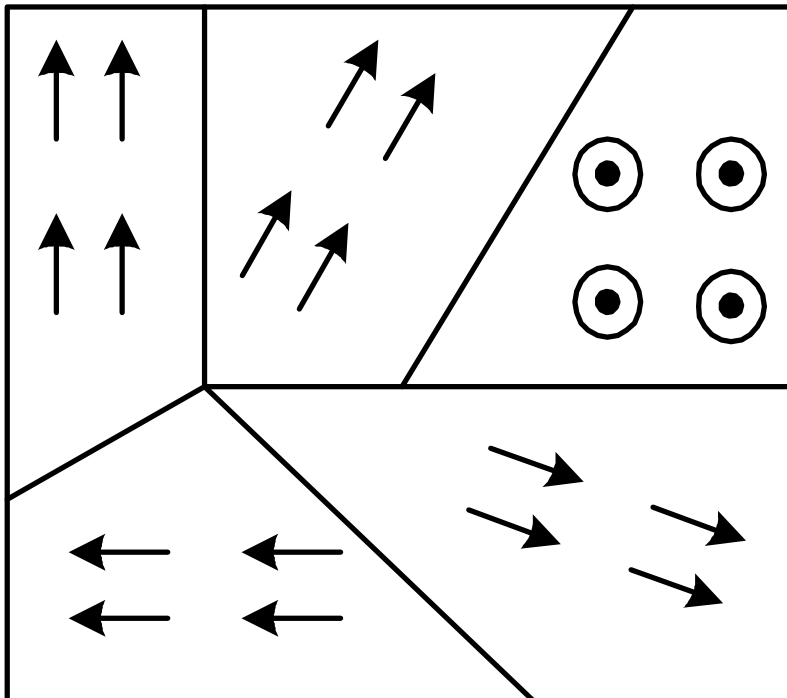
Koja je jedinica za vektor magnetizacije?

$$\frac{\text{A}}{\text{m}}$$

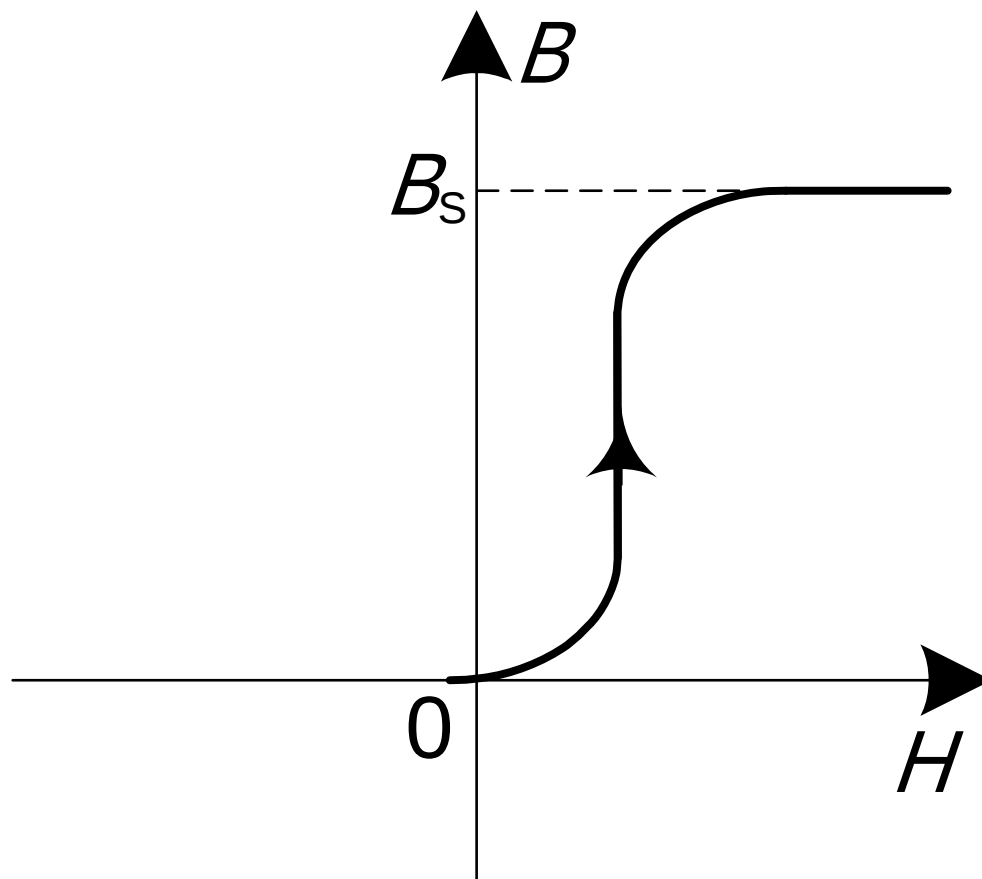
Šta je to magnetizacija materijala?

Kada se neki fero ili ferimagnetni materijal unese u spoljašnje magnetno polje dolazi do magnetizacije tog materijala. To se objašnjava postojanjem domena u materijalu. U okviru jednog domena su svi magnetni momenti strujnih kontura orijentisani u istom smeru, ali su ti smerovi različiti za različite domene.

Kada se ovakav materijal unese u polje, postepeno dolazi do namagnetisavanja domena, odnosno do preusmeravanja vektora magnetnog momenta u smeru spoljašnjeg magnetnog polja. To je okarakterisano prvobitnom krivom magnećenja i histerezisnom krivom:



PRVOBITNA KRIVA MAGNEĆENJA

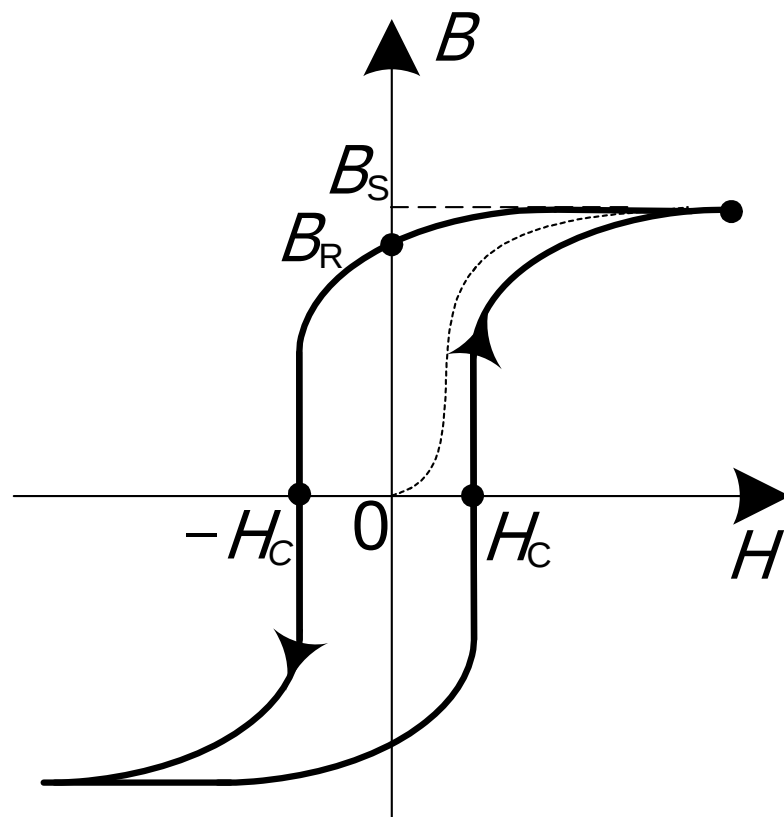


Ako materijal prethodno nije bio namagnetisan, kriva kreće iz koordinatnog početka.

B_s – zasićenje, kada su svi momenti svih domena orijentisani u smeru polja.

Daljim povećanjem spoljašnjeg polja ne može se ništa postići u smislu povećanja indukcije.

HISTEREZISNA KRIVA



Histerezisna petlja karakteriše ponašanje nelinearnih magnetnih materijala u naizmeničnom spoljašnjem magnetnom polju.

Kad je postignuto zasićenje ne može se više povećavati indukcija.

Kad se smanjuje intenzitet polja istog smera indukcija opada, ali sporije nego po prvobitnoj krivoj magnećenja.

Kad polje padne na nulu postoji zaostala (remanentna) indukcija B_R .

Kad polje promeni smer i počne da raste u suprotnom smeru, indukcija u jednom trenutku padne na nulu. Vrednost polja kad je indukcija nula je koercitivno polje – H_C .

Kad polje dalje raste u suprotnom smeru, opet magnetna indukcija ulazi u zasićenje. Ovaj proces se ponavlja za svaki naizmenični ciklus.

Histerezijsna kriva predstavlja nelinearnu zavisnost vektora magnetne indukcije od vektora jačine magnetnog polja, što je slučaj kod nelinearnih materijala (fero i ferimagneti).

Ako je materijal linearan (na primer: paramagnetici), onda je zbog linearne zavisnosti vektora indukcije od vektora jačine polja proračun mnogo jednostavniji:

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

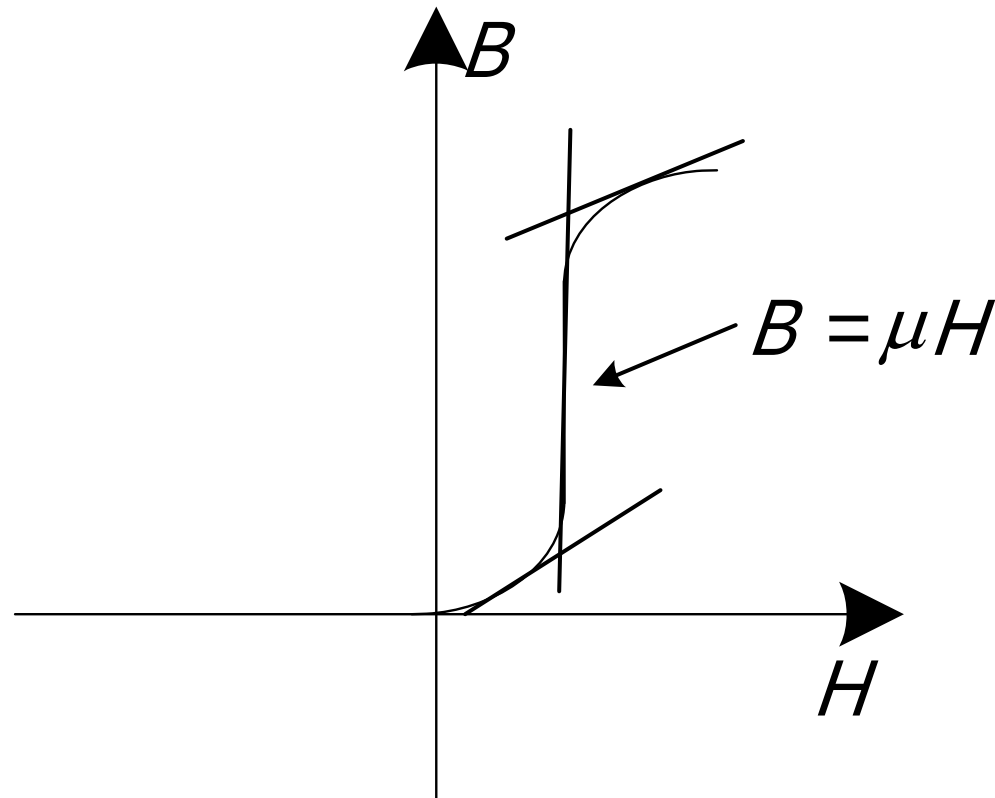
gde su:

μ_0 - magnetna permeabilnost vakuumu

μ_r - relativna magnetna permeabilnost

μ - apsolutna magnetna permeabilnost

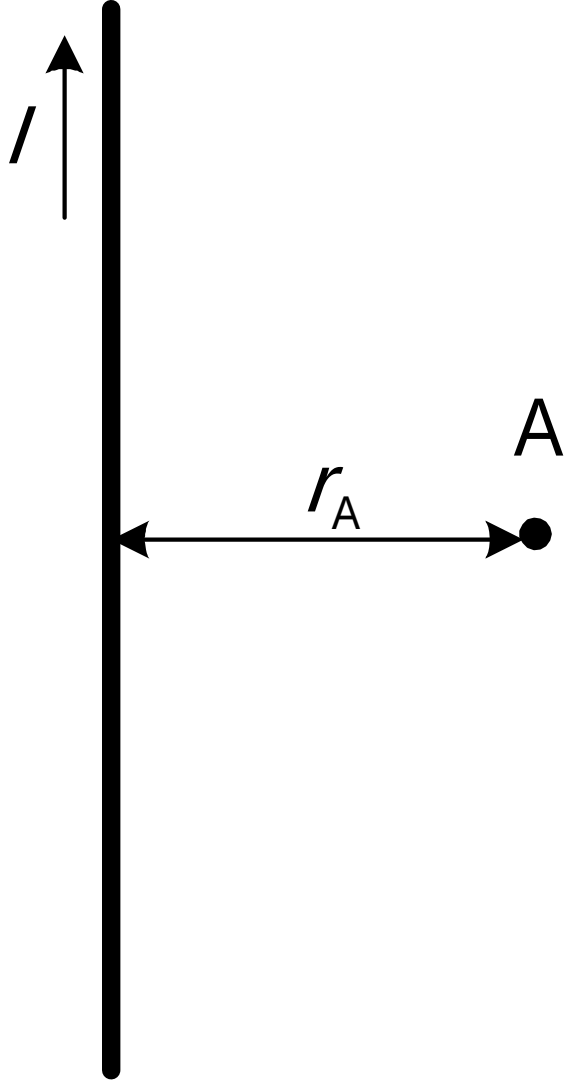
Često se i grafik nelinearnog materijala može linearizovati u određenom segmentu. Tako se pojednostavljuje proračun.



ZADACI:

5.1 a) Kolika je magnetna indukcija u tački A, koja se nalazi na rastojanju $r_A = 2 \text{ cm}$ od beskonačnog pravolinijskog provodnika sa strujom jačine $I = 2 \text{ A}$?

b) Ako bi se na rastojanju $r_A = 2 \text{ cm}$ od provodnika, paralelno sa njim, postavio drugi pravolinijski provodnik dužine $l = 1 \text{ m}$, sa strujom jačine $I' = 1 \text{ A}$, istog smera kao struja I , kolika bi sila delovala na taj provodnik? Da li je ova sila privlačna ili odbojna?

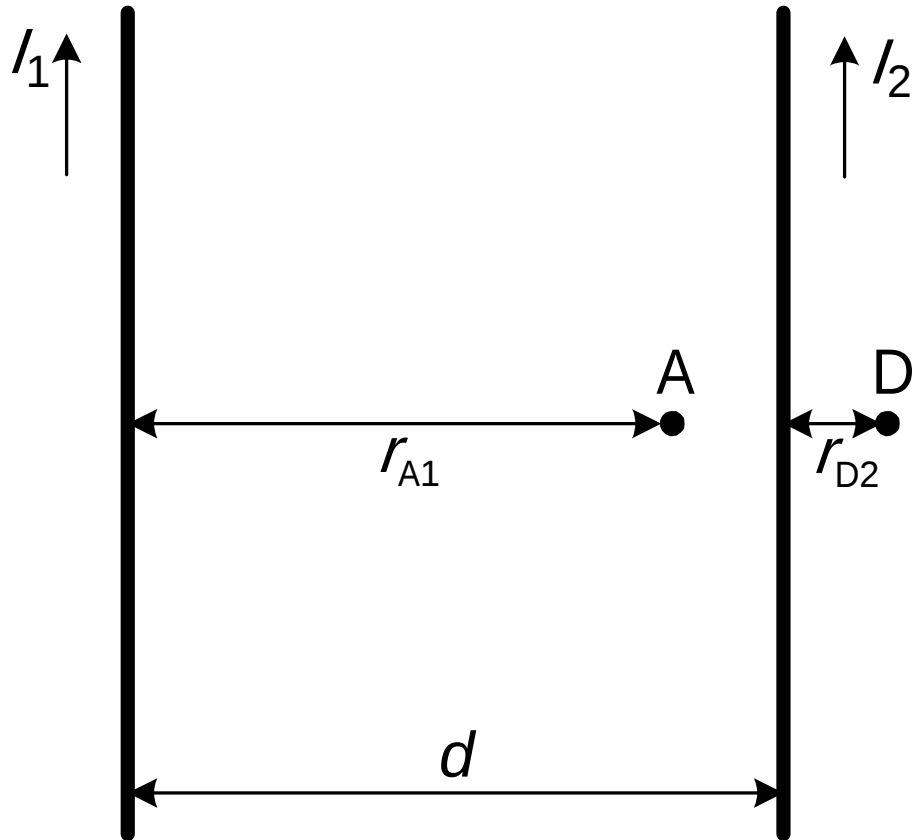


5.2 Dva beskonačna pravolinijska provodnika postavljena su paralelno jedan drugom na rastojanju $d = 5 \text{ cm}$, u vazduhu. Kroz prvi provodnik protiče stalna struja jačine $I_1 = 1 \text{ A}$, a kroz drugi provodnik protiče stalna struja jačine $I_2 = 0.5 \text{ A}$, prema smerovima prikazanim na slici (struje kroz provodnike su istih smerova).

a) Odrediti vektor magnetne indukcije (izračunati intenzitet, a ucrtati pravac i smer) u tački A, koja se nalazi između ova dva provodnika, u ravni koju oni određuju, a udaljena je od provodnika sa strujom I_1 za $r_{A1} = 4 \text{ cm}$.

b) Odrediti vektor magnetne indukcije (izračunati intenzitet, a ucrtati pravac i smer) u tački D, koja se nalazi u ravni koju određuju ova dva provodnika, sa strane provodnika sa strujom I_2 , a udaljena je od njega za $r_{D2} = 1 \text{ cm}$.

c) Da li je sila kojom provodnici deluju jedan na drugi privlačna ili odbojna?



5.3 Dva beskonačna pravolinijska provodnika postavljena su paralelno jedan drugom na rastojanju $d = 10 \text{ cm}$, u vazduhu. Kroz prvi provodnik protiče stalna struja jačine $I_1 = 3 \text{ A}$, a kroz drugi provodnik protiče stalna struja jačine $I_2 = 4 \text{ A}$. Odrediti tačke u prostoru u kojima je vektor magnetne indukcije jednak nuli, i to u slučaju:

- a) da su struje u provodnicima istog smera**
- b) da su struje u provodnicima suprotnog smera.**

5.4 Oko veoma dugačkog pravolinijskog bakarnog provodnika poluprečnika a , nalazi se koaksijalno cev od feromagnetnog materijala.

Unutrašnji poluprečnik cevi je b , a spoljašnji poluprečnik je c . U bakarnom provodniku postoji stalna struja jačine I i može se smatrati da je ravnomerno raspodeljena po poprečnom preseku provodnika.

Kriva magnećenja feromagnetnog materijala od koga je cev napravljena može se aproksimirati izrazom:

$$B = \frac{k_1 H}{k_2 + H}$$

gde su k_1 i k_2 konstante.

Odrediti magnetno polje H , magnetnu indukciju B i magnetizaciju M unutar i izvan pravolinijskog provodnika i grafički ih predstaviti u funkciji odstojanja od ose bakarnog provodnika.

FLUKS VEKTORA MAGNETNE INDUKCIJE

Kao što smo u elektrostatici proračunavali fluks vektora elektrostatičkog polja, tako ćemo i u elektromagnetizmu proračunavati fluks vektora magnetne indukcije.

Fluks se uvek isto proračunava: posmatra se koliko linija neke vektorske veličine prolazi kroz zadatu površinu kroz koju tražimo fluks.

$$\Phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

Kod magnetnog polja važi i zakon o konzervaciji fluksa:

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

Prema ovom zakonu fluks vektora magnetne indukcije kroz zatvorenu površinu uvek je jednak 0.

Koja je jedinica za magnetni fluks?

Veber [Wb]

ZADACI:

6.1 Pravougaona kontura stranica $a = 2 \text{ cm}$ i $b = 5 \text{ cm}$, nalazi se u homogenom magnetnom polju indukcije $B = 0.5 \text{ T}$ i postavljena je:

a) normalno na linije polja

b) pod uglom od $\alpha = \frac{\pi}{6}$

u odnosu na linije polja.

Odrediti magnetni fluks kroz konturu.

KALEM

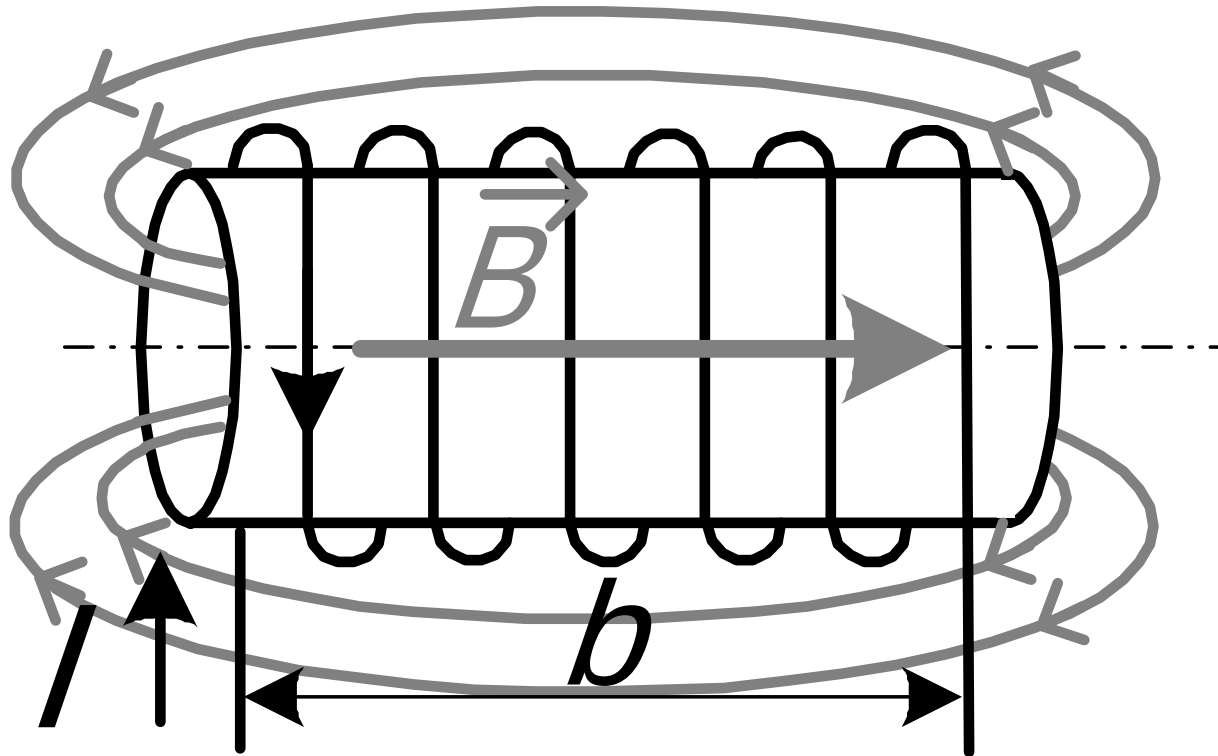
Šta je kalem?

To je električna komponenta koja se sastoji od namotaja izolovane, provodne žice i deluje kao mnogo elementarnih strujnih kontura zajedno namotanih jedna do druge (to su zavojci namotaja).

Postoje različiti kalemovi po obliku (solenoid, torus), a i zavojci mogu biti motani bez razmaka (jedan do drugog) i sa razmakom.

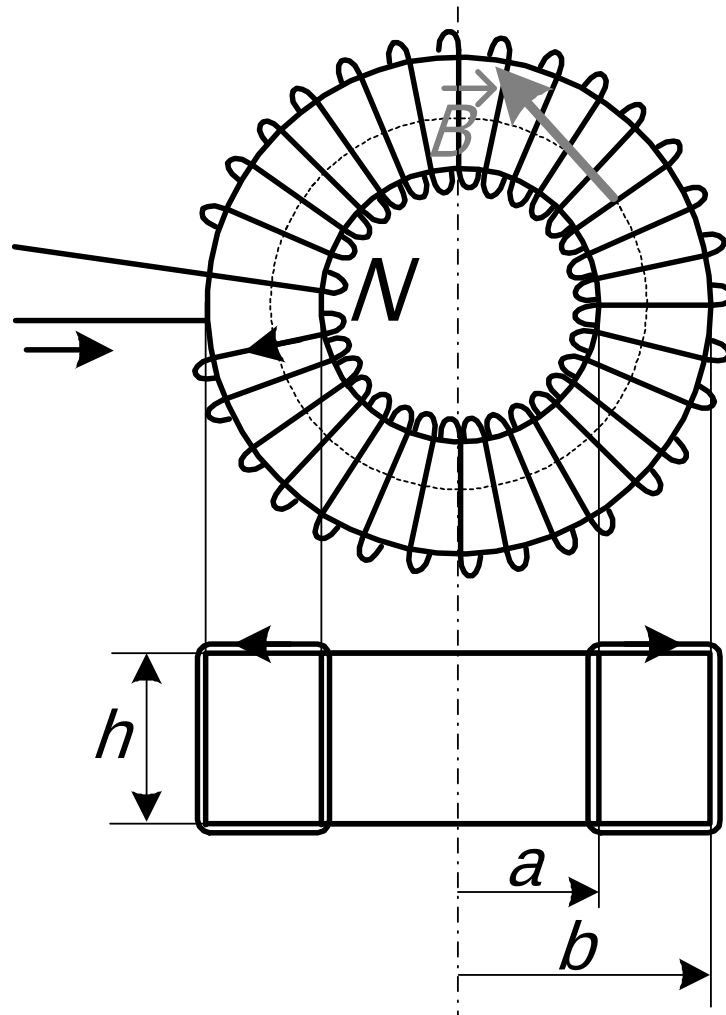
Svi kalemovi imaju kalemsko telo (koje se pravi od dielektričnog materijala) na koje se mota namotaj (od bakarne žice). Neki kalemovi imaju i jezgro, koje se postavlja kroz kalemsko telo (telo je šuplje) i izrađeno je od papira, kartona, feromagnetika...

SOLENOID



Solenoid je kalem štapićastog oblika koji ima velike gubitke, jer se put magnetne indukcije zatvara kroz vazduh. Zato se oklopljava u kućište.

TORUS



Torus je takoreći idealan kalem, jer se može smatrati da je kompletna magnetna indukcija zadržana u njemu (ukoliko je namotaj motan zavojak do zavojka). To znači da nema rasipanja magnetne indukcije.

Za svaki kalem može se izračunati magnetna indukcija, jačina magnetnog polja, fluks kroz jezgro i induktivnost.

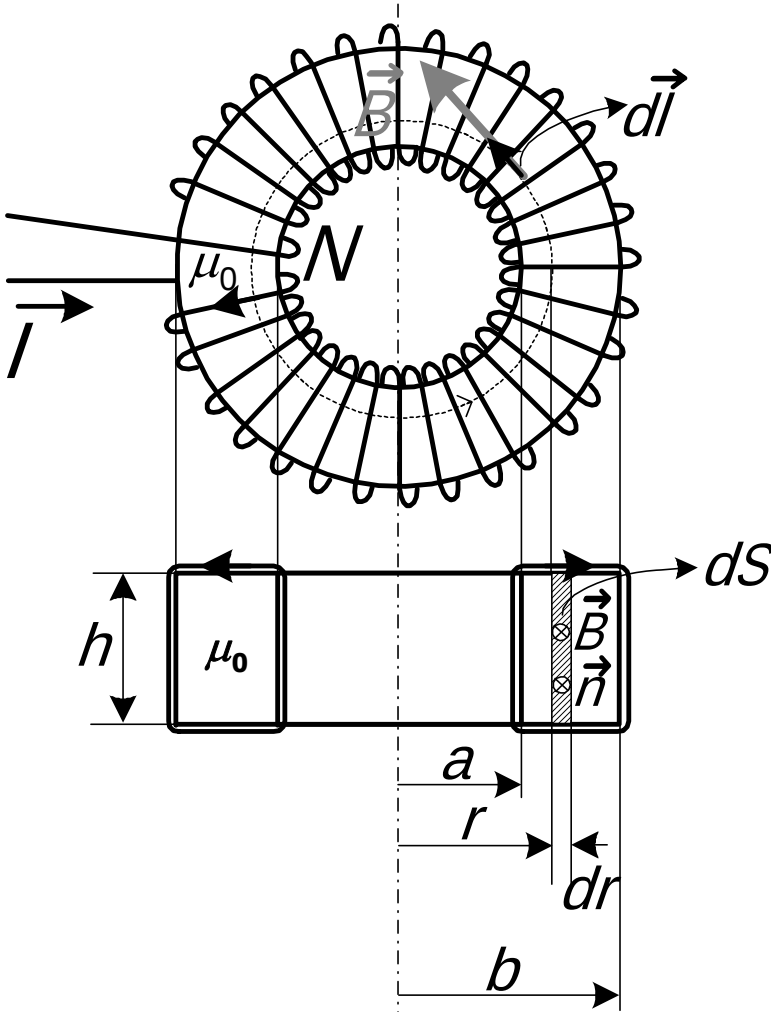
Šta je induktivnost?

Glavna karakteristika kalema. Ona je različita za razne vrste kalemova.

Od čega zavisi induktivnost?

Od oblika i dimenzija kalema, broja zavoja i vrste materijala od kog je jezgro napravljeno.

TORUS SA VAZDUŠNIM JEZGROM



Kako možemo izračunati induktivnost kalema sa jezgrom od vazduha ili kartona?

- prvo Amperovim zakonom izračunamo magnetnu indukciju kalema:

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \sum_k I_k$$

$$\oint_C B \cdot dl \cdot \cos(\vec{B}, d\vec{l}) = \mu_0 NI$$

$$\mathbf{B} \cdot 2\pi \mathbf{r} = \mu_0 \mathbf{NI}$$

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 \mathbf{NI}}{2\pi \mathbf{r}}, \quad \mathbf{a} < \mathbf{r} < \mathbf{b}$$

- izračunamo fluks koji ta magnetna indukcija pravi kroz površinu namotaja:

$$\Phi = N \cdot \Phi_0$$

gde je:

Φ_0 - fluks kroz jedan zavojak

$$\begin{aligned}
 \Phi_0 &= \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = \int_S B \cdot dS \cdot \cos(\vec{B}, \vec{n}) = \\
 &= \int_a^b \frac{\mu_0 NI}{2\pi r} \cdot h \cdot dr = \frac{\mu_0 NI}{2\pi} h \ln \frac{b}{a}
 \end{aligned}$$

$$\Phi = N \cdot \Phi_0 = \frac{\mu_0 N^2 I}{2\pi} h \ln \frac{b}{a}$$

- induktivnost kalema jednaka je količniku izračunatog fluksa i električne struje od koje taj fluks potiče:

$$L = \frac{\Phi}{I} = \frac{\mu_0 N^2}{2\pi} h \ln \frac{b}{a}$$

Ako torus ima mali poprečni presek on se može smatrati tankim i magnetna indukcija je u njemu homogena (konstantna je po celom poprečnom preseku). Tada se u proračunu vrši aproksimacija:

$$***l = 2\pi r***$$

gde je:

l - dužina srednje linije torusa

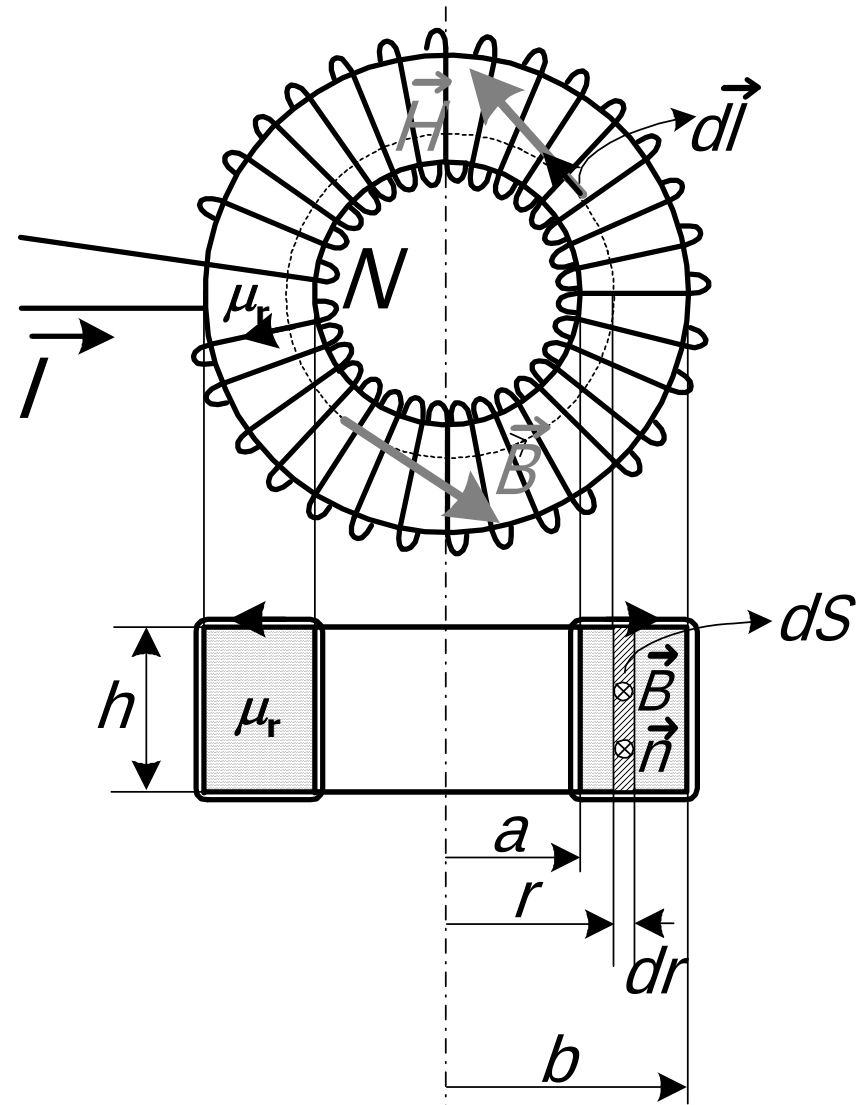
$$\mathbf{H} = \frac{\mathbf{NI}}{\mathbf{l}}$$

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 \mathbf{NI}}{\mathbf{l}}$$

$$\Phi = N \cdot \Phi_0 = N \cdot B \cdot S = \frac{\mu_0 N^2 I}{l} S$$

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

TORUS SA JEZGROM OD FEROMAGNETIKA



Kako možemo izračunati induktivnost kalema sa jezgrom od nekog feromagnetika?

- prvo uopštenim Amperovim zakonom izračunamo vektor jačine magnetnog polja u kalemu:

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum_k I_k$$

$$\oint_C H \cdot dl \cdot \cos(\vec{H}, d\vec{l}) = NI$$

$$\mathbf{H \cdot 2\pi r = NI}$$

$$\mathbf{H = \frac{NI}{2\pi r}, \quad a < r < b}$$

- linearnom vezom izračunavamo magnetnu indukciju u jezgru:

$$\mathbf{B} = \mu \cdot \mathbf{H} = \mu_0 \mu_r \frac{NI}{2\pi r}, \quad a < r < b$$

- izračunamo fluks koji ta magnetna indukcija pravi kroz površinu namotaja:

$$\Phi = N \cdot \Phi_0$$

gde je:

Φ_0 - fluks kroz jedan zavojak

$$\begin{aligned}
 \Phi_0 &= \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = \int_S B \cdot dS \cdot \cos(\vec{B}, \vec{n}) = \\
 &= \int_a^b \frac{\mu NI}{2\pi r} \cdot h \cdot dr = \frac{\mu NI}{2\pi} h \ln \frac{b}{a}
 \end{aligned}$$

$$\Phi = N \cdot \Phi_0 = \frac{\mu N^2 I}{2\pi} h \ln \frac{b}{a}$$

- induktivnost kalema jednaka je količniku izračunatog fluksa i struje od koje taj fluks potiče:

$$L = \frac{\Phi}{I} = \frac{\mu N^2}{2\pi} h \ln \frac{b}{a}$$

Ako torus ima mali poprečni presek on se može smatrati tankim i magnetna indukcija je u njemu homogena (konstantna je po celom poprečnom preseku). Tada se u proračunu vrši aproksimacija:

$$***l = 2\pi r***$$

gde je:

l - dužina srednje linije torusa

$$\mathbf{H} = \frac{\mathbf{NI}}{\mathbf{l}}$$

$$\mathbf{B} = \frac{\mu \mathbf{NI}}{\mathbf{l}}$$

$$\Phi = N \cdot \Phi_0 = N \cdot B \cdot S = \frac{\mu N^2 I}{l} S$$

$$L = \frac{\Phi}{I} = \frac{\mu N^2}{l} S$$

Kod torusnog namotaja sva magnetna indukcija je koncentrisana u jezgru. To nije slučaj sa drugim kalemovima.

Fluks kroz namotaj torusa je fluks vektora magnetne indukcije kroz površinu koja se naslanja na svih N zavoja torusnog namotaja.

Smer magnetne indukcije $\vec{B}$
određuje se pravilom desne zavojnice u odnosu
na smer struje u namotaju.

Smer jediničnog vektora normale $\vec{n}$
određuje se pravilom desne zavojnice u
odnosu na smer orijentacije konture.

Kada je u pitanju jedan kalem uvek su ta dva smeru ista:

- smer orijentacije konture uvek je isti kao smer struje koja protiče kroz konturu (ako struja u $\vec{u}$ konturi postoji). Proističe da se i vektor $\vec{B}$ i vektor $\vec{n}$ određuju pravilom desne zavojnice prema istom referentnom smeru (smeru struje tj. smeru orijentacije konture ako nema struje).**

- zato je fluks kroz kalem uvek pozitivan i naziva se sopstveni fluks.

- induktivnost kalema takođe je uvek pozitivna i naziva se sopstvena induktivnost

Koja je jedinica za induktivnost kalema?

Henri [H]

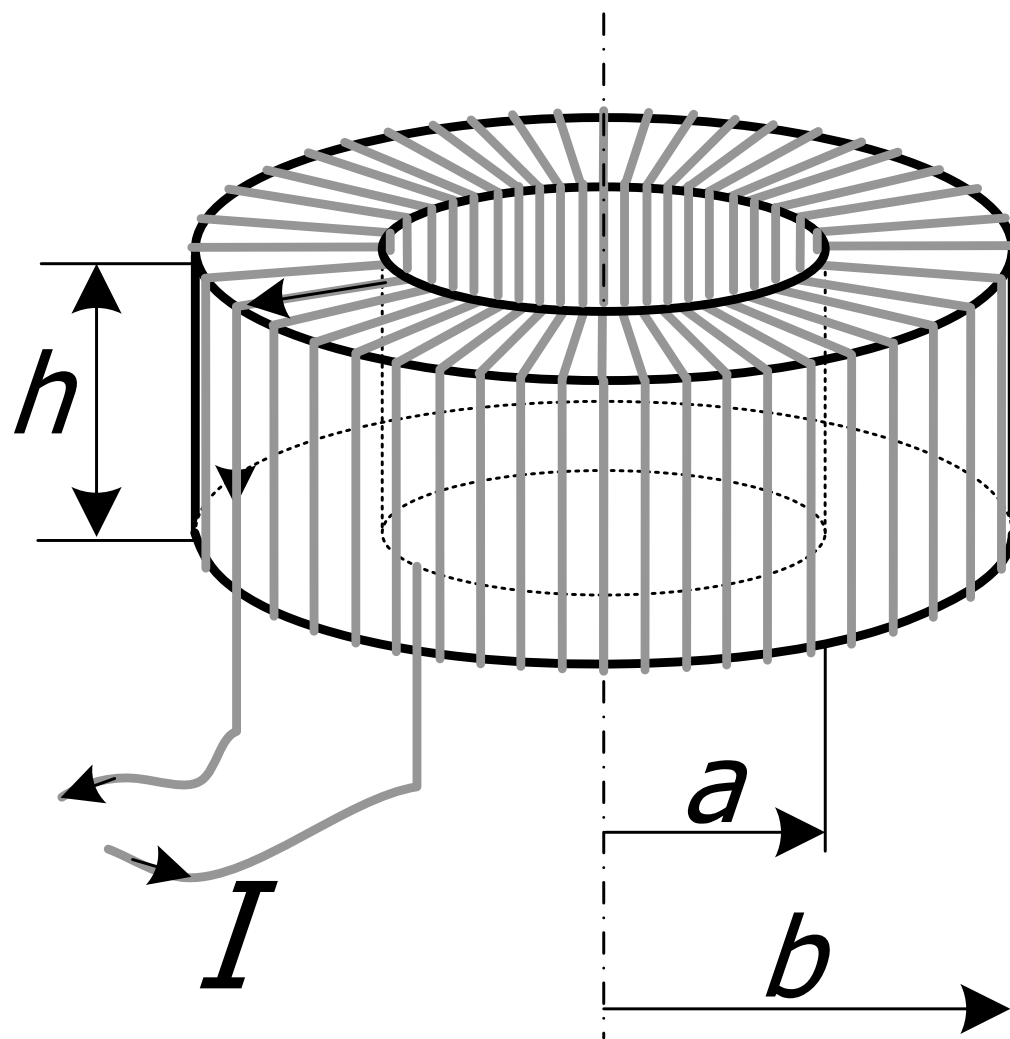
ZADACI:

7.1 Torusni namotaj sa slike se sastoji od $N = 1000$ gusto i ravnomerno motanih zavoja, kroz koje protiče struja jačine $I = 2.5 \text{ A}$. Unutrašnji poluprečnik torusa je $a = 2 \text{ cm}$, spoljašnji poluprečnik je $b = 5 \text{ cm}$, a visina je $h = 5 \text{ cm}$.

a) Odrediti kako se menja magnetna indukcija unutar torusnog namotaja.

b) Izračunati intenzitet vektora magnetne indukcije u sledećim tačkama: tački koja se nalazi na unutrašnjoj strani torusa, tački koja se nalazi na srednjoj liniji torus i tački koja se nalazi na spoljašnjoj strani torusa.

c) Odrediti induktivnost torusnog namotaja, prema tačnoj formuli i u slučaju da ga možemo smatrati tankim.



7.2 Odrediti induktivnost tankog torusnog namotaja kružnog poprečnog preseka, poluprečnika $r = 5 \text{ mm}$. Poluprečnik srednje linije torusa je $R = 10 \text{ cm}$. Torus ima $N = 100$ zavoja. Koliki je sopstveni fluks kroz jedan zavojak torusa, ako je struja kroz namotaj $I = 1 \text{ A}$?

- 7.3 a) Odrediti magnetnu indukciju u solenoidu sa kartonskim jezgrom, dužine $b = 5 \text{ cm}$. Solenoid ima $N = 20$ gusto i ravnomerno namotanih zavoja žice, kroz koje protiče stalna struja jačine $I = 2 \text{ A}$. Poluprečnik kartonskog jezgra na koje je namotan kalem je $r = 1 \text{ cm}$**
- b) Izračunati induktivnost ovog solenoida**

7.4 Kolika je dužina solenoida namotanog na kartonsko jezgro, poluprečnika $r = 0.5 \text{ cm}$, ako kalem ima $N = 100$ zavoja, a induktivnost mu je $L = 5 \mu\text{H}$.

7.5 Na torus pravougaonog poprečnog preseka je gusto i ravnomerno namotano $N = 700$ zavojaka, kroz koje protiče stalna struja jačine I i stvara magnetno polje indukcije $B = 0.8 \text{ T}$. Jezgro je napravljeno od feromagnetnog materijala, za koji se, za date uslove, kriva magnećenja može linearizovati i smatrati da ima relativnu magnetnu permeabilnost $\mu_r = 100$

Pre uspostavljanja struje jezgro torusa je bilo nenamagnetisano. Odrediti ukupan sopstveni fluks, fluks po jednom zavoju, induktivnost torusa i struju kroz namotaj, ako smatramo da je torus tanak. Unutrašnji poluprečnik torusa je $a = 20 \text{ cm}$, spoljašnji poluprečnik je $b = 24 \text{ cm}$, a visina je $h = 5 \text{ cm}$.

7.6 Na tanak torus kružnog poprečnog preseka, poluprečnika r , ravnomerno i gusto je namotan provodnik dužine l_p . Može se smatrati da materijal od kog je načinjen torus ima relativnu magnetnu permeabilnost

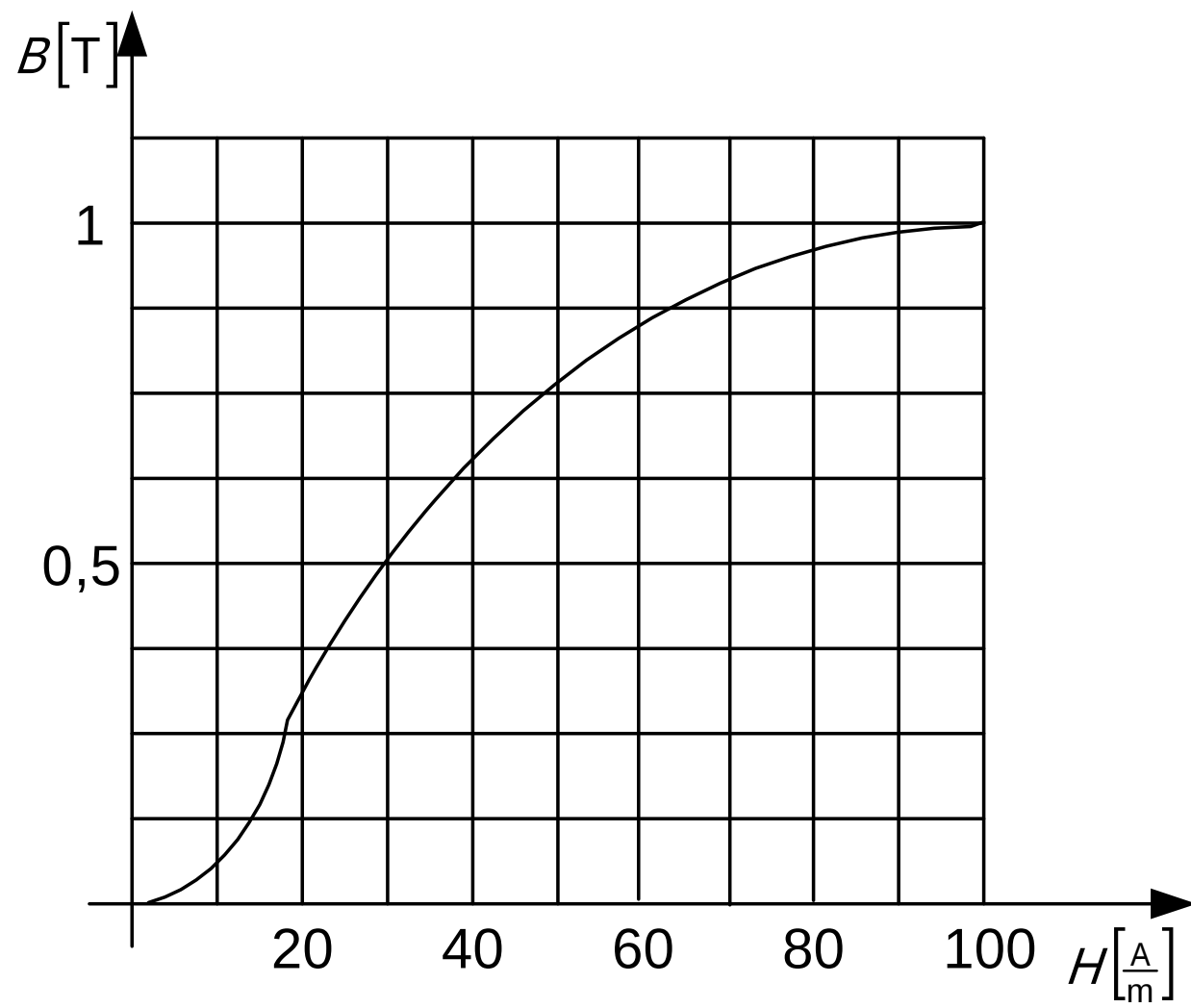
$$\mu_r = 1200$$

Dužina srednje linije torusa je $l_{sr} = 80$ cm, a induktivnost je $L = 2$ H. Odrediti dužinu namotanog provodnika.

7.7 Solenoid dužine $b = 10 \text{ cm}$ ima $N = 150$ zavoja žice na feromagnetnom materijalu, čija se magnetna permeabilnost u datim uslovima može smatrati konstantnom i iznosi $\mu_r = 100$

Poprečni presek solenoida je kružnog oblika, poluprečnika $r = 2 \text{ mm}$. U namotaju je uspostavljena struja jačine $I = 1 \text{ A}$. Odrediti magnetnu indukciju u jezgru solenoida, kao i induktivnost solenoida, ako je pre uspostavljanja struje jezgro bilo nenamagnetisano.

7.8 Solenoid ima dužinu $b = 1 \text{ m}$ i $N = 100$ zavoja. Jezgro solenoida je od feromagnetnog materijala čija je kriva prvobitnog magnećenja data na slici. Odrediti struju I u namotaju solenoida ako je magnetna indukcija u jezgri $B = 1 \text{ T}$. (Pre uspostavljanja struje jezgro je bilo nenamagnetisano.)



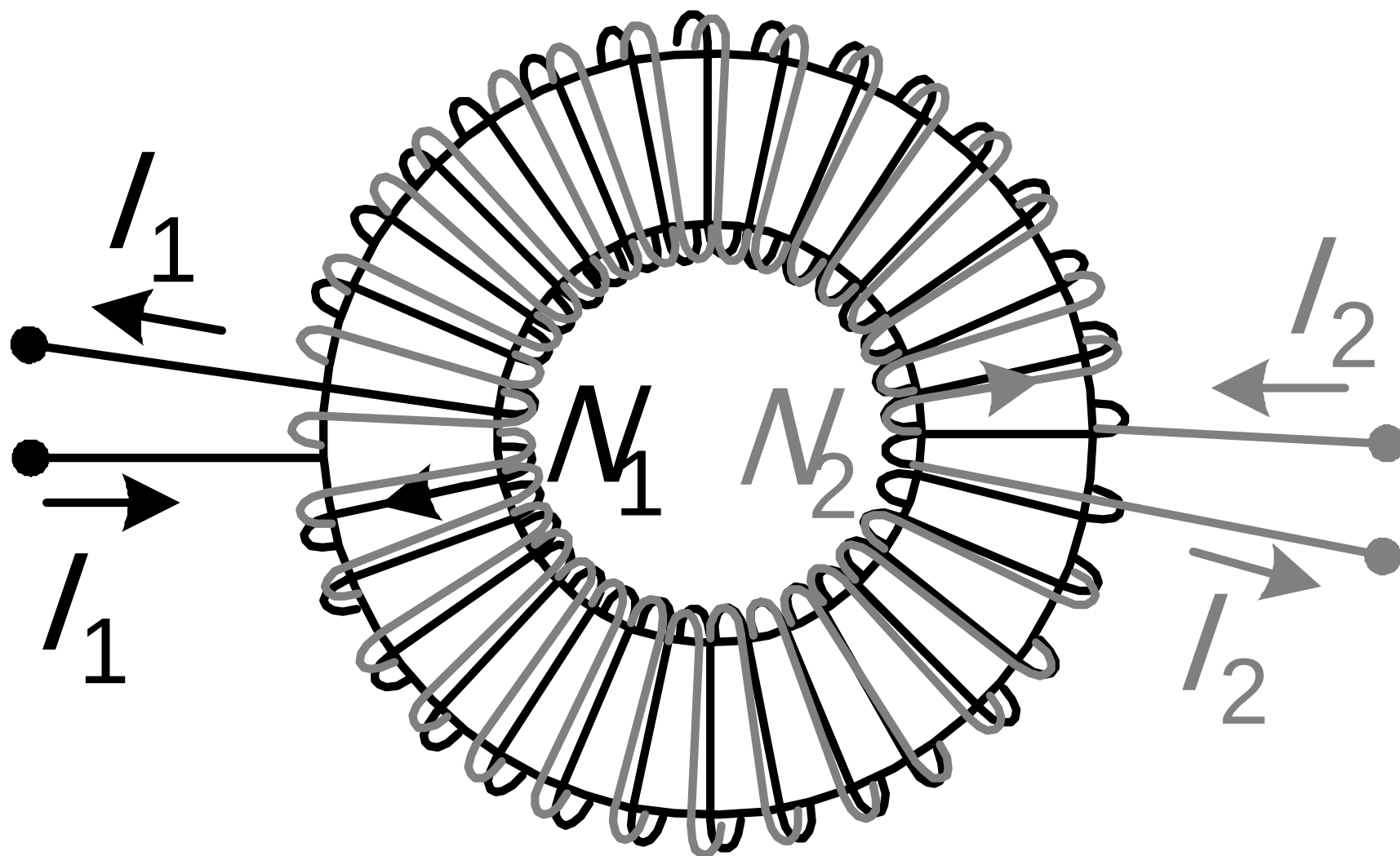
7.9 Solenoid ima dužinu $b = 25$ cm. Kroz $N = 200$ zavoja solenoida teče stalna struja jačine $I = 0.5$ A. Jezgro solenoida je od feromagnetnog materijala čija je kriva prvobitnog magnećenja data tabelom. Odrediti magnetnu indukciju B u jezgru solenoida. (Pre uspostavljanja struje jezgro je bilo nenamagnetisano.)

$H \left[\frac{A}{m} \right]$	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000
$B [T]$	0,25	0,50	0,72	0,89	1,08	1,16	1,24	1,30	1,34	1,37

SPREGNUTI NAMOTAJI SA STALNIM STRUJAMA

Šta su spregnuti namotaji?

Kada na isto jezgro namotamo dva namotaja kroz koje propuštamo električne struje, onda će indukcija koju proizvodi struja u jednom namotaju praviti fluks i kroz površinu drugog namotaja. I obrnuto. Takvi namotaji koji utiču jedan na drugi zbog zajedničkog jezgra zovu se spregnuti namotaji



Šta je međusobni fluks?

Magnetni fluks koji indukcija koja potiče od električne struje u jednom namotaju pravi kroz površinu drugog:

$$\Phi_{12} = N_2 \cdot \Phi_{120}$$

$$\Phi_{120} = \int_{S_2} \vec{B}_1 \cdot d\vec{S} = \int_{S_2} B_1 \cdot dS \cdot \cos(\vec{B}_1, \vec{n}_2) = \int_a^b \frac{\mu N_1 I_1}{2\pi r} \cdot h \cdot dr = \frac{\mu N_1 I_1}{2\pi} h \ln \frac{b}{a}$$

$$\Phi_{12} = \frac{\mu N_1 N_2 I_1}{2\pi} h \ln \frac{b}{a}$$

**U zavisnosti od ugla između $\vec{B}_1$ i $\vec{n}_2$
ovaj fluks može biti pozitivan ili negativan.**

Šta je međusobna induktivnost?

Količnik međusobnog fluksa i struje od koje taj fluks potiče:

$$**L_{12} = \frac{\Phi_{12}}{I_1} = \frac{\mu N_1 N_2}{2\pi} h \ln \frac{b}{a}**$$

Međusobna induktivnost, kao i međusobni fluks (jer direktno zavisi od njega) takođe može biti pozitivna ili negativna.

Može se izračunati i fluks Φ_{21}

koji indukcija $\vec{B}_2$

od električne struje u drugom namotaju I_2

pravi kroz površinu S_1 prvog namotaja:

$$\Phi_{21} = \frac{\mu N_1 N_2 I_2}{2\pi} h \ln \frac{b}{a}$$

međusobna induktivnost L_{21} je onda:

$$L_{21} = \frac{\Phi_{21}}{I_2} = \frac{\mu N_1 N_2}{2\pi} h \ln \frac{b}{a}$$

Važno je uočiti da su međusobni fluksevi za spregnute namotaje različiti (jer ih čine različite struje), a da su međusobne induktivnosti iste (jer induktivnosti ne zavise od električne struje!!!).

**Način motanja spregnutih kalemova definisan
je koeficijentom sprege k**

gde je:

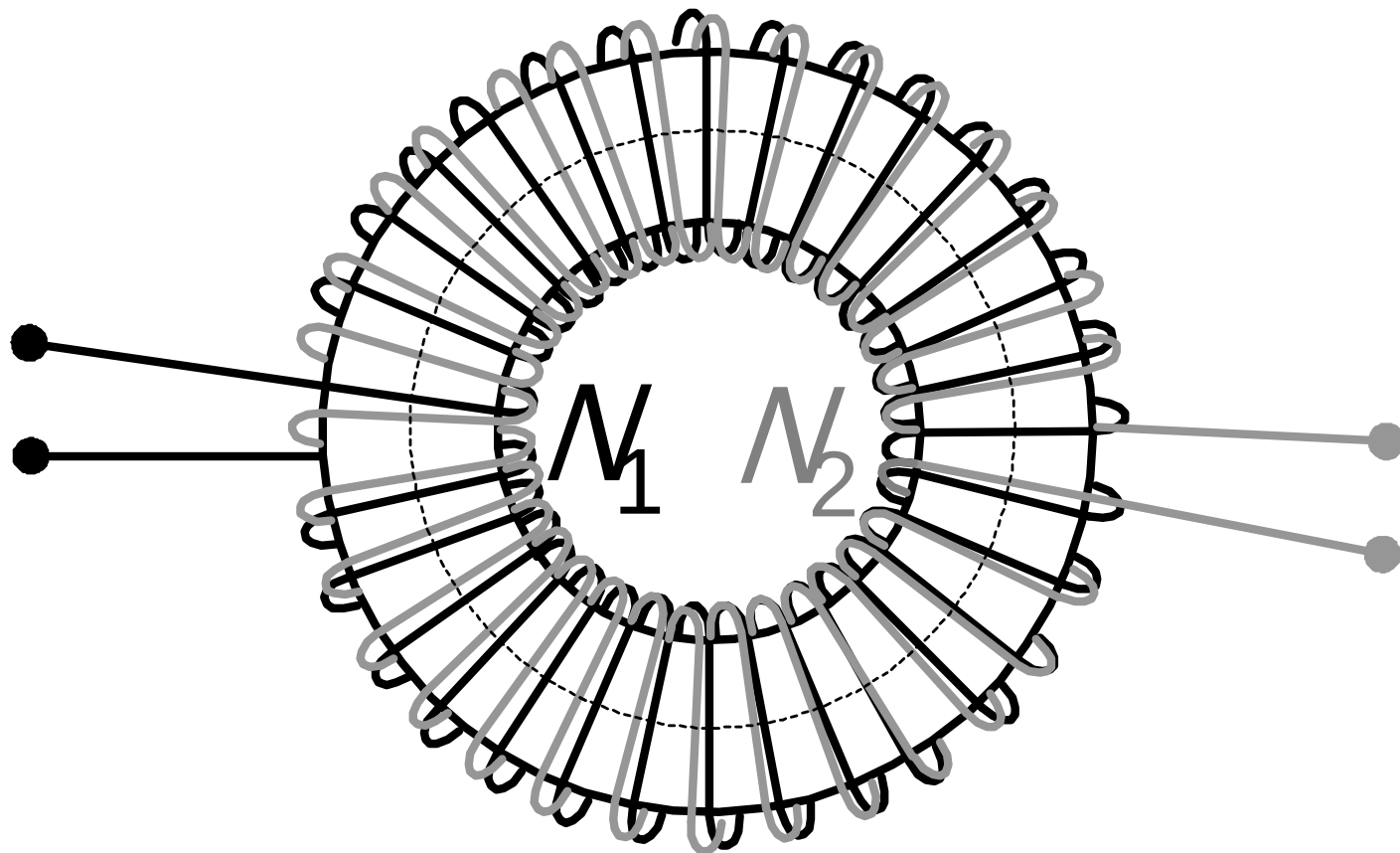
$$k \in [0,1]$$

Tako se međusobne induktivnosti mogu izračunati i kao:

$$L_{12} = \pm k \sqrt{L_1 \cdot L_2}$$

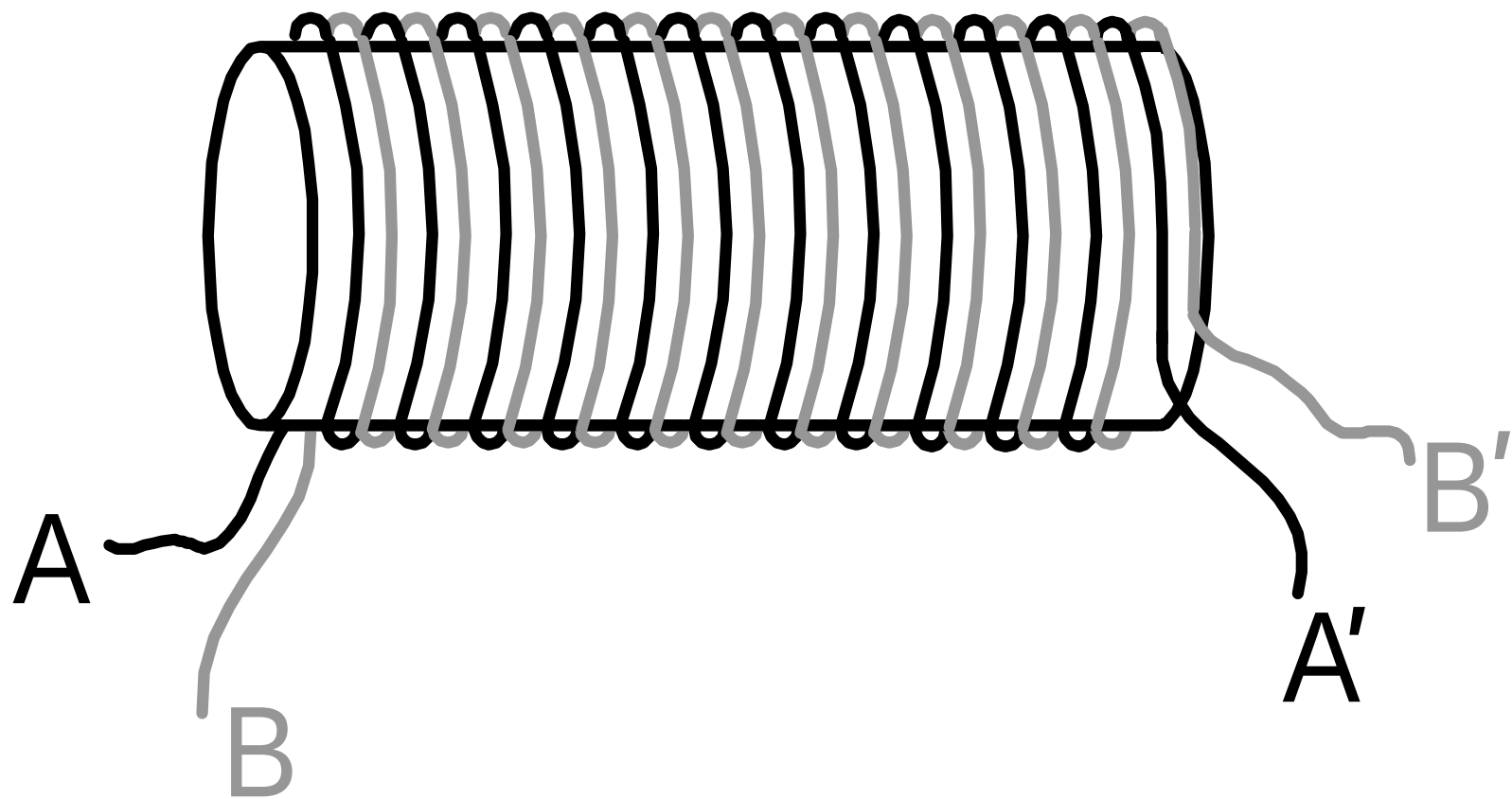
ZADACI:

8.1 Dva namotaja su ravnomerno i gusto, jedan preko drugog, namotani na tankom kartonskom torusnom jezgru, kao što je prikazano na slici. Prvi namotaj ima N_1 , a drugi N_2 zavoja. Odrediti sopstvene induktivnosti ovih namotaja, međusobne induktivnosti i koeficijent sprege. Kartonsko jezgro je pravougaonog poprečnog preseka. Unutrašnji poluprečnik jezgra je a , spoljašnji poluprečnik je b , a visina je h .



8.2 Na kartonskom jezgru namotana su dva namotaja, zavojak do zavojka, kao na slici. Dužina jezgra je $b = 4 \text{ cm}$, poluprečnik poprečnog preseka je $r = 1 \text{ mm}$, a broj zavoja svakog od namotaja je $N = 100$.

- a) Odrediti induktivnost svakog namotaja**
- b) Odrediti koeficijent sprege**
- c) Nacrtati ekvivalentnu šemu veze ako su spojeni krajevi A' i B' i odrediti međusobnu induktivnost.**
- d) Nacrtati ekvivalentnu šemu veze ako su spojeni krajevi A' i B i odrediti međusobnu induktivnost.**
- e) Nacrtati ekvivalentnu šemu veze ako su istovremeno spojeni krajevi A' i B' i krajevi A i B , i odrediti međusobnu induktivnost.**



PROMENLJIVA ELEKTROMAGNETNA POLJA

Magnetna polja koja smo do sada analizirali bila su stalna jer su posledica konstantne električne struje u vremenu i provodnika sa strujom koji miruje u prostoru.

FARADEJEV ZAKON

Šta se dešava ako se strujna kontura kreće u spoljašnjem magnetnom polju?

Šta se dešava ako kroz provodnik propuštamo vremenski promenljivu električnu struju?

Sve te pojave se mogu objasniti Faradejevim zakonom elektromagnetne indukcije:

Indukovana elektromotorna sila, koja se javlja na krajevima provodnika, suprodstavlja se promeni magnetnog fluksa:

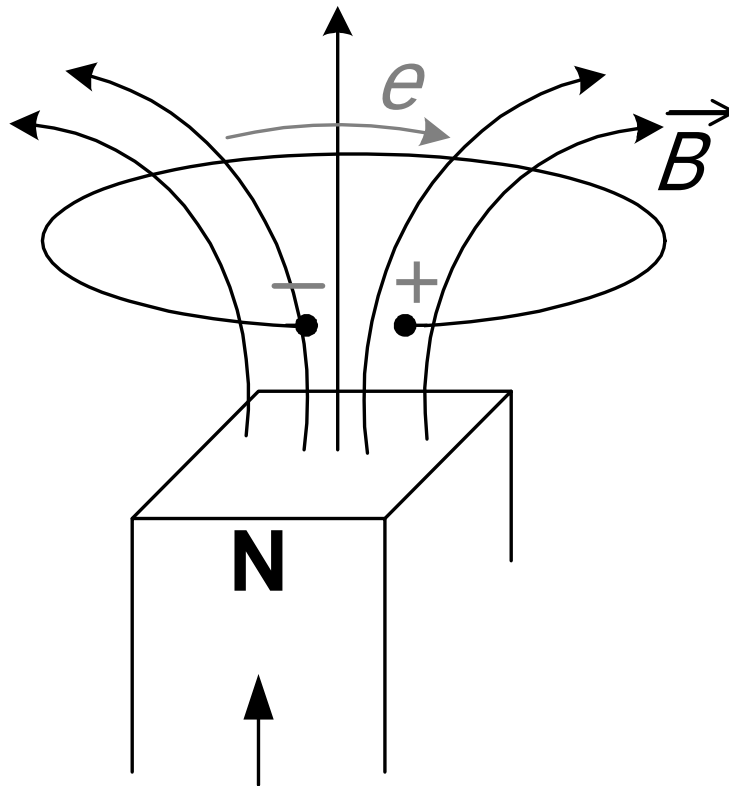
$$**e = - \frac{d\Phi}{dt}**$$

Promena magnetnog fluksa može nastati ako se kontura kreće u spoljašnjem magnetnom polju, ako izvor magnetne indukcije pomeramo u prostoru, ili ako imamo vremenski promenljivu električnu struju u provodniku.

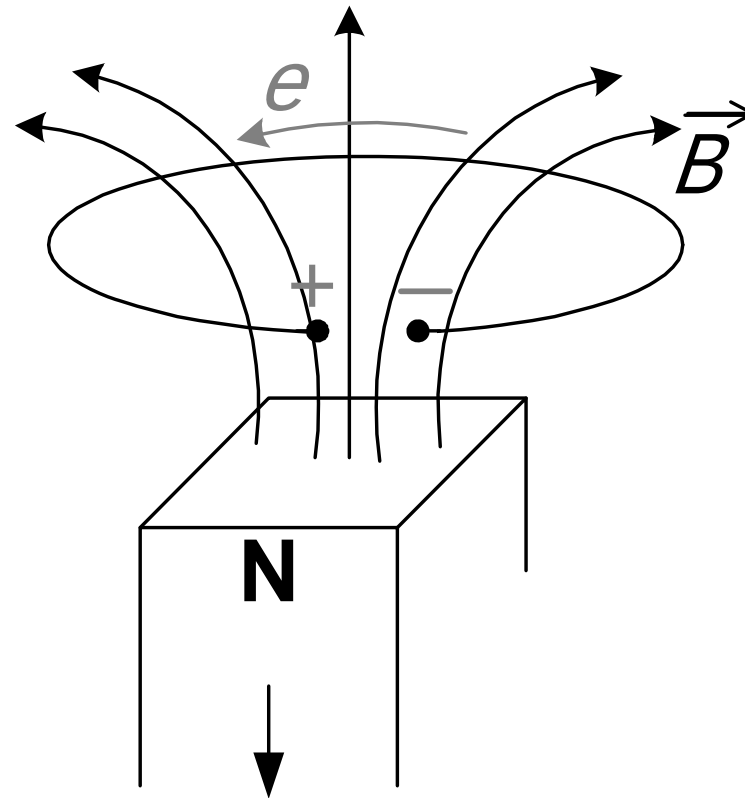
**Kako se određuje smer indukovane
elektromotorne sile?**

Lencovim pravilom

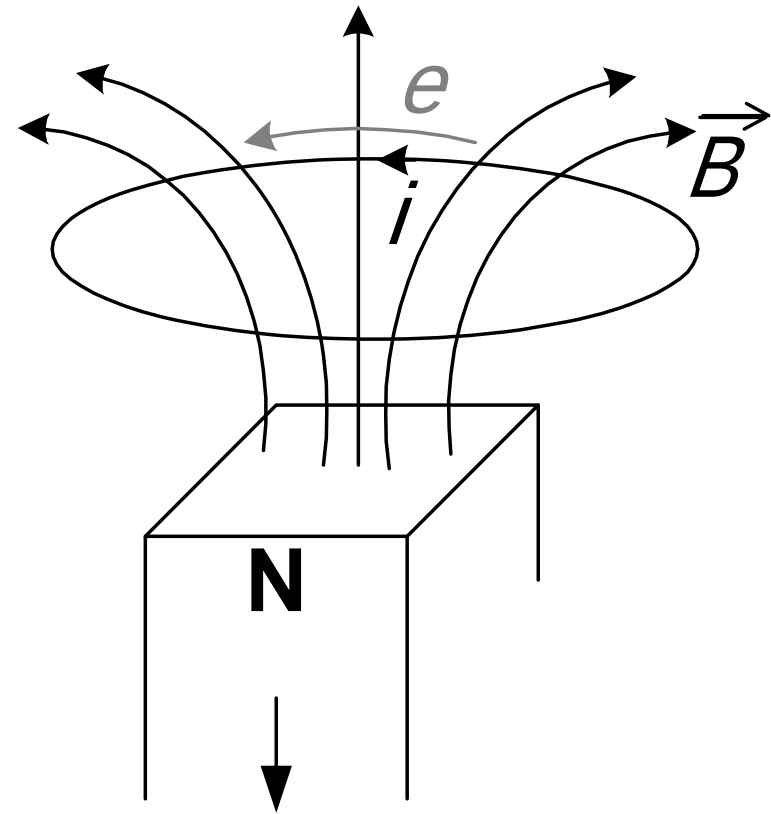
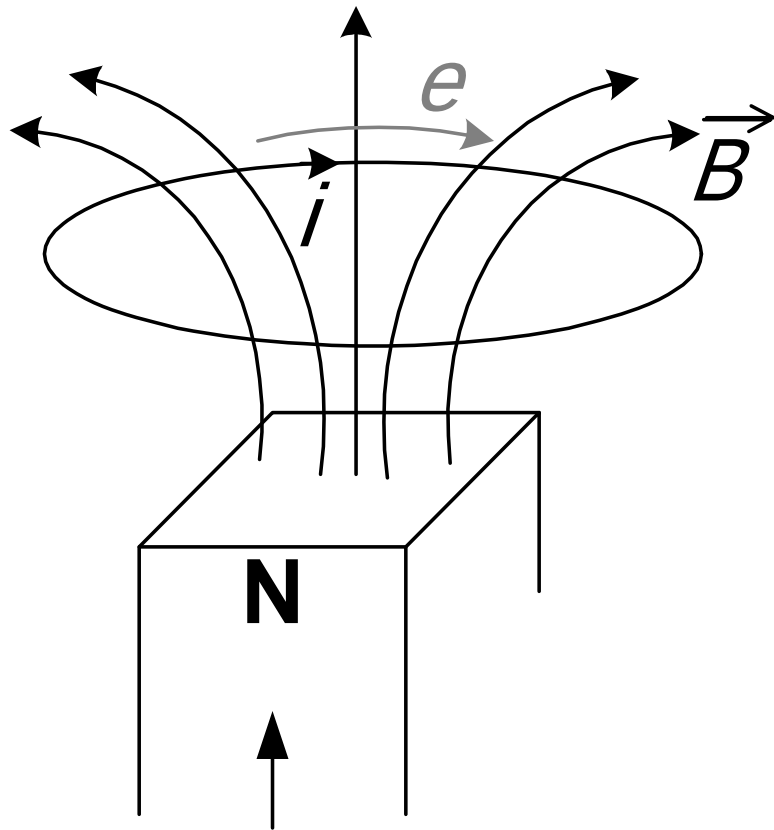
- Ako se magnet približava provodniku, fluks raste. Indukovaće se elektromotorna sila takvog smera koja će se truditi da smanji tu promenu fluksa i da ga održi na početnom nivou.



- Ako se magnet udaljava, onda fluks kroz konturu opada. Indukovana elektromotorna sila će biti takvog smera da teži da poveća fluks ne bi li ostao kakav je bio na početku.



- Ako je kontura zatvorena, onda će se osim elektromotorne sile indukovati i električna struja u konturi. Smer te struje se određuje na isti način kao i smer elektromotorne sile.



Šta je dinamička indukcija?

To je ona indukcija koja nastaje kada se provodnik kreće u spoljašnjem magnetnom polju.

Za ovakav slučaj indukovana elektromotorna sila se može proračunavati u nekim slučajevima preko formule Faradejevog zakona (gore navedenog), a u svim slučajevima preko izraza:

$$\mathbf{e} = \int \left(\vec{\mathbf{v}} \times \vec{\mathbf{B}} \right) \cdot d\vec{\mathbf{l}}$$

Šta je statička indukcija?

To je onaj tip indukcije kod koje provodnik miruje u spoljašnjem magnetnom polju, a kroz njega propuštamo vremenski promenljivu električnu struju.

Koja je jedinica za indukovanu elektromotornu silu?

Volt [V]

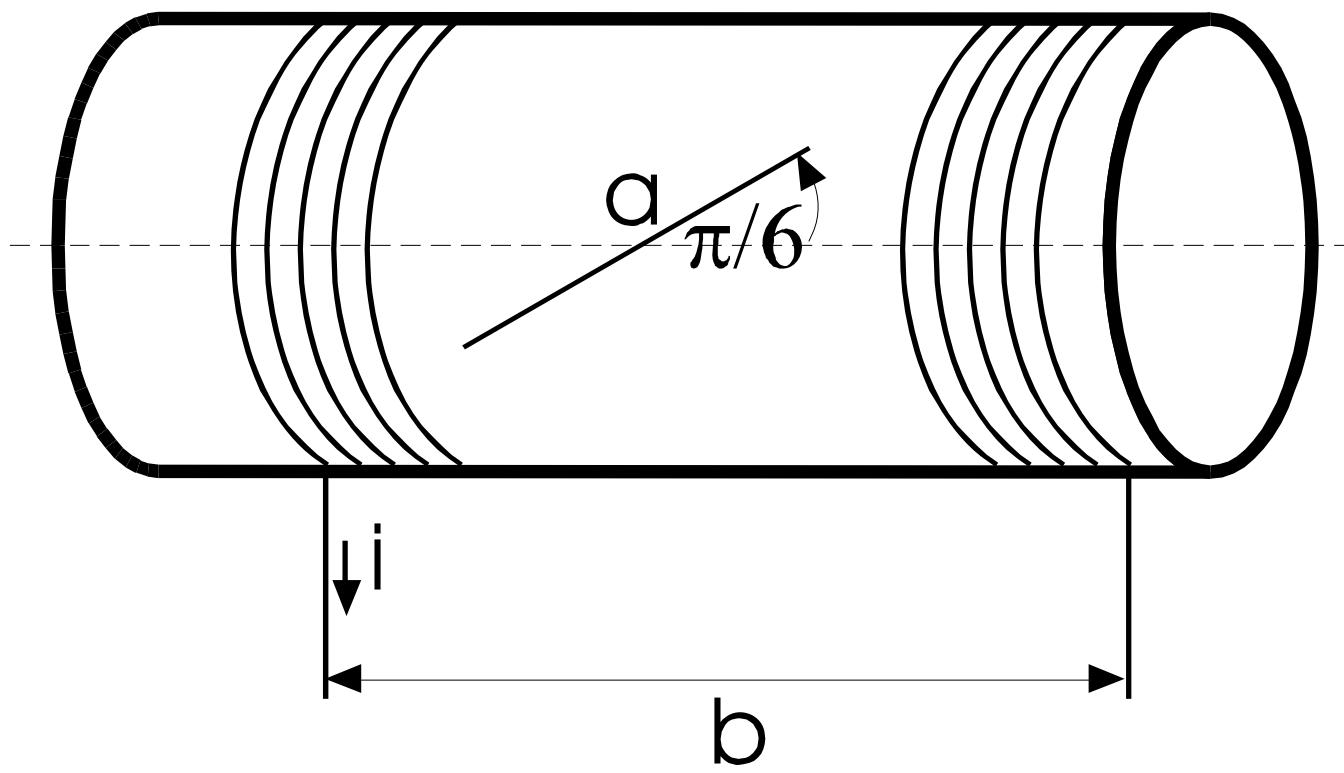
Postoji nekoliko jako značajnih primena Faradejevog zakona u praksi: generatori jednosmernog i naizmeničnog signala, komutator, fluksmetar...

ZADACI:

10.1 Solenoid dužine $b = 100$ cm ima namotaj sa $N = 1200$ ravnomerno i gusto namotanih zavoja. Struja u namotaju se menja i njen intenzitet je:

$$i = I_0 \sin(\omega t + \psi) = 2\sqrt{2} \sin\left(5000t + \frac{\pi}{3}\right).$$

U sredini solenoida se, kao na slici. nalazi kolo kvadratnog oblika dužine stranice $a = 1$ cm. Odrediti indukovanu elektromotornu silu u kvadratnom kolu.



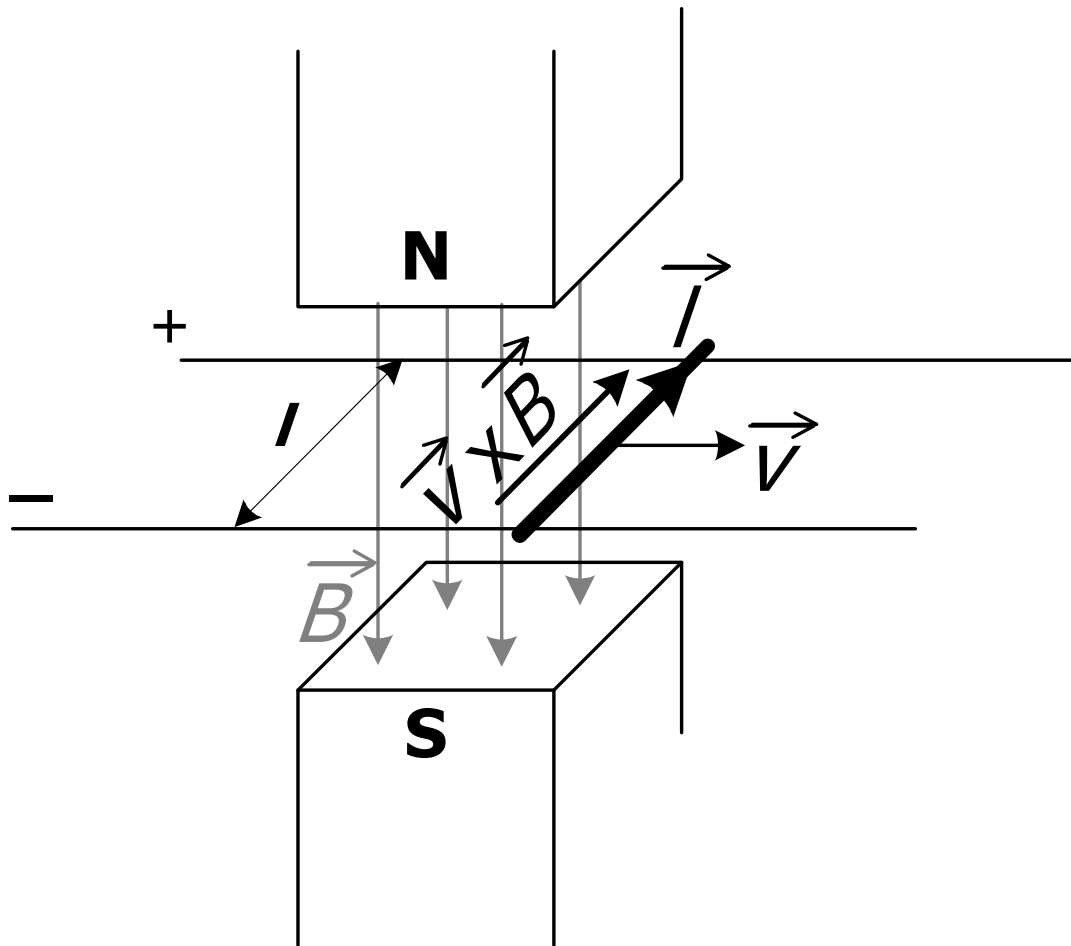
GENERATOR JEDNOSMERNOG SIGNALA

Teorijski model generatora jednosmernog signala je prototip. Ne koristi se u praksi (nepraktičan je jer je zasnovan na translatorsnom kretanju).

Kako radi ovaj generator?

- Između polova stalnog magneta su postavljene dve paralelne provodne šine. Preko tih šina je položena pravolinijska provodna šipka dužine l .
- Pod silom tereta šipka se kreće stalnom brzinom $\vec{v}$ (bez trenja) u homogenom spoljašnjem polju magneta.

Zbog tog kretanja na šinama se indukuje razlika potencijala (taj napon se može izmeriti voltmetrom na krajevima šina).



$$\mathbf{e} = \left(\vec{\mathbf{v}} \times \vec{\mathbf{B}} \right) \cdot \vec{\mathbf{I}} =$$

$$= \left(\mathbf{v} \cdot \mathbf{B} \cdot \sin(\vec{\mathbf{v}}, \vec{\mathbf{B}}) \right) \cdot I \cdot \cos(\vec{\mathbf{v}} \times \vec{\mathbf{B}}, \vec{\mathbf{I}}) =$$

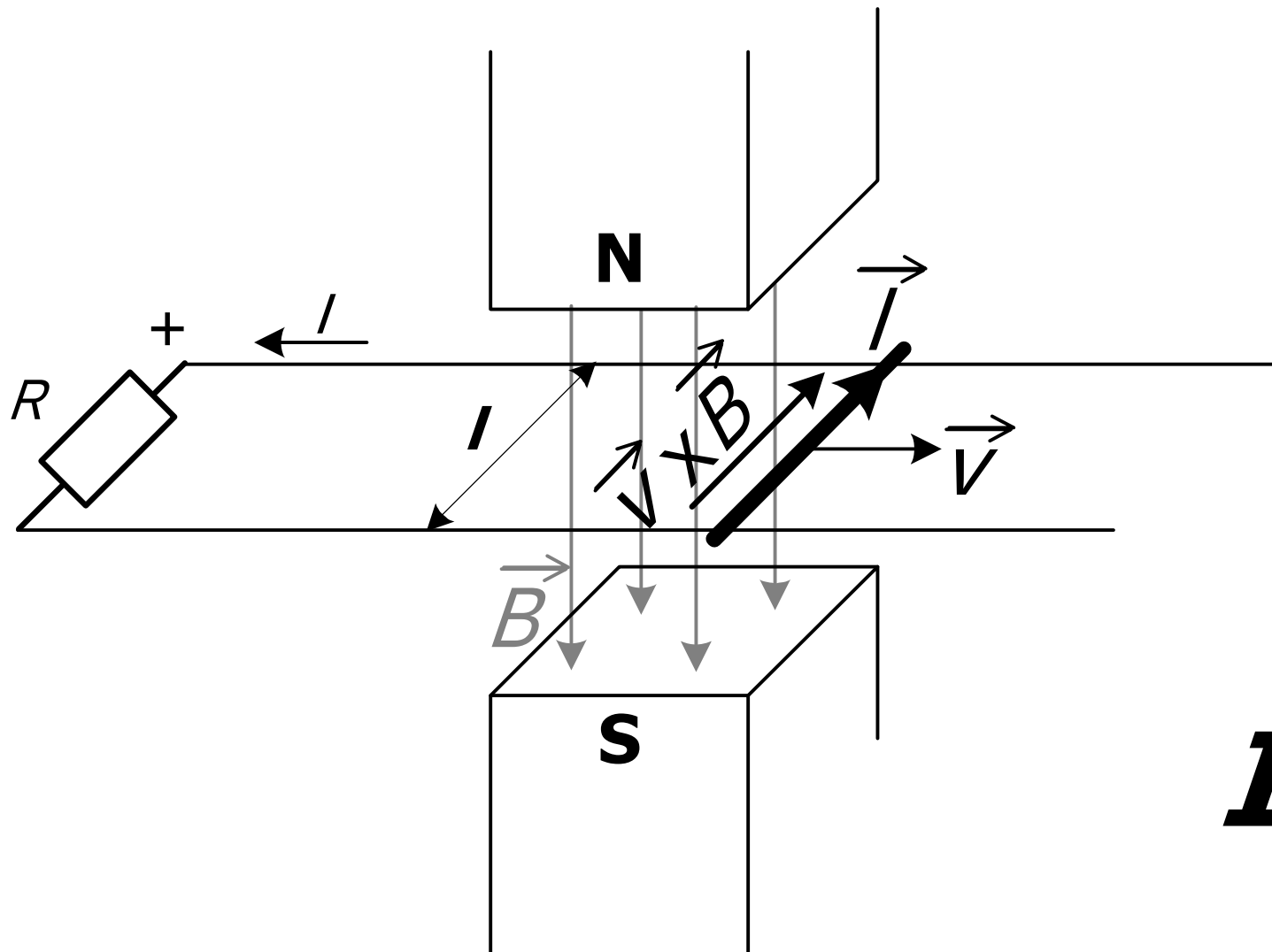
$$= \left(\mathbf{v} \cdot \mathbf{B} \cdot \sin \frac{\pi}{2} \right) \cdot I \cdot \cos 0 =$$

$$= \mathbf{vBI}$$

Pošto je indukovana elektromotorna sila konstantna, obeležava se velikim slovom:

$$\boldsymbol{E = vBl}$$

A ako se šine prespoje otpornikom, javiće se jednosmerna indukovana električna struja.



$$\mathbf{I} = \frac{\mathbf{E}}{\mathbf{R}}$$

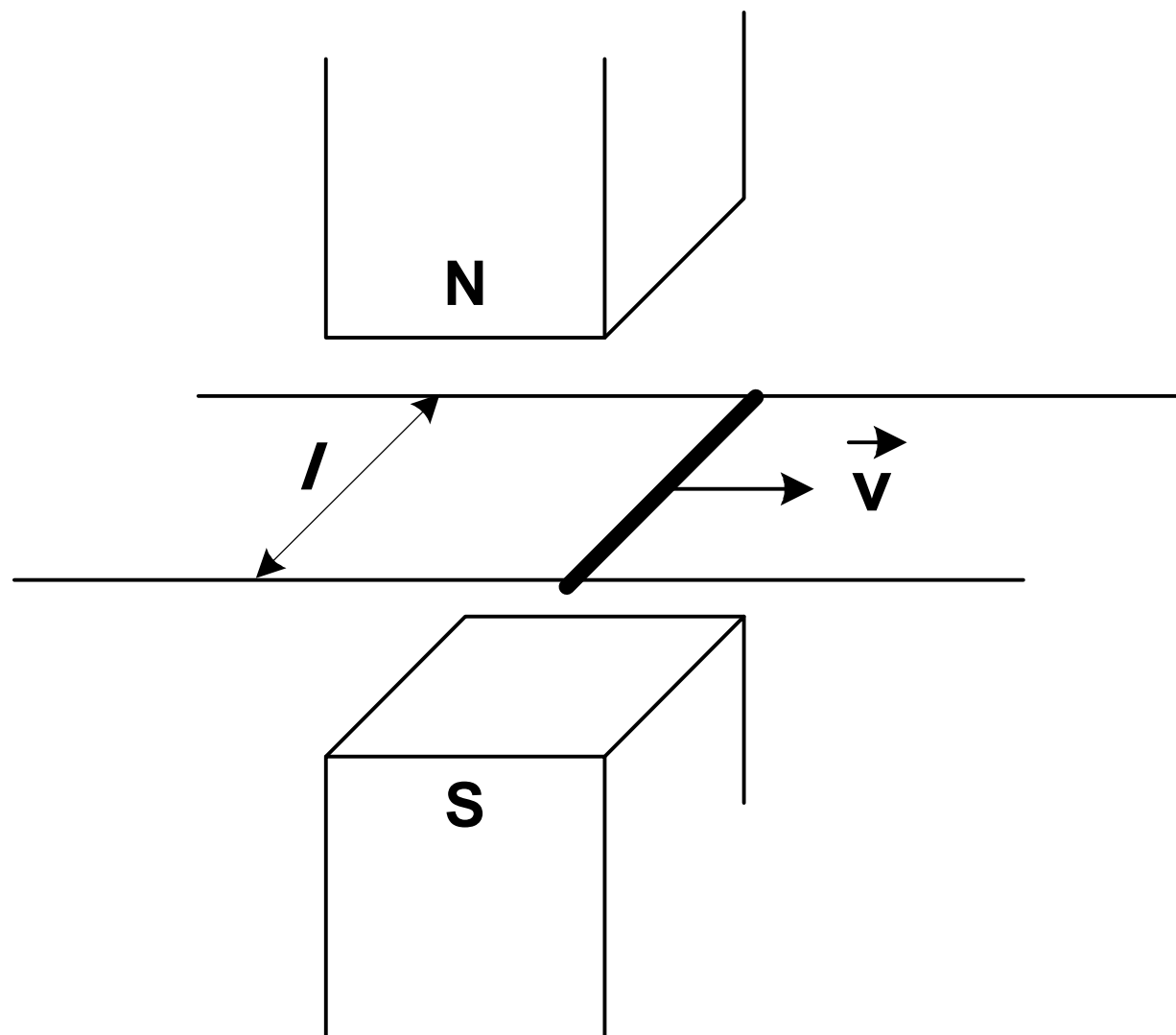
Sa pojavom struje u kolu javlja se i magnetna sila koja deluje na pokretni provodni štap:

$$\vec{F} = I \cdot \vec{l} \times \vec{B}$$

ZADACI:

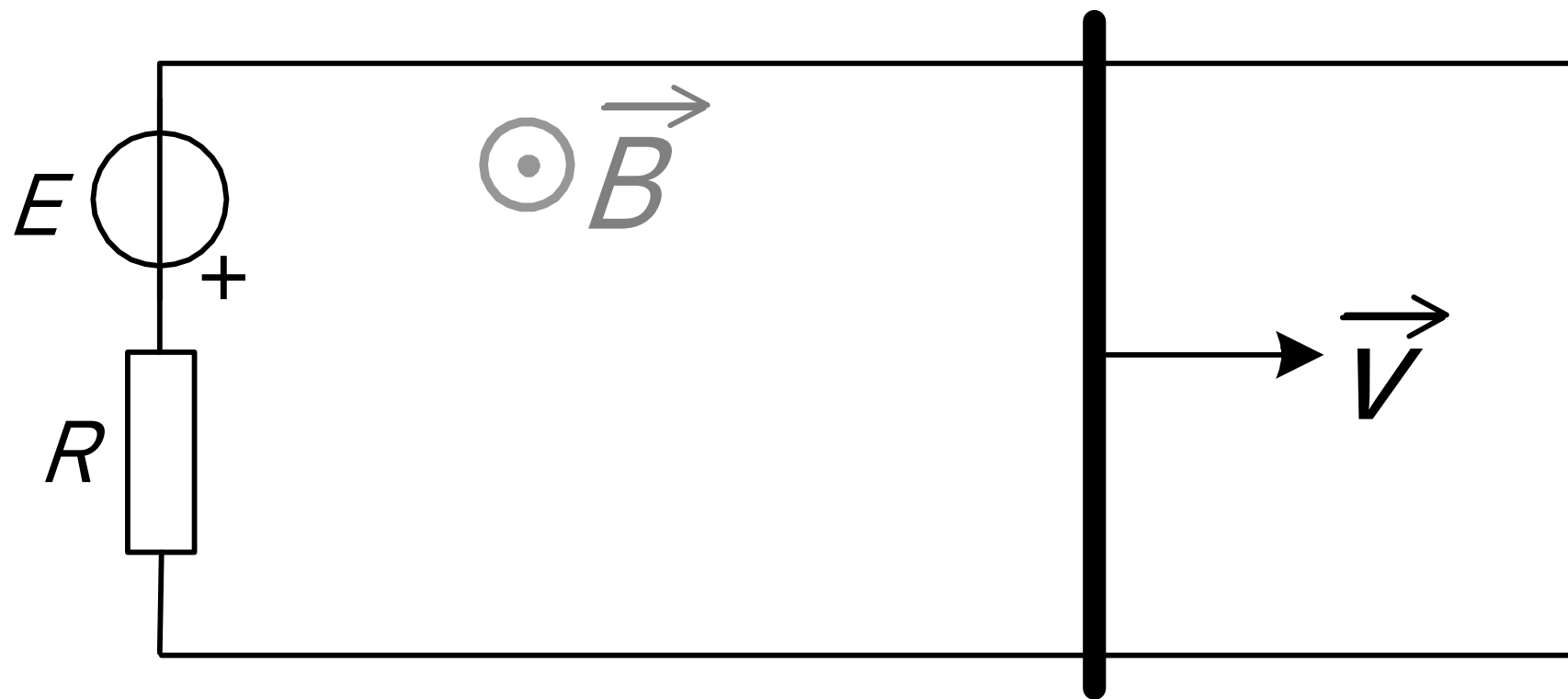
11.1 Na slici su prikazane dve paralelne nepokretne provodne šine u homogenom magnetnom polju indukcije $B = 1 \text{ T}$. Duž šina, normalno na njih, klizi provodna šipka brzinom $v = 1 \text{ m/s}$. Rastojanje između šina je $l = 1 \text{ m}$.

- a) Izračunati razliku potencijala između nepokretnih šina.**
- b) Ako se na jednom kraju šine spoje otpornikom otpornosti $R = 100 \text{ } \Omega$, a otpornost šina i šipke se može zanemariti, odrediti smer i intenzitet indukovane struje.**
- c) Šta će se desiti ako šipka promeni smer kretanja, a brzina ostane ista?**



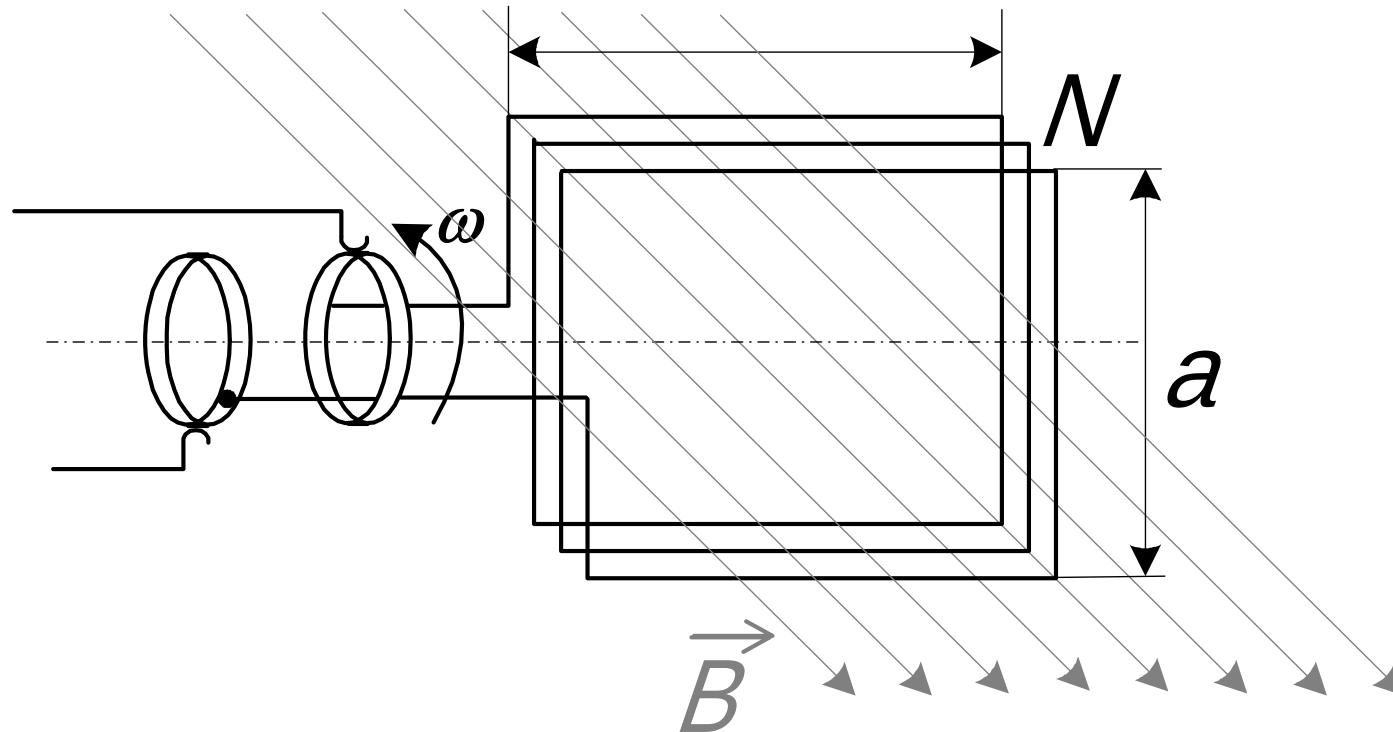
11.2 Na slici su prikazane dve paralelne nepokretne provodne šine u homogenom magnetnom polju indukcije $B = 0.5 \text{ T}$. Duž šina, normalno na njih, klizi provodna šipka brzinom $v = 3 \text{ m/s}$. Rastojanje između šina je $l = 2 \text{ m}$. Na jednom kraju šine su spojene generatorom elektromotorne sile $E = 2 \text{ V}$ i unutrašnje otpornosti $R = 2 \Omega$.

Odrediti smer i intenzitet struje u kolu.



GENERATOR NAIZMENIČNOG (PROSTOPERIODIČNOG) SIGNALA

Kako radi generator naizmeničnog signala?



Namotaj od N zavojaka provodne žice rotira u spoljašnjem homogenom magnetnom polju indukcije $\vec{B}$

Fluks koji se tom prilikom stvara je:

$$\Phi = \mathbf{NBS} \cdot \cos(\vec{B}, \vec{n}) = \mathbf{NBS} \cdot \cos \alpha$$

Indukovana elektromotorna sila je onda:

$$\begin{aligned} e &= -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt} (NBS \cdot \cos \alpha) = \\ &= -\left(-NBS \cdot \sin \alpha \cdot \frac{d\alpha}{dt} \right) \end{aligned}$$

gde je:

$$\frac{d\alpha}{dt} = \omega \quad \text{ugaona brzina (kružna učestanost)}$$

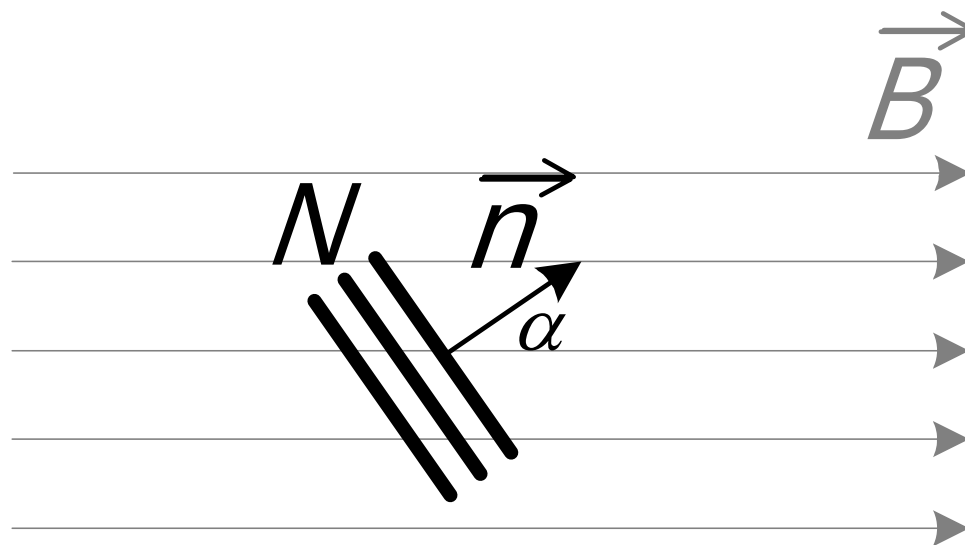
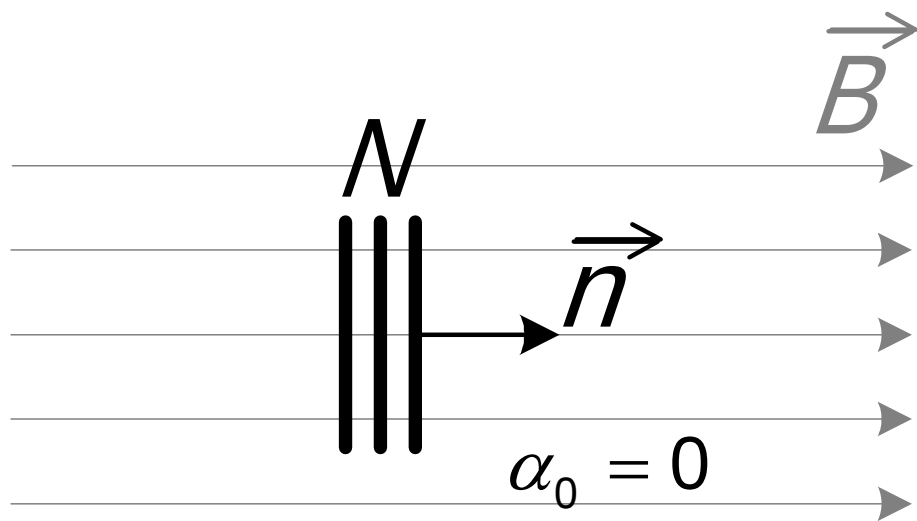
$$d\alpha = \omega \cdot dt$$

$$\alpha = \omega t + \textit{const}$$

U početnom trenutku vremena početni ugao je 0:

$$t_0 = 0 \quad \Rightarrow \quad \alpha_0 = \textit{const} = 0$$

$$\alpha = \omega t$$



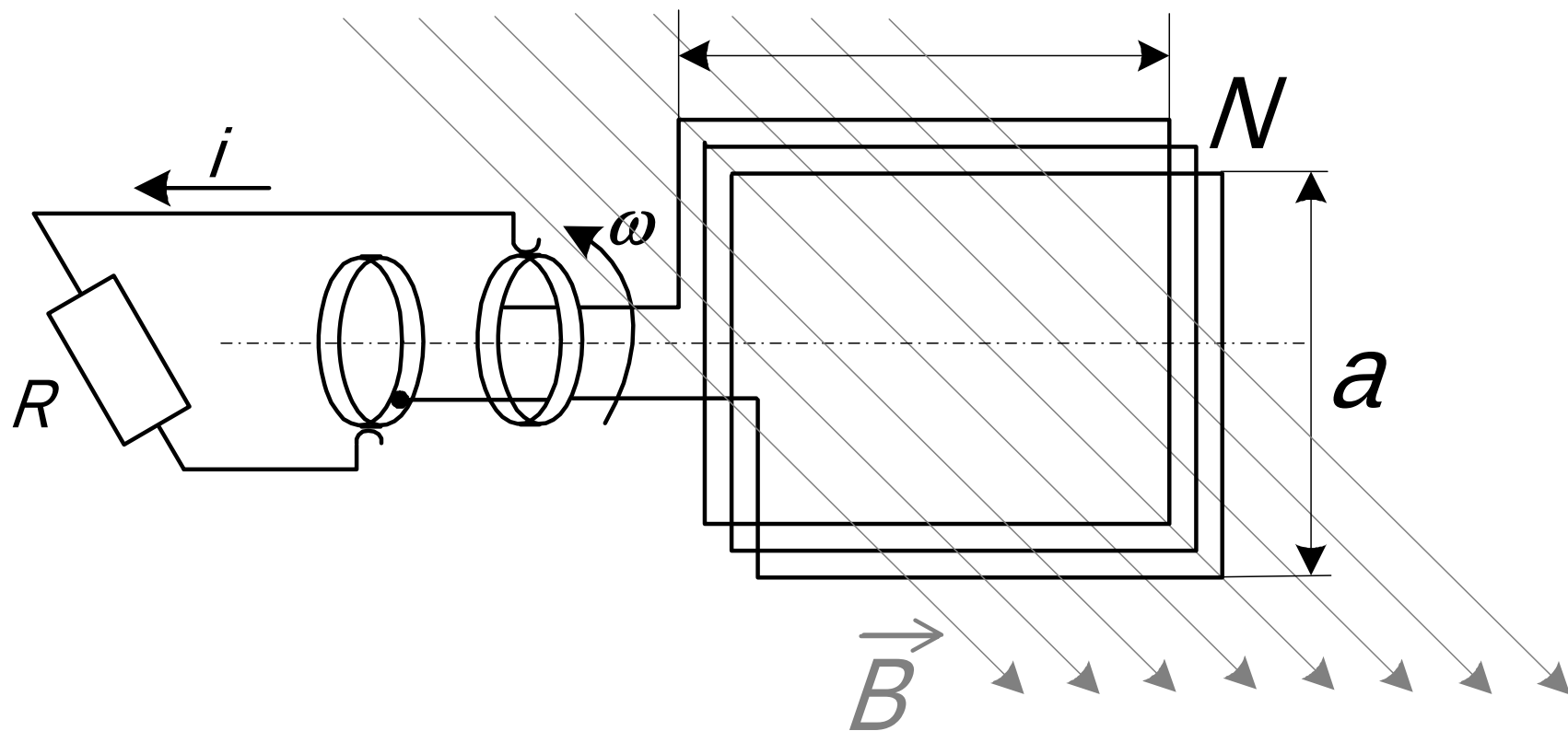
$$e = \omega NBS \cdot \sin \alpha$$

Konstantni deo $\omega NBS = E_m$

je amplituda ovog sinusnog signala pa je:

$$e = E_m \cdot \sin \omega t$$

Ako na krajeve generatora priključimo potrošač, kroz njega će proteći indukovana električna struja (koja je sinusnog oblika kao i elektromotorna sila).



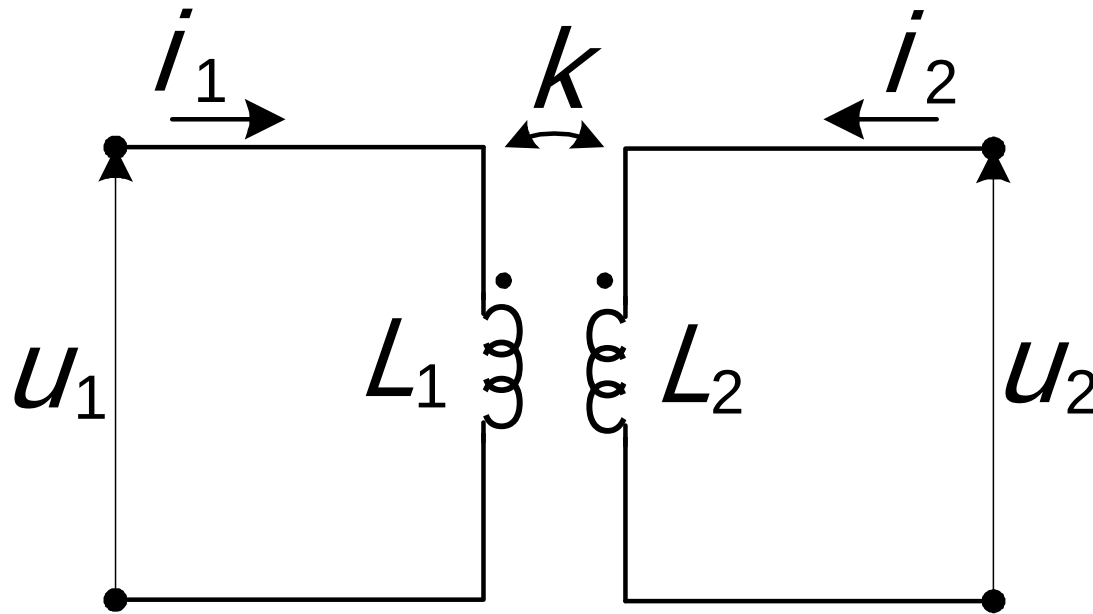
$$\boldsymbol{i} = \frac{\boldsymbol{e}}{\boldsymbol{R}} = \frac{\boldsymbol{E}_{\text{m}}}{\boldsymbol{R}} \sin \omega t = \boldsymbol{I}_{\text{m}} \sin \omega t$$

SPREGNUTI NAMOTAJI SA VREMENSKI PROMENLJIVIM STRUJAMA

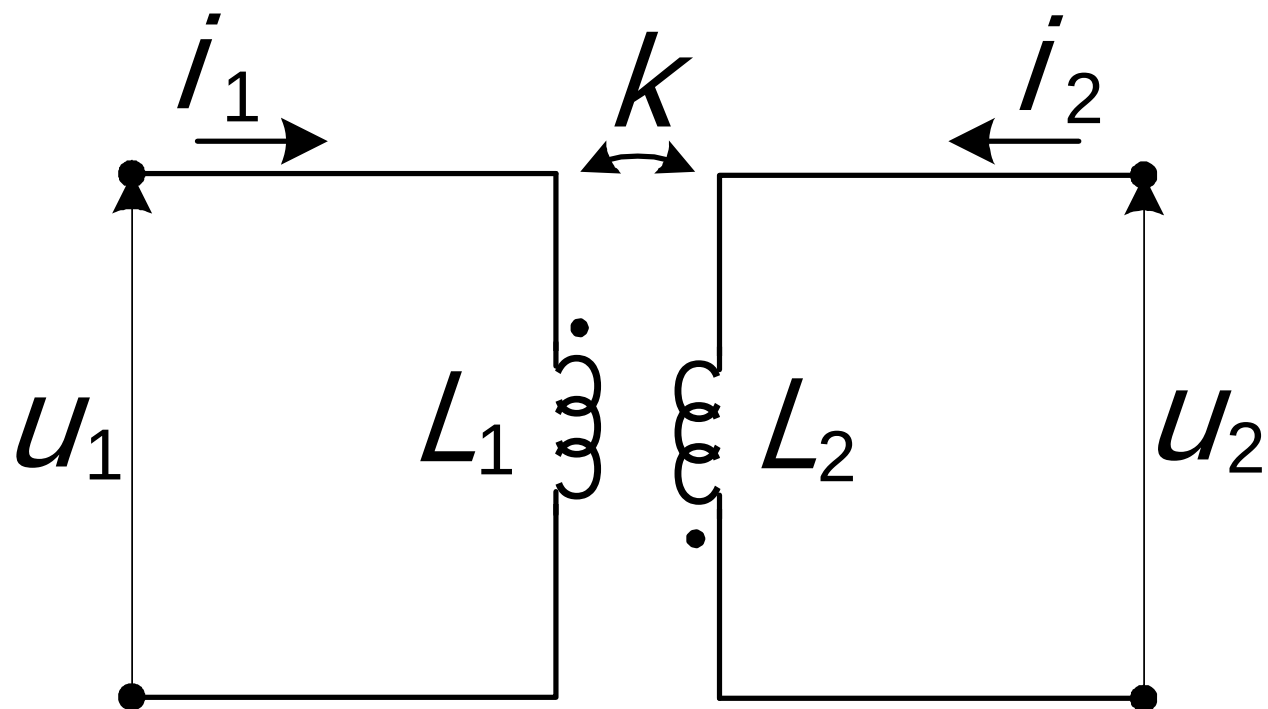
Promenljiva magnetna polja su bitna i za rad spregnutih namotaja (transformatora). Ako kroz jedan namotaj propuštamo vremenski promenljivu električnu struju, ona će proizvesti vremenski promenljivi magnetni fluks kroz drugi namotaj i indukovaće se elektromotorna sila na krajevima drugog namotaja (elektromotorna sila međusobne indukcije).

Zbog proticanja vremenski promenljive električne struje kroz pojedinačne namotaje stvaraće se vremenski promenljivi fluks, pa će se na njihovim krajevima indukovati elektromotorna sila samoindukcije.

Kako se šematski prikazuju spregnuti namotaji u električnom kolu?



$$L_{12} > 0$$



$$L_{12} < 0$$

Tačkama se definiše znak magnetne indukcije:

- ako je međusobna induktivnost L_{12} pozitivna, obe tačke se stavljaju na ulaz namotaja (ili obe na izlaz)**
- ako je međusobna induktivnost L_{12} negativna, tačke se stavljaju naizmenično, jedna na ulaz, jedna na izlaz**
- ulaz namotaja je kraj namotaja u koji struja ulazi, a izlaz je onaj kraj namotaja iz koga struja izlazi.**

Važno je ovim tačkama obeležiti predznak međusobne induktivnosti, jer se to na šematskom prikazu inače ne vidi (vidi se samo na realnom spregnutom kolu).

Prema ekvivalentnoj šemi spregnutih namotaja mogu se pisati jednačine po 1. i 2. Kirhofovom zakonu:

$$U_1 + e_1 + e_{21} = 0 \quad \dots (1)$$

$$U_2 + e_{12} + e_2 = 0 \quad \dots (2)$$

Pošto i kod vremenski promenljivih električnih struja važi da je induktivnost

$$L = \frac{\Phi}{i}$$

ove jednačine se mogu napisati i kao

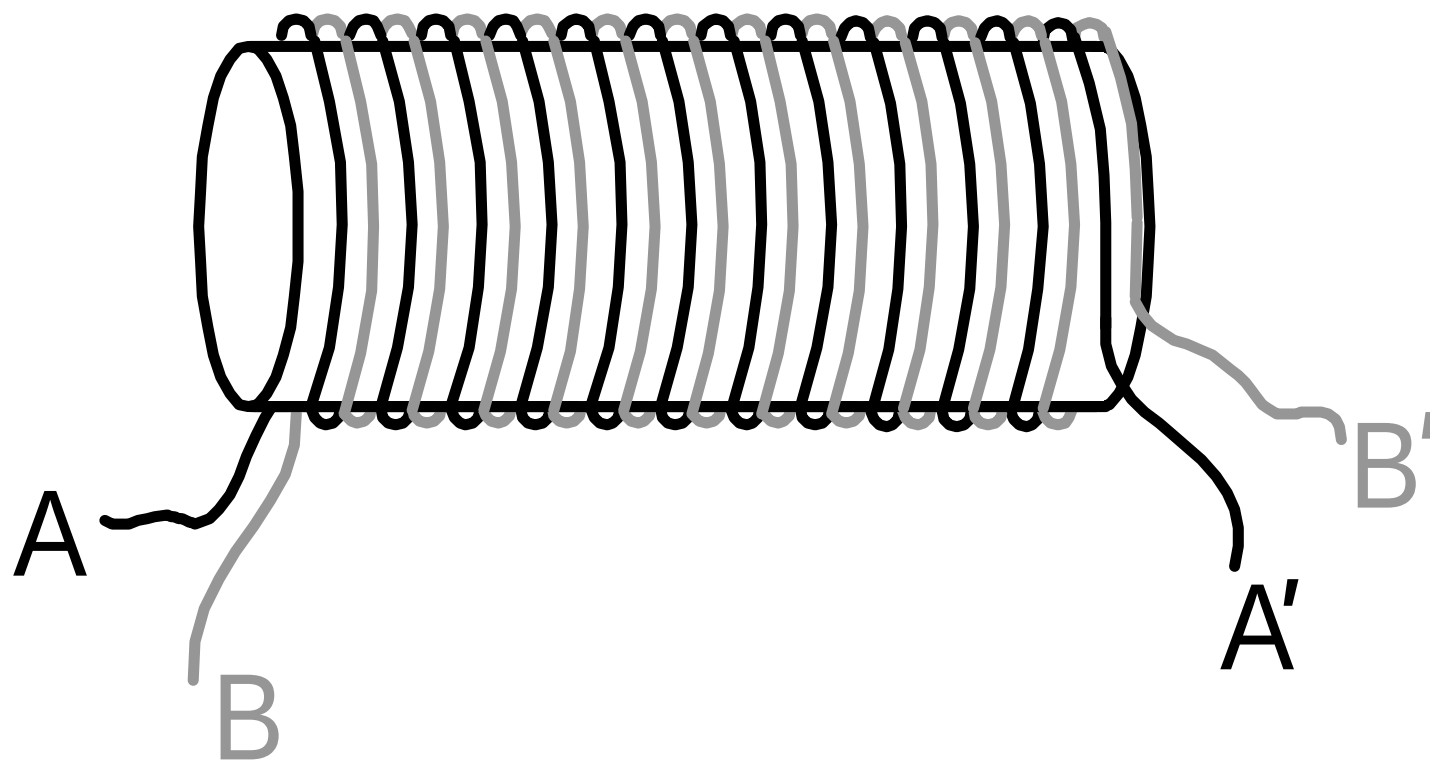
$$u_1 - L_1 \frac{di_1}{dt} - L_{21} \frac{di_2}{dt} = 0 \quad \dots (1)$$

$$u_2 - L_{12} \frac{di_1}{dt} - L_2 \frac{di_2}{dt} = 0 \quad \dots (2)$$

ZADACI:

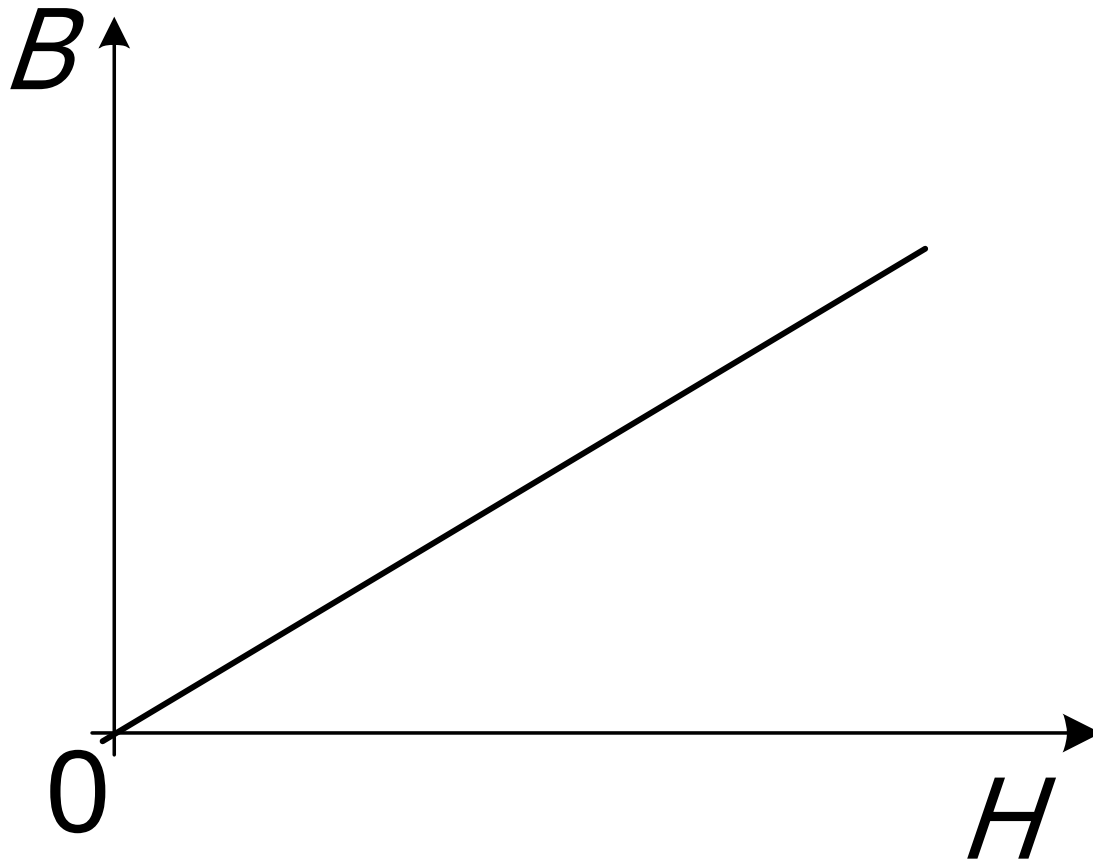
13.1 Na kartonskom jezgru namotana su dva namotaja, zavojak do zavojka, kao na slici.

- a) Nacrtati ekvivalentnu šemu veze ako su spojeni krajevi A' i B' .**
- b) Nacrtati ekvivalentnu šemu veze ako su spojeni krajevi A' i B .**
- c) Nacrtati ekvivalentnu šemu veze ako su istovremeno spojeni krajevi A' i B' i krajevi A i B .**



ENERGIJA U MAGNETNOM POLJU

Kako se izražava energija magnetnog polja u linearnim sredinama?



$$\boldsymbol{W}_{\text{m}} = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{2}} \boldsymbol{\Phi} \cdot \boldsymbol{i} = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{2}} \boldsymbol{L} \boldsymbol{i}^2 = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{2}} \frac{\boldsymbol{\Phi}^2}{\boldsymbol{L}}$$

Energija magnetnog polja može da se izrazi i preko zapreminske gustine energije w_m :

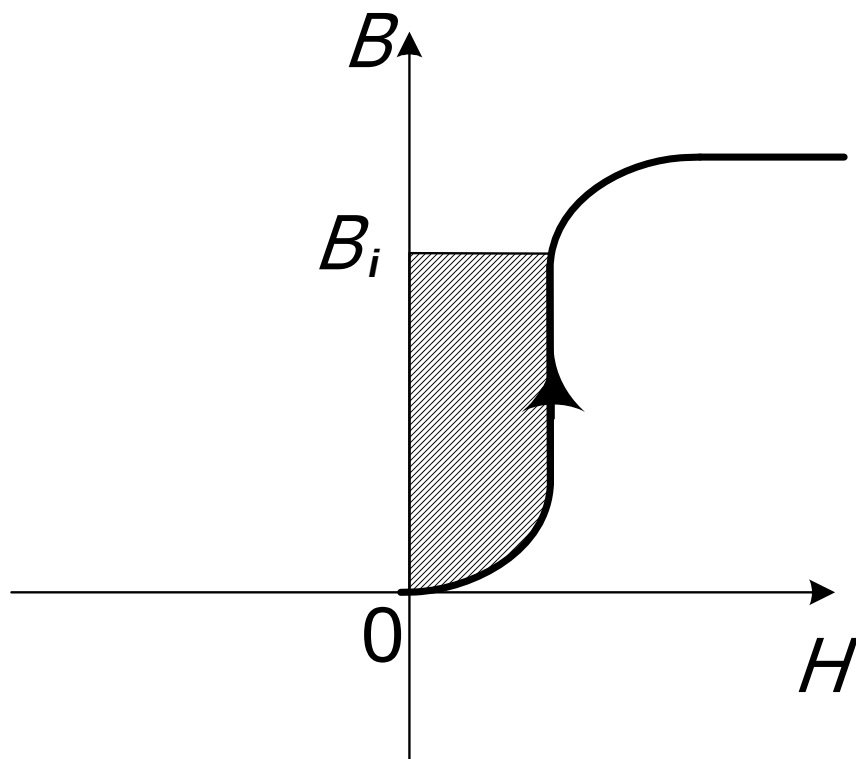
$$\mathbf{W_m = \int_V w_m dV}$$

gde je:

$$\mathbf{W}_m = \frac{1}{2} \mathbf{B} \cdot \mathbf{H} = \frac{1}{2} \mu \mathbf{H}^2 = \frac{1}{2} \frac{\mathbf{B}^2}{\mu}$$

Kako se izražava energija magnećenja feromagnetika?

$$W_m = V \int_0^{B_i} H \cdot dB$$



Integral $\int_0^{B_i} H \cdot dB$

odgovara površini iznad krive magnećenja. To predstavlja energiju koju izvor utroši da bi se u jezgri postigla magnetna indukcija B_i (indukcija za zadata struju i).

PITANJA ZA PROVERU ZNANJA

1. Koja je jedinica za magnetnu silu?

njutn

[N]

2. Koja je jedinica za magnetnu indukciju?

tesla

[T]

3. Koja je jedinica za jačinu magnetnog polja?

A
—
m

4. Koja je jedinica za magnetizaciju?

A

—

m

5. Koja je jedinica za magnetni fluks?

weber [Wb]

6. Koja je jedinica za induktivnost?

henri

[H]

7. Koja je jedinica za međusobnu induktivnost?

henri

[H]

8. Koja je jedinica za indukovanu elektromotornu silu?

volt

[V]

9. Koja je jedinica za magnetnu energiju?

džul

[J]

10. Kakva je veličina magnetna indukcija?

skalarna

vektorska

11. Kakva je veličina jačina magnetnog polja?

skalarna

vektorska

12. Kakva je veličina fluks?

skalarna

vektorska

13. Kakva je veličina induktivnost?

skalarna

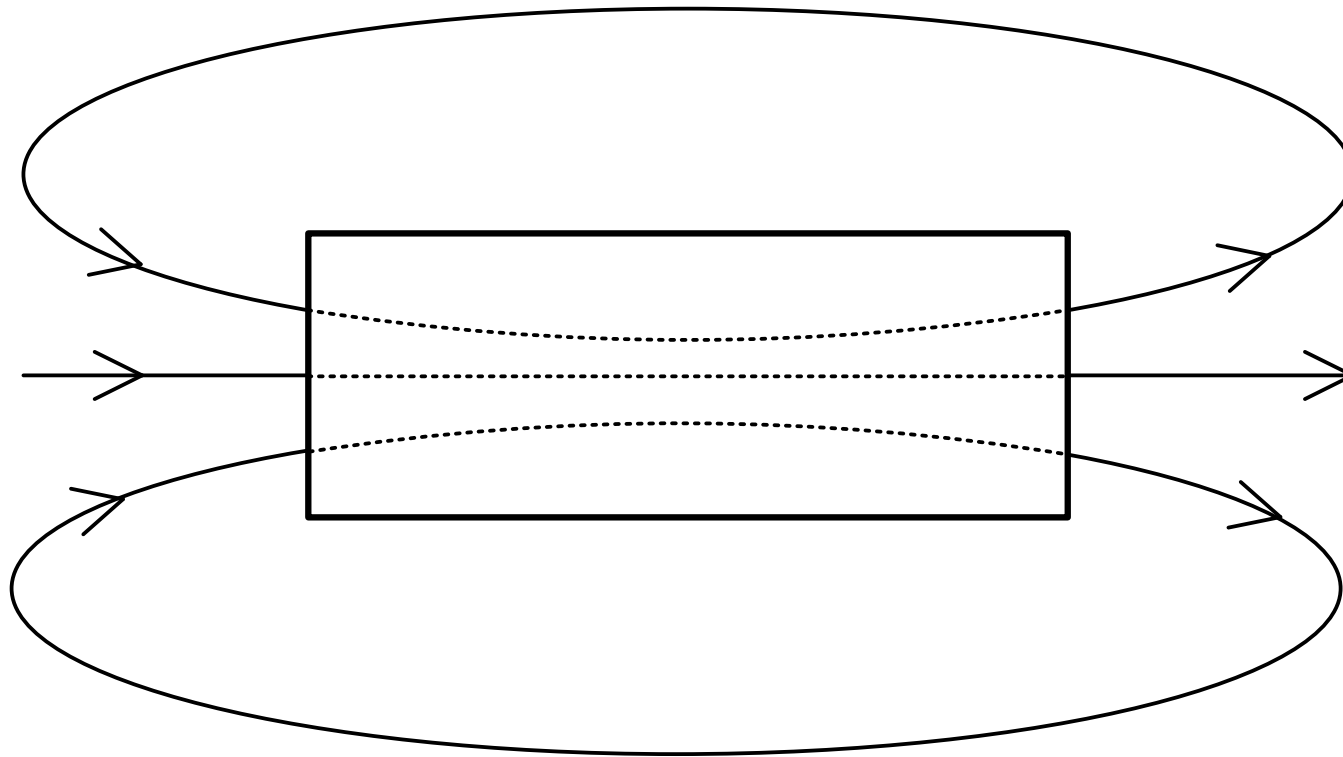
vektorska

14. Linije magnetne indukcije su:

**linije na koje je vektor
magnetne indukcije uvek
tangentan**

**linije na koje je vektor magnetne indukcije
uvek normalan**

15. Ucrtati severni i južni pol magneta prema linijama magnetne indukcije na slici.



**16. Ucrtati linije magnetne indukcije prema
zadatim polovima magneta na slici.**



17. Kako se zove konstanta μ ?

**apsolutna dielektrična
konstanta**

18. Kako se zove konstanta μ_0 ?

**dielektrična konstanta
vakuuma i vazduha**

19. Kako se zove konstanta μ_r ?

**relativna dielektrična
konstanta**

20. Koju jedinicu ima dielektrična konstanta μ_0 ?

$$\frac{\text{N}}{\text{A}^2}$$

$$\frac{\text{H}}{\text{A}^2}$$

nema jedinicu

21. Koju jedinicu ima dielektrična konstanta μ_r ?

$$\frac{\text{H}}{\text{m}}$$

$$\frac{\text{H}}{\text{A}^2}$$

nema jedinicu

22. Koju jedinicu ima dielektrična konstanta μ ?

$$\frac{\text{N}}{\text{A}^2}$$

$$\frac{\text{H}}{\text{A}^2}$$

nema jedinicu

23. Magnetna sila kojom međusobno deluju dva provodnika sa strujom na slici je:



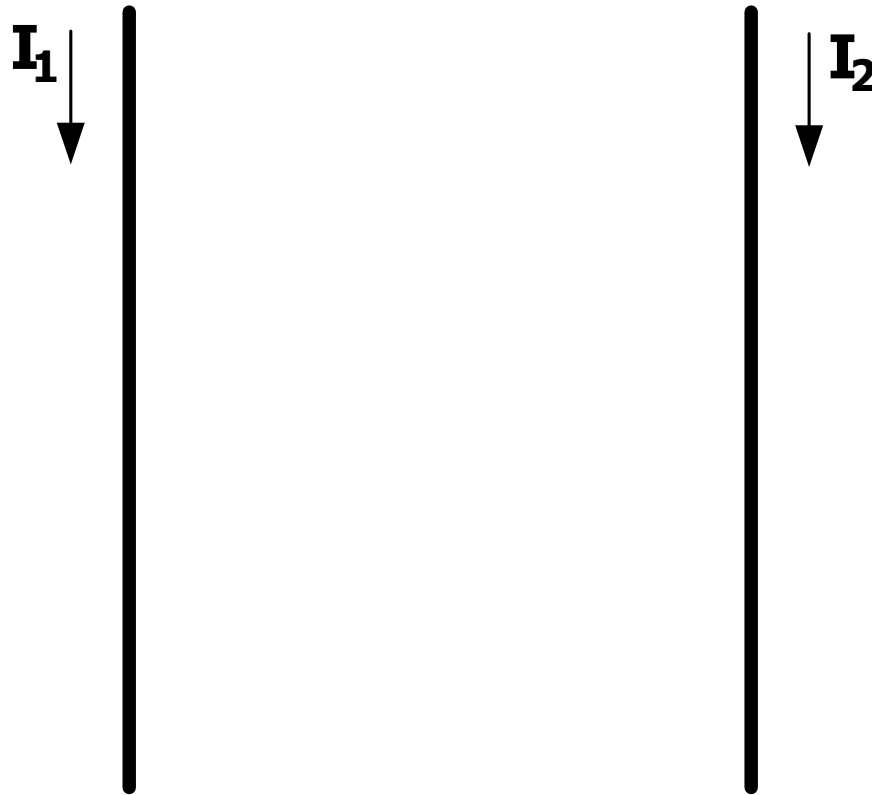
24. Magnetna sila kojom međusobno deluju dva provodnika sa strujom na slici je:

privlačna

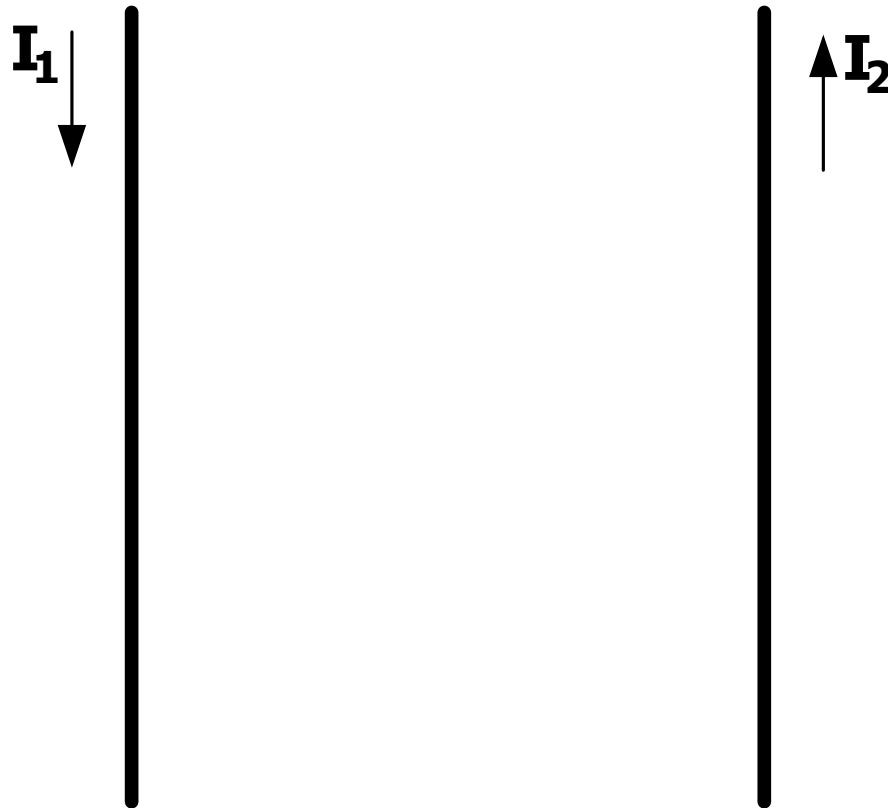
odbojna



25. Ucrtati magnetnu silu kojom međusobno deluju dva provodnika sa strujom jedan na drugi.



26. Ucrtati magnetnu silu kojom međusobno deluju dva provodnika sa strujom jedan na drugi.

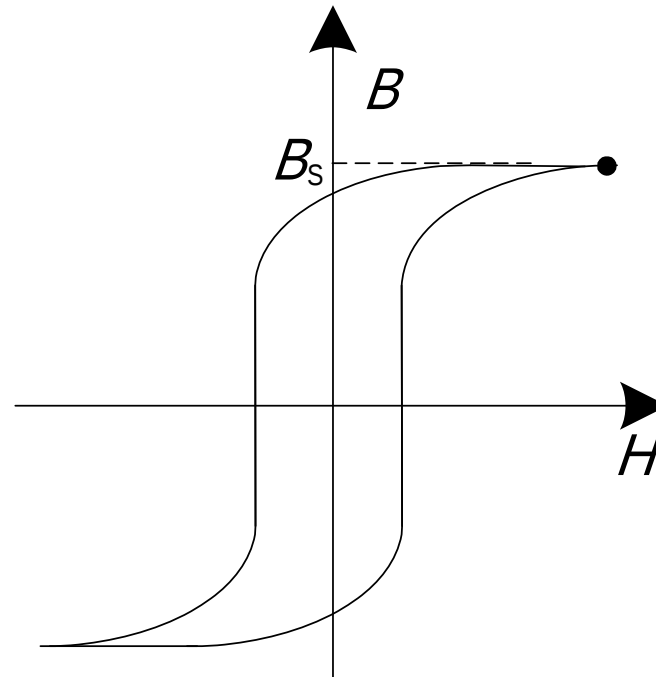


27. Označena tačka na slici predstavlja:

magnetnu indukciju u zasićenju

zaostalu (remanentnu) magnetnu indukciju

koercitivno polje

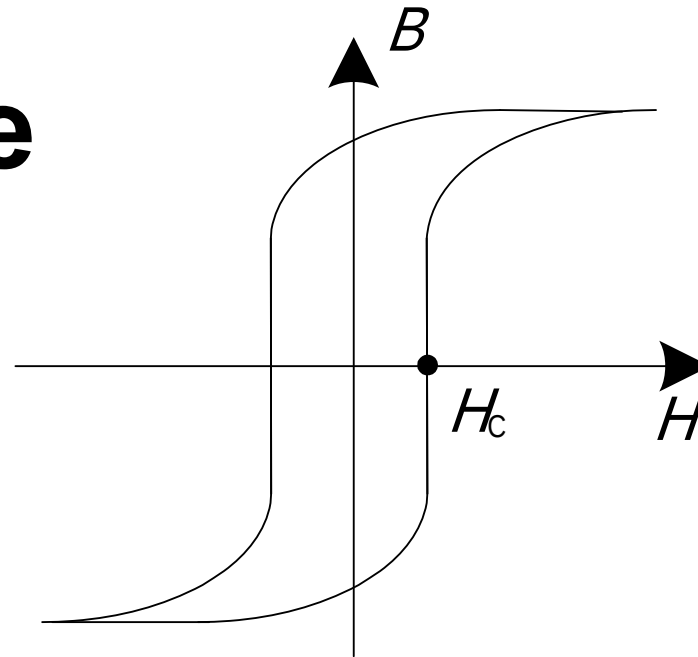


28. Označena tačka na slici predstavlja:

magnetnu indukciju u zasićenju

zaostalu (remanentnu) magnetnu indukciju

koercitivno polje

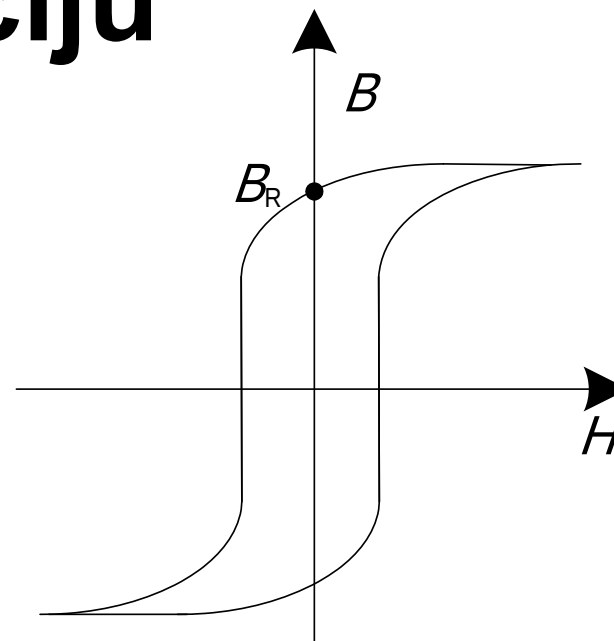


29. Označena tačka na slici predstavlja:

magnetnu indukciju u zasićenju

**zaostalu (remanentnu)
magnetnu indukciju**

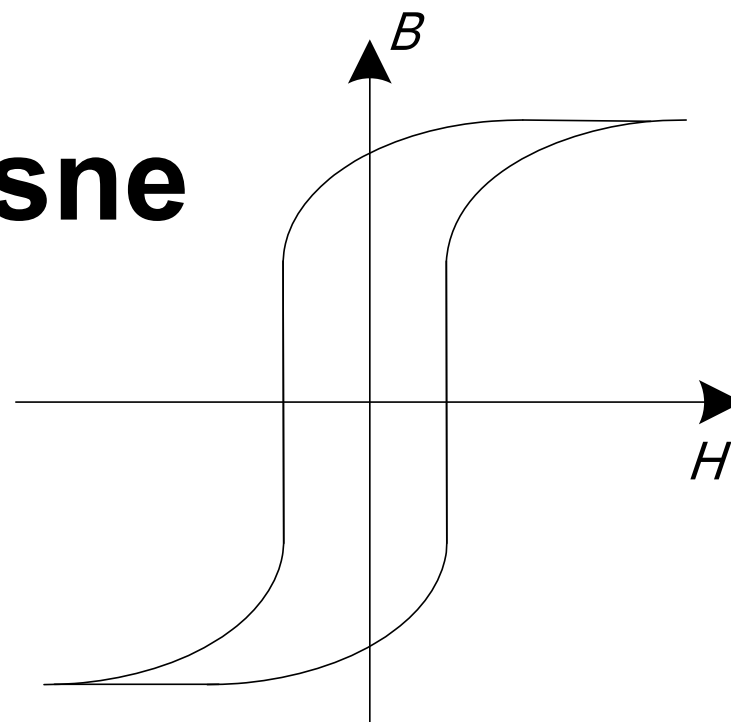
koercitivno polje



30. Na slici je prikazan grafik

prvobitne krive magnećenja

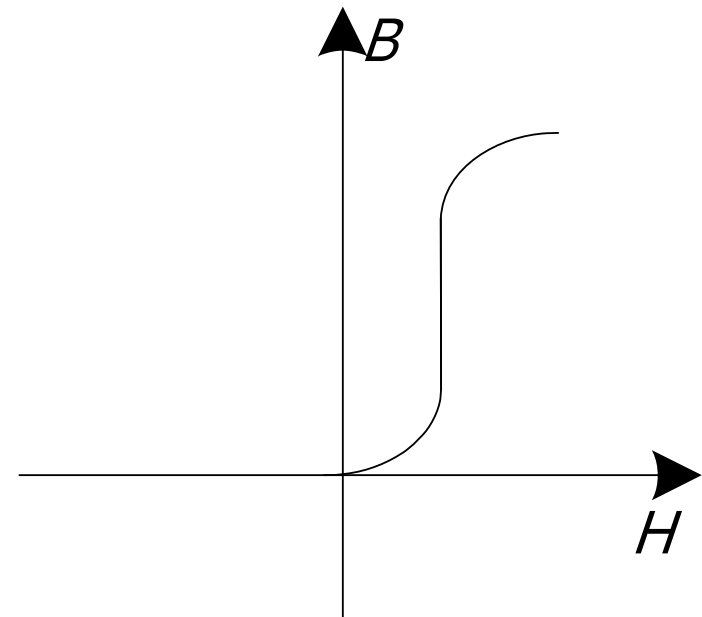
**magnetne histerezisne
krive**



31. Na slici je prikazan grafik

prvobitne krive magnećenja

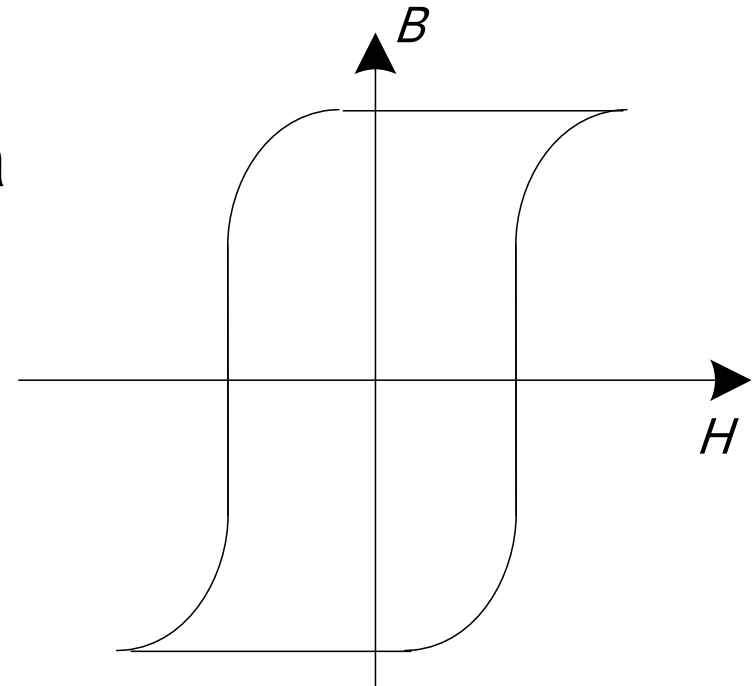
magnetne histerezisne krive



32. Na slici je prikazana histerezisna kriva

**magnetno tvrdog
materijala**

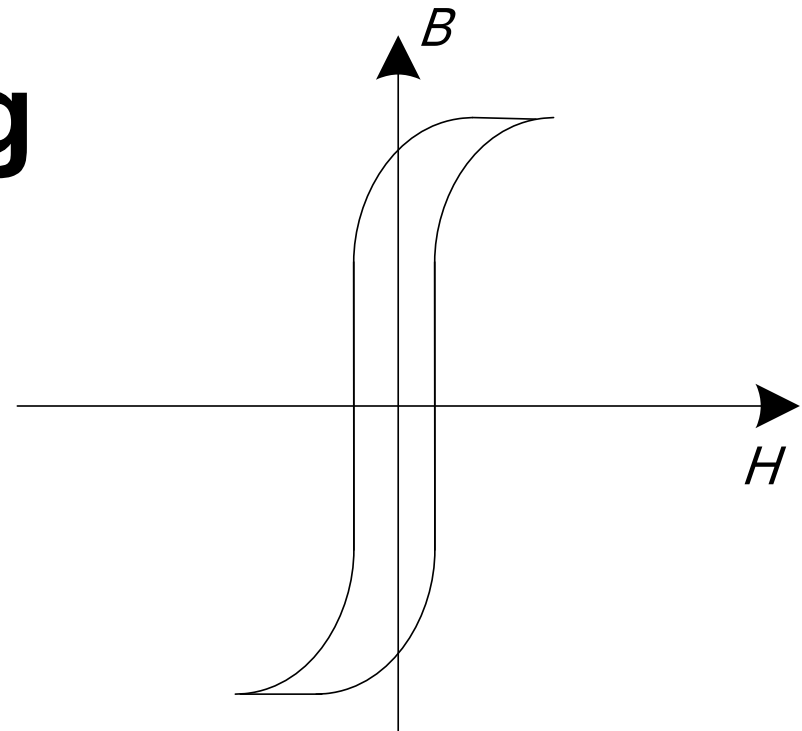
magnetno mekog materijala



33. Na slici je prikazana histerezisna kriva

magnetno tvrdog materijala

**magnetno mekog
materijala**



34. Dijamagnetici imaju:

μ_r neznatno manje od 1

μ_r neznatno veće od 1

$\mu_r \gg 1$

35. Paramagnetici imaju:

μ_r neznatno manje od 1

μ_r neznatno veće od 1

$\mu_r \gg 1$

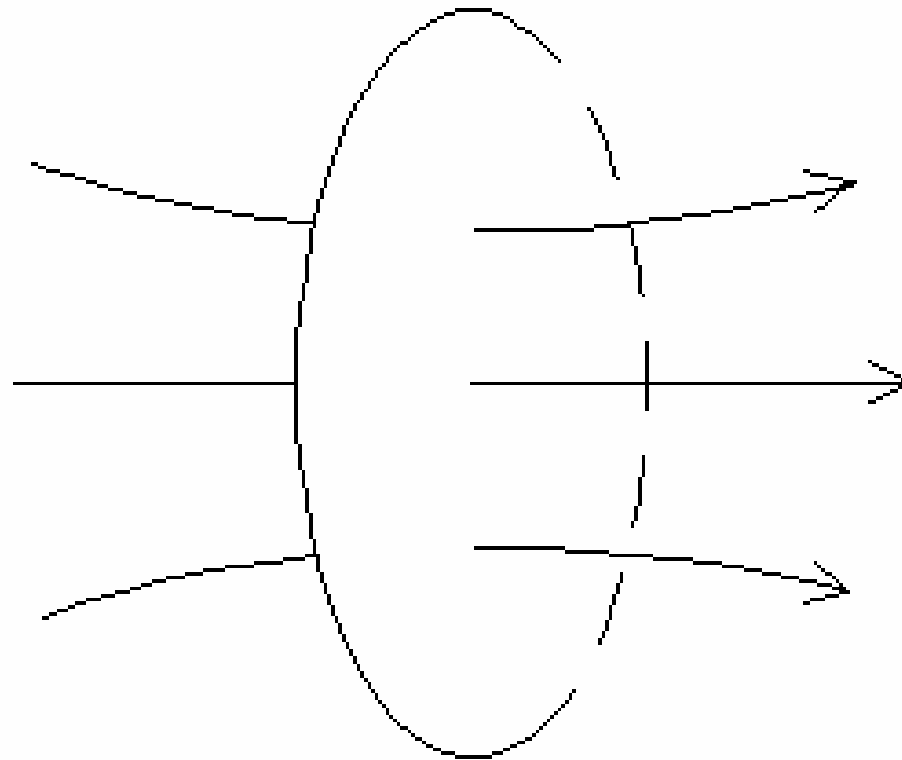
36. Feromagnetici imaju

$$\mu_r < 1$$

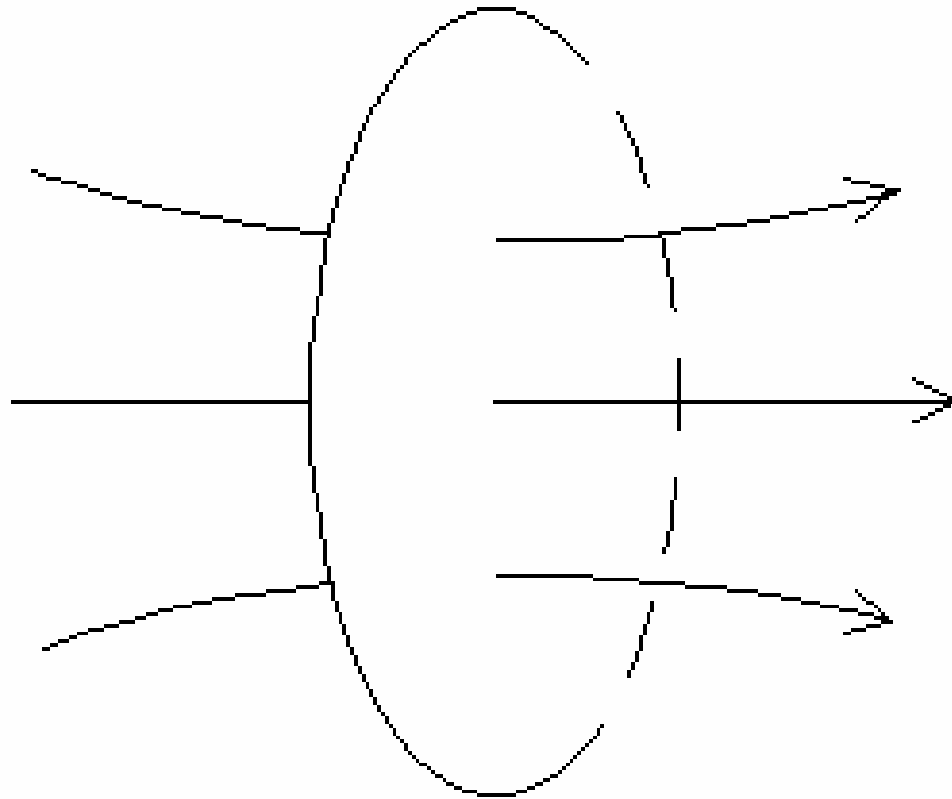
$$\mu_r \gg 1$$

$$\mu_r = 1$$

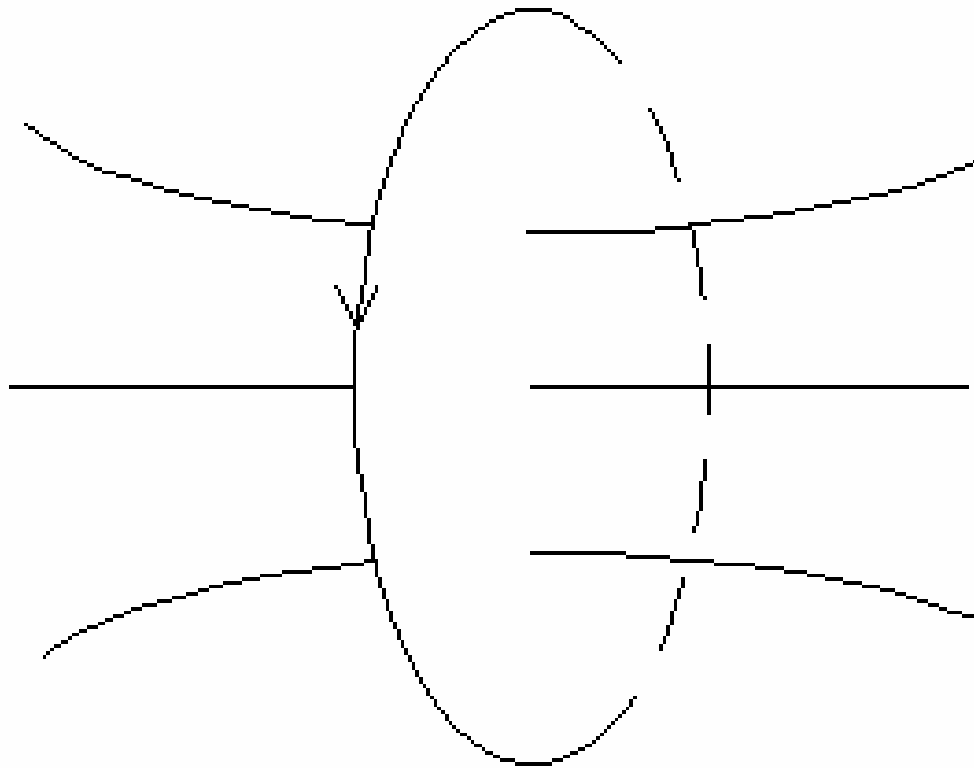
37. Ucrtati smer orijentacije konture tako da magnetni fluks kroz konturu na slici bude pozitivan.



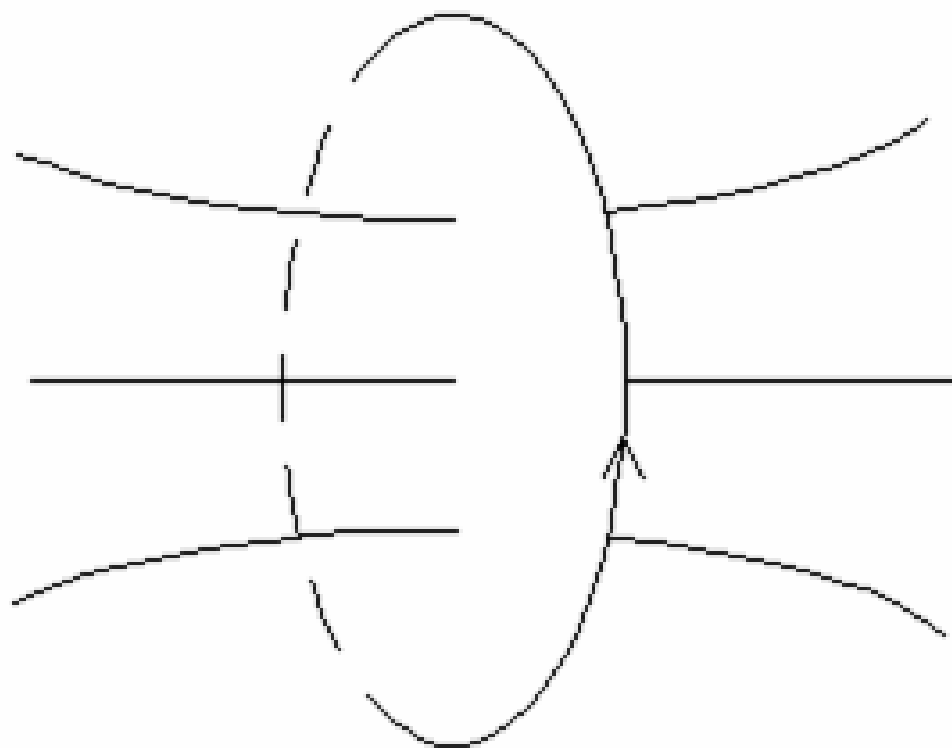
38. Ucrtati smer orientacije konture tako da magnetni fluks kroz konturu na slici bude negativan.



39. Ucrtati smer linija magnetne indukcije tako da magnetni fluks kroz konturu na slici bude pozitivan.



40. Ucrtati smer linija magnetne indukcije tako da magnetni fluks kroz konturu na slici bude negativan.



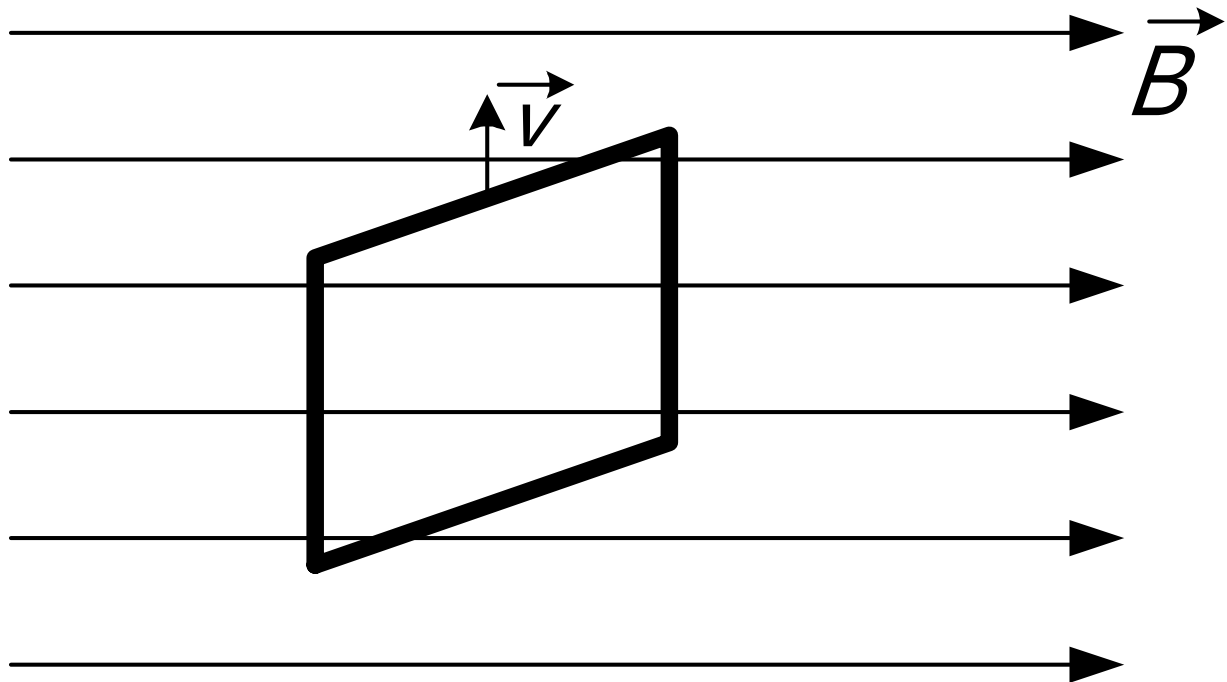
41. Pravougaona provodna kontura se nalazi u homogenom magnetnom polju indukcije $\vec{B}$ i kreće se stalnom brzinom $\vec{v}$

normalno na linije polja, kao što je prikazano na slici.

Da li će se u konturi indukovati elektromotorna sila?

da

ne

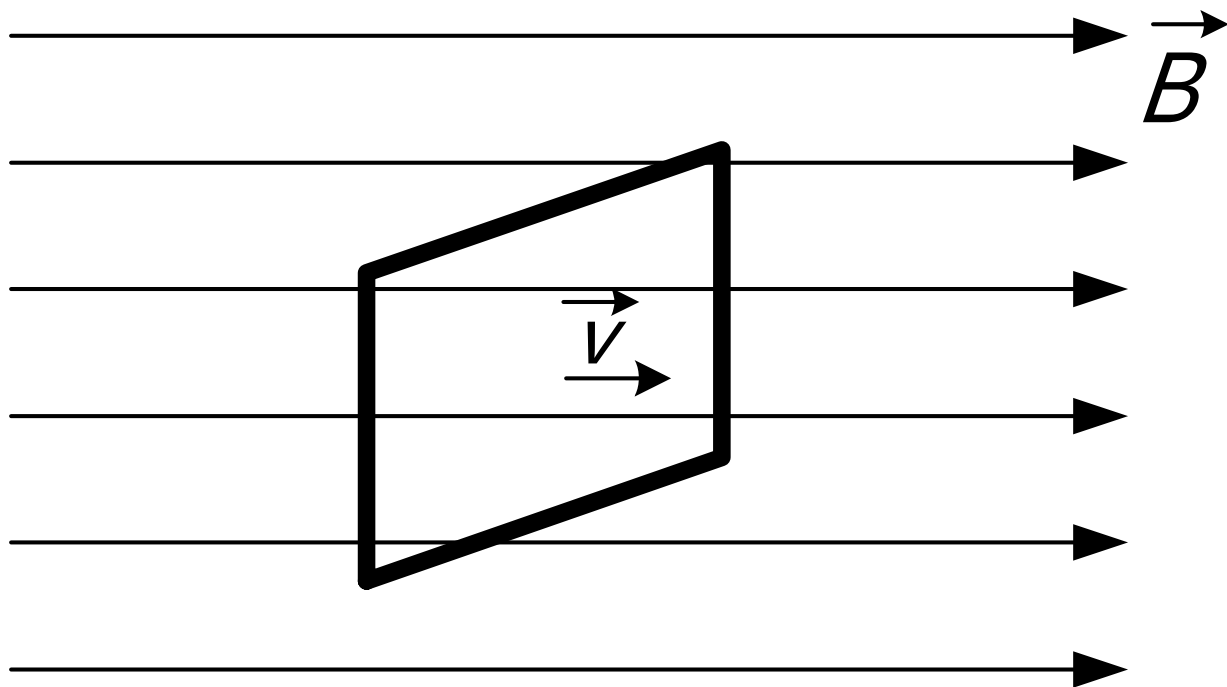


42. Pravougaona provodna kontura se nalazi u homogenom magnetnom polju indukcije $\vec{B}$ i kreće se stalnom brzinom $\vec{v}$ paralelno na linije polja, kao što je prikazano na slici.

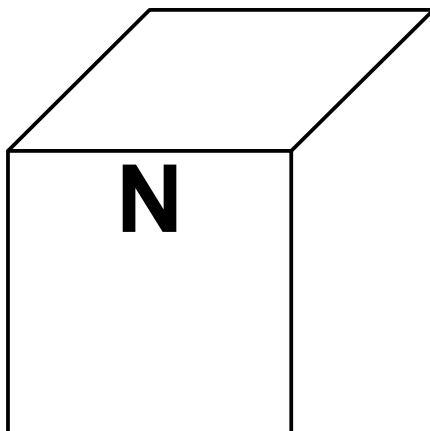
Da li će se u konturi indukovati elektromotorna sila?

da

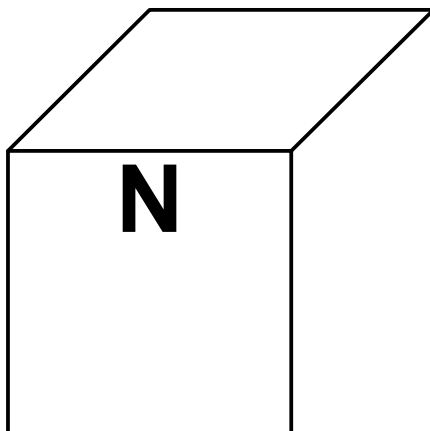
ne



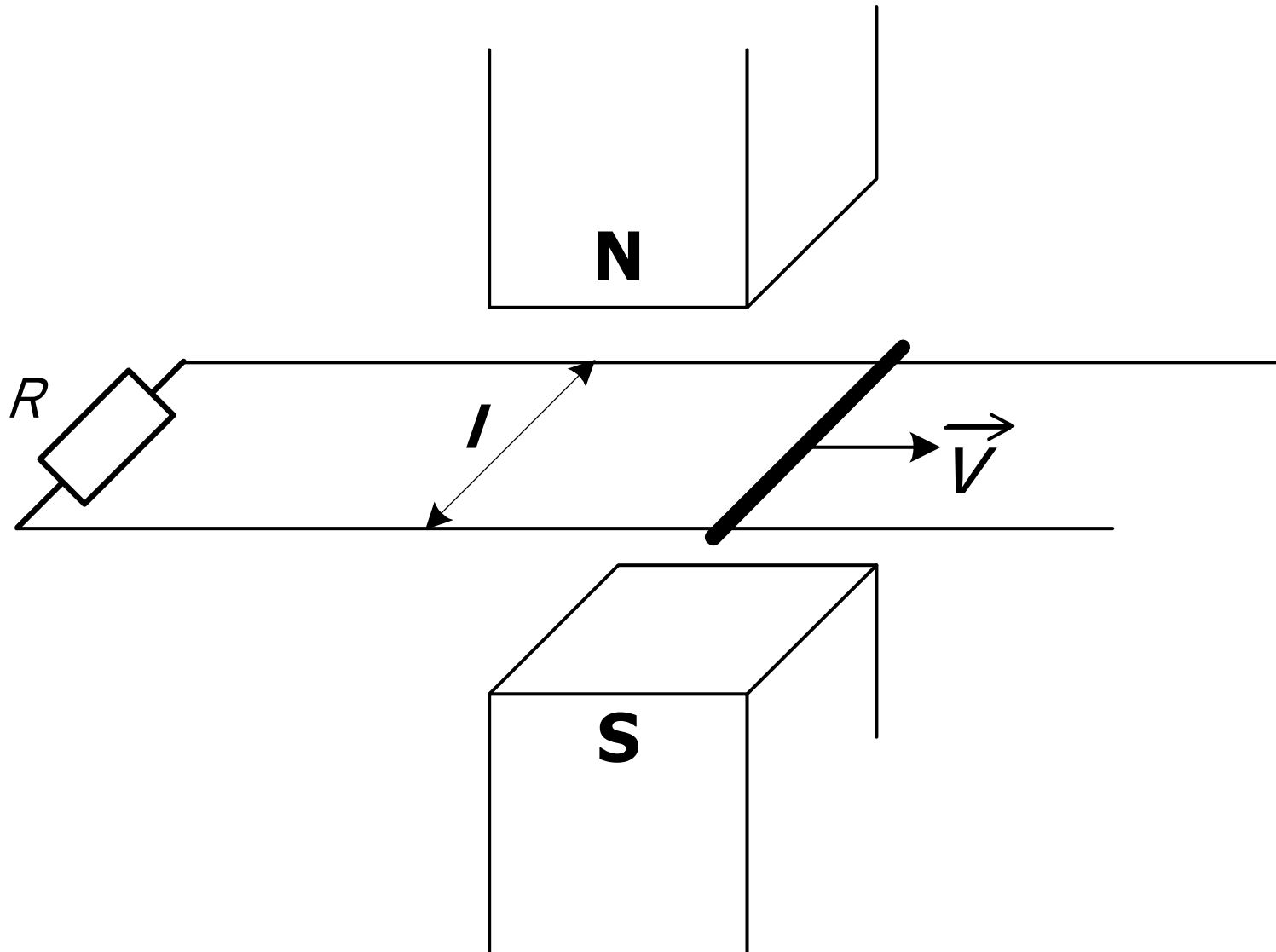
43. Ucrtati smer električne struje koja se indukuje u konturi ako se magnet kreće nagore.



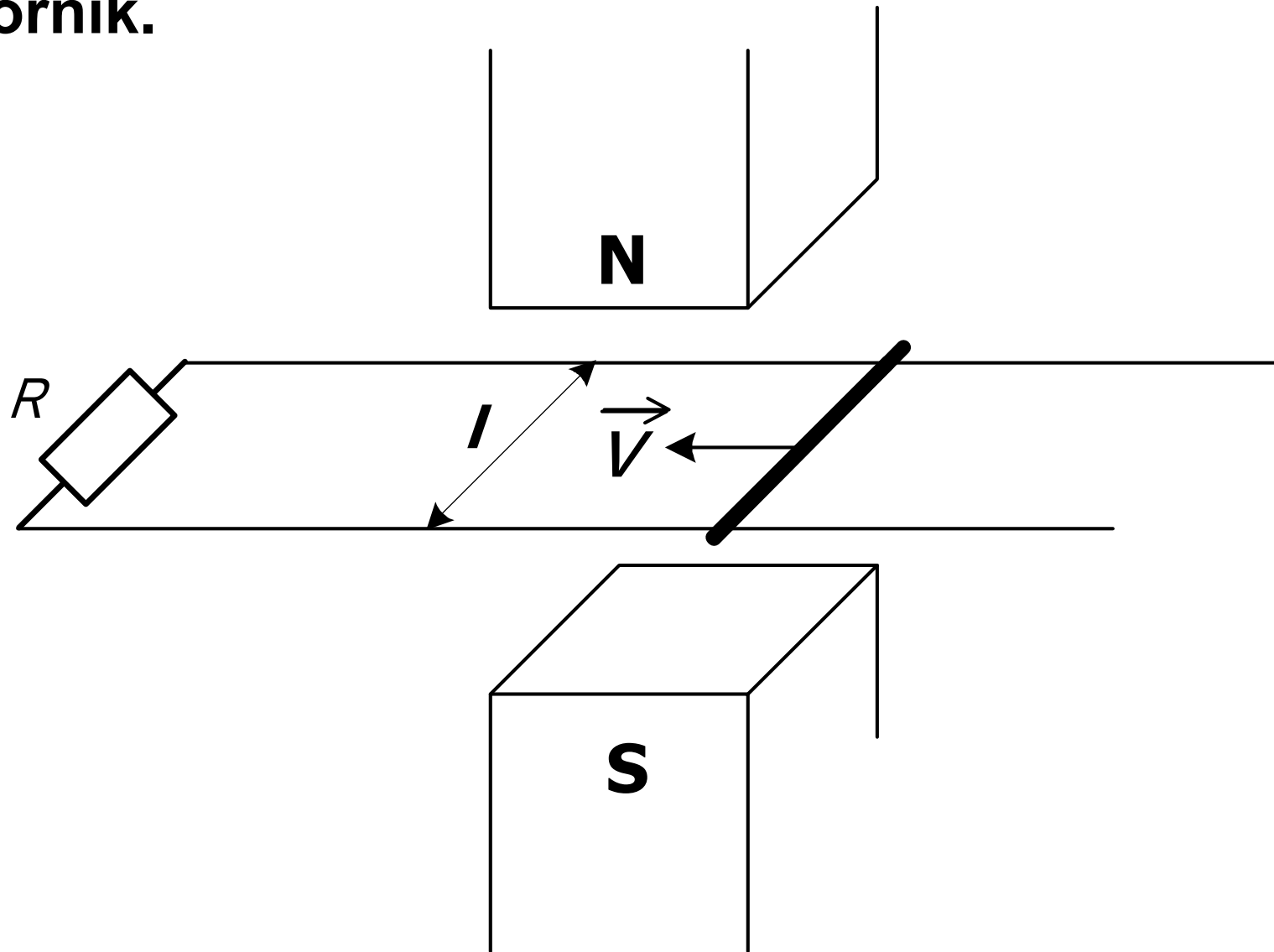
44. Ucrtati smer električne struje koja se indukuje u konturi ako se magnet kreće nadole.



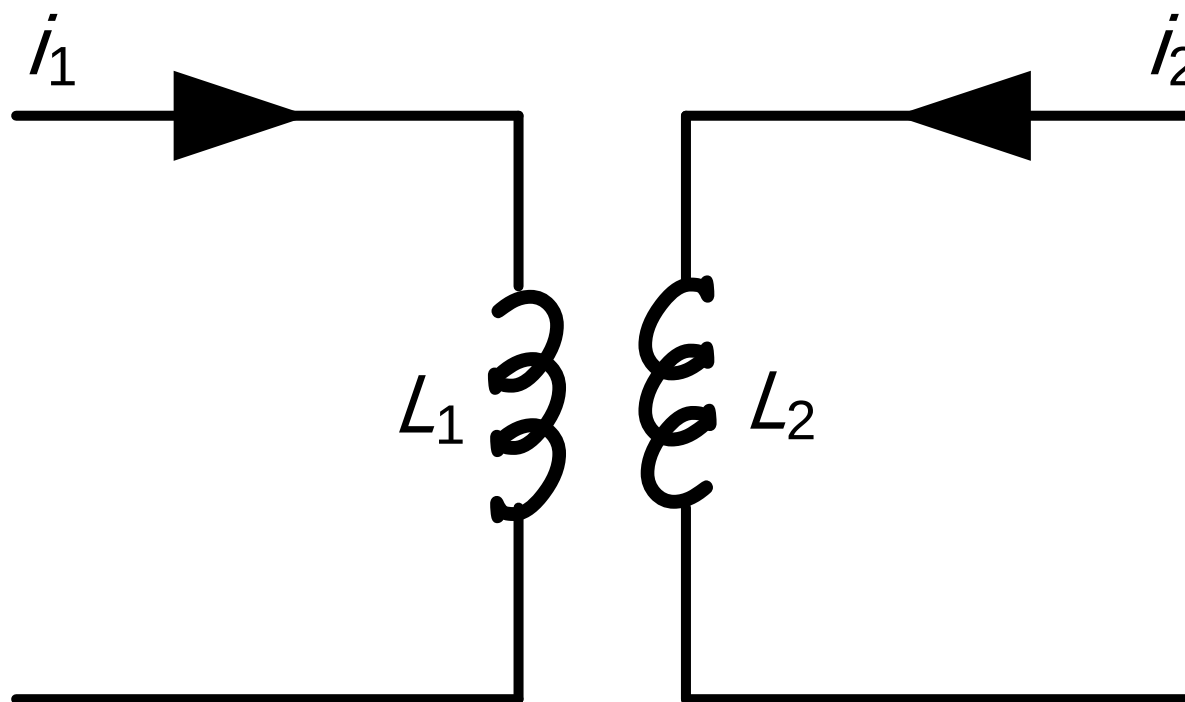
45. Ucrtati smer indukovane električne struje kroz otpornik.



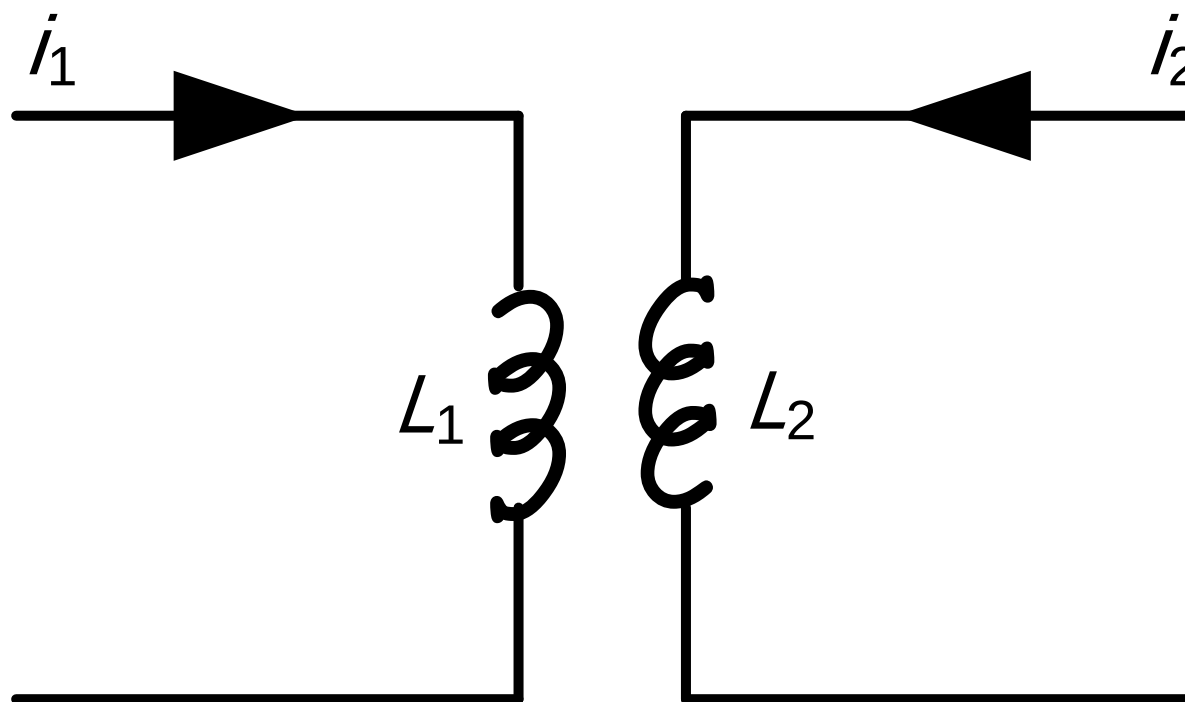
46. Ucrtati smer indukovane električne struje kroz otpornik.



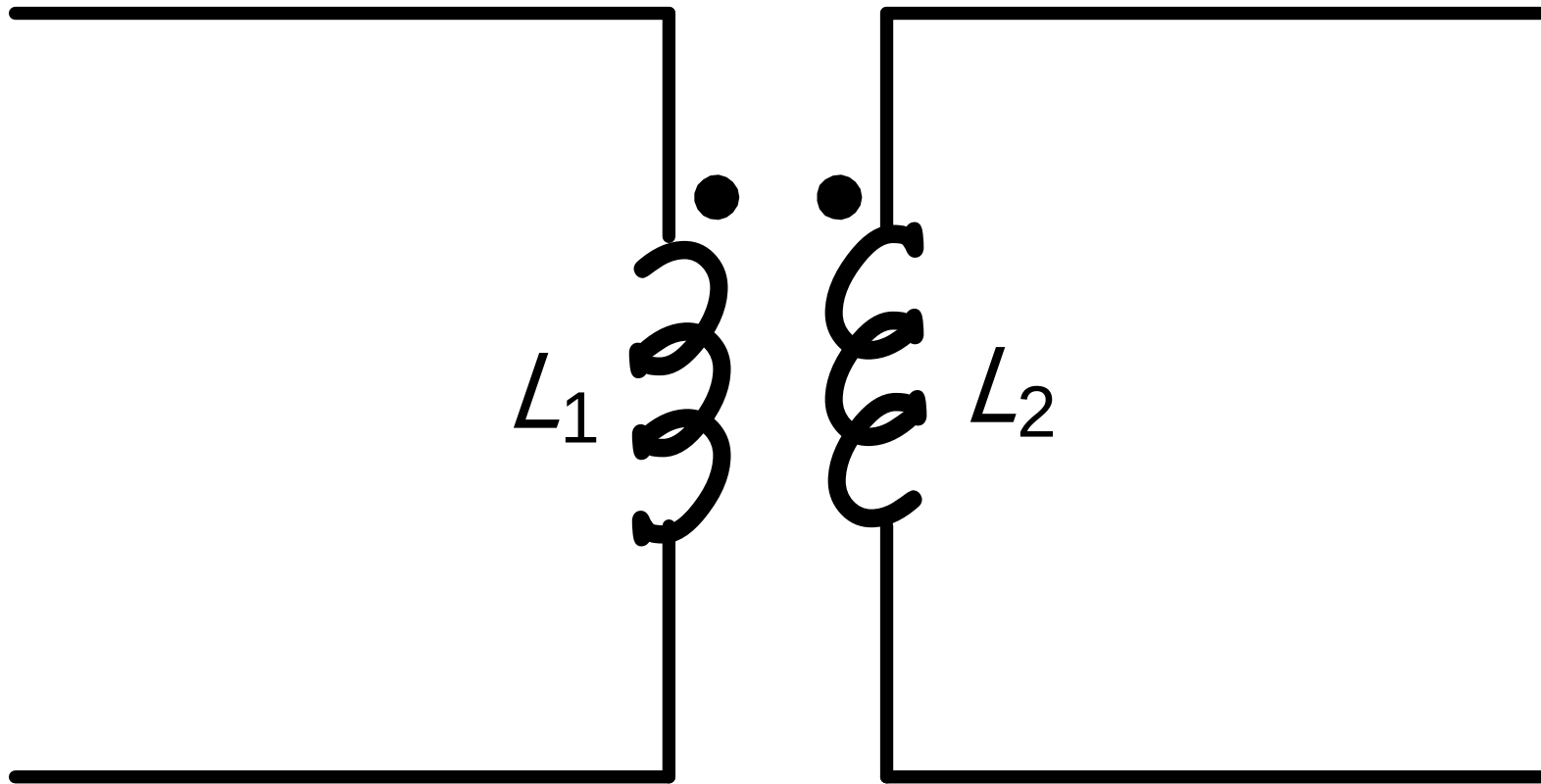
47. Ucrtati tačke na sliku tako da međusobna induktivnost bude pozitivna.



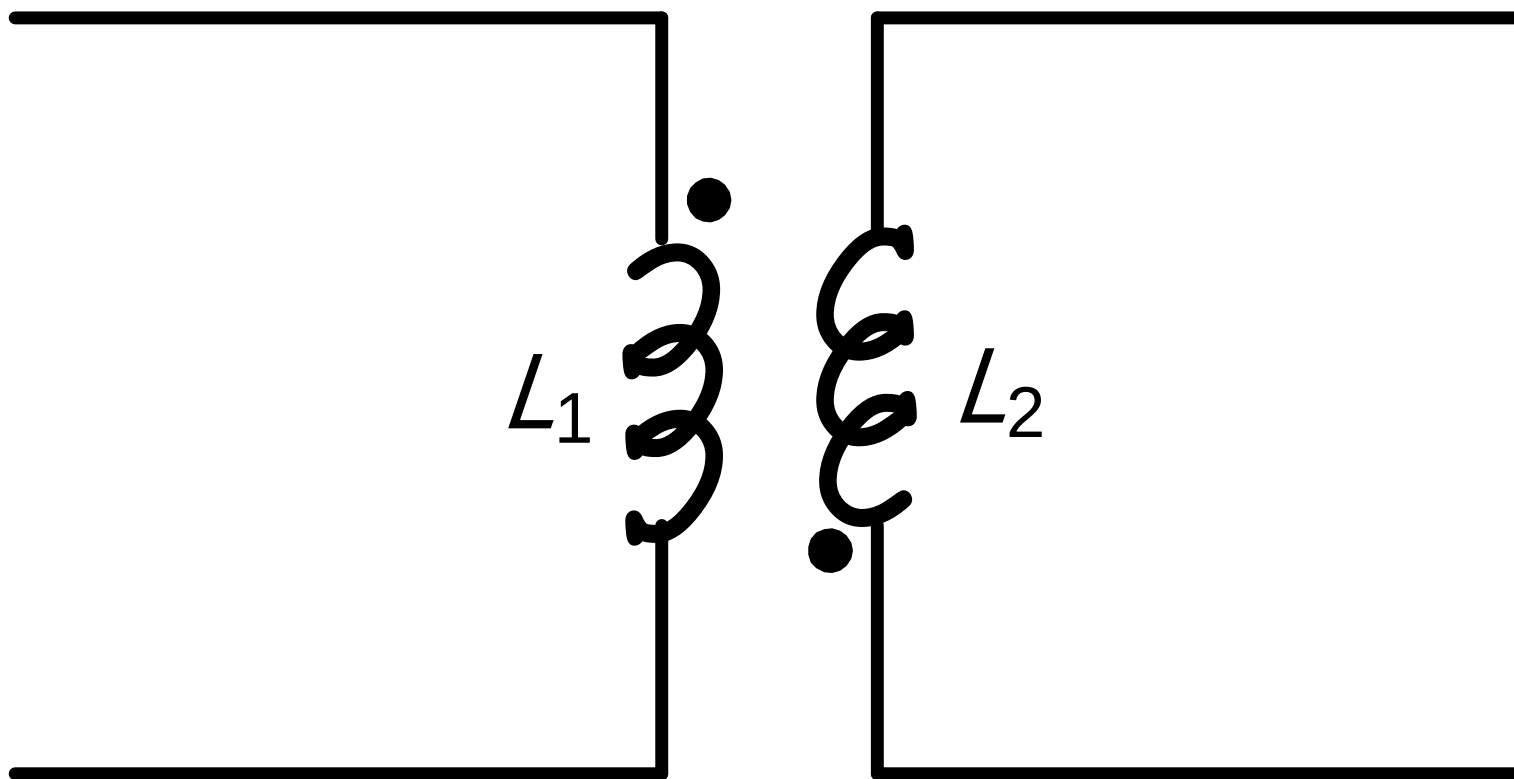
48. Ucrtati tačke na sliku tako da međusobna induktivnost bude negativna.



49. Ucrtati smerove električnih struja tako da međusobna induktivnost bude negativna.



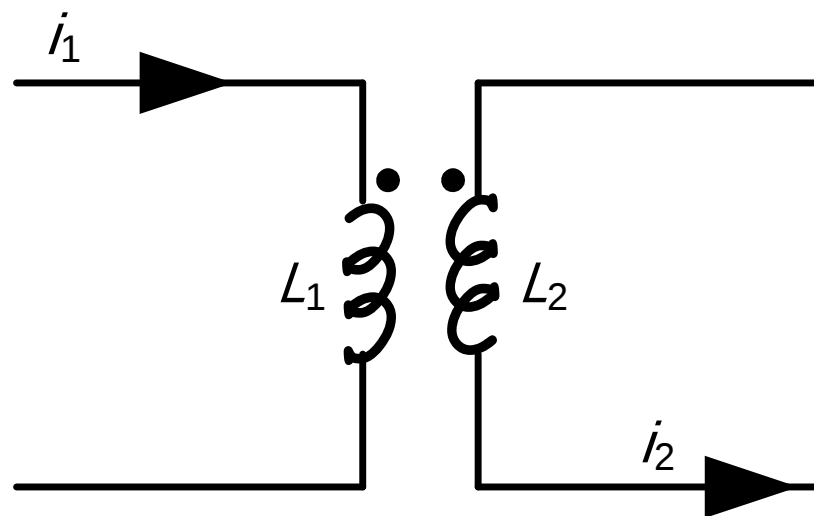
50. Ucrtati smerove električnih struja tako da međusobna induktivnost bude pozitivna.



51. Međusobna induktivnost kola sa slike je:

pozitivna

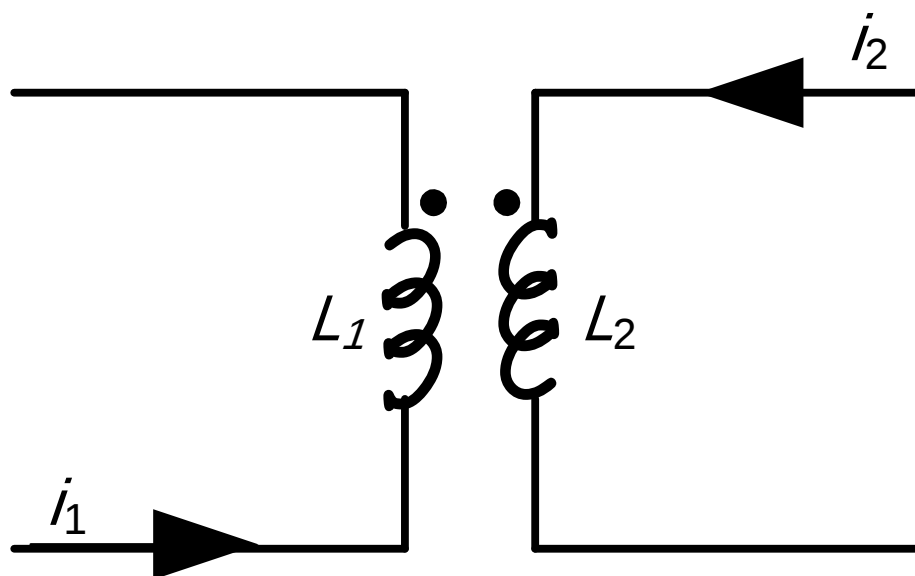
negativna



52. Međusobna induktivnost kola sa slike je:

pozitivna

negativna



53. Koji od obrazaca služi za određivanje energije kalema?

$$W_m = \frac{1}{2} L I$$

$$W_m = \Phi I$$

$$W_m = \frac{\Phi^2}{2L}$$