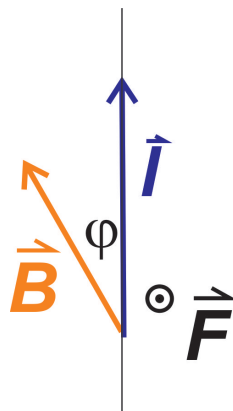


1. **naloga:** Po ravnem vodniku dolžine 6,5 m teče tok 2,3 A. Nahaja se v homogenem magnetnem polju z gostoto 0,55 mT, ki poteka pod kotom 30° glede na smer toka. Kolikšna sila deluje na vodnik? Na skici označi v kateri smeri deluje sila na vodnik.

Rešitev: Sila $\vec{F}$, ki deluje na vodnik v magnetnem polju, je $\vec{F} = I \vec{l} \times \vec{B}$. Vektor $\vec{l}$ ima smer toka in dolžino enako odseku vodnika, na katerega računamo silo.

Vektorski produkt vektorjev $\vec{l}$ in $\vec{B}$ izračunamo tako, da zmožimo $l B \sin \varphi$, kjer je φ kot med smerjo $\vec{l}$ in $\vec{B}$. Rezultat vektorskega produkta je **vektor**, ki kaže v smeri pravokotno na oba vektorja $\vec{l}$ in $\vec{B}$.

Na sliki 1 torej v zaslon ali iz njega. Med tema možnostima je pravilna tista, ki jo določimo po "pravilu desnosučnega vijaka". Prvi vektor ($\vec{l}$) zavrtimo v mislih proti drugemu $\vec{B}$. Rezultat $\vec{l} \times \vec{B}$ kaže v smer v katero bi se zavrtel desnosučni vijak. V primeru na sliki 1. zavrtimo $\vec{l}$ v nasprotni smeri urinega kazalca. Desnosučni vijak bi se premikal v smeri iz zaslona. Sila $\vec{F}$ na sliki 1. torej kaže iz zaslona. To označimo s krožcem in piko v sredini krožca.



Slika 2 Sila na vodnik po katerem teče tok

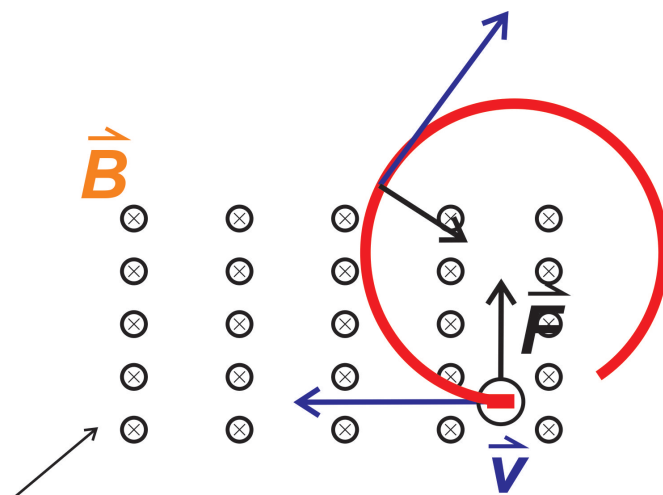
Izračunajmo še velikost te sile:

$$|\vec{F}| = I l B \sin \varphi = 2,3 \text{ A} \cdot 6,5 \text{ m} \cdot 0,55 \cdot 10^{-3} \text{ T} \cdot \sin 30^\circ = 4,1 \text{ mN}.$$

2. **naloga:** Elektron prileti s hitrostjo $4,7 \cdot 10^6 \text{ m/s}$ v homogeno magnetno polje z gostoto 0,20 T kot prikazuje skica. Naboj elektrona veš, maso pa poišči v literaturi. Kolikšna sila deluje na elektron v magnetnem polju? Na skici označi smer sile na elektron ob vstopu v polje in trajektorijo gibanja v polju. Izračunaj polmer trajektorije in frekvenco kroženja za elektron v tem polju!

Rešitev: Naboj elektrona je enak negativnemu osnovnemu naboju $e_e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As}$, masa je enaka $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ (vir: wikipedia).

Sila na elektron v magnetnem polju je enaka $\vec{F} = e \vec{v} \times \vec{B}$. Vektorski produkt je pojasnjen že pri prejšnji nalogi.



znak pomeni, da magnetno polje kaže pravokotno v oz. notri v list (zaslon)

Slika 1 Sila na elektron v magnetnem polju. Tirnica (= trajektorija; oz. njen del, sicer je cela krožnica) je narisana z rdečo barvo.

Vektorski produkt $\vec{v} \times \vec{B}$ kaže navzdol. Ker pa ga pomnožimo še z negativnim nabojem elektrona, kaže sila na elektron navzgor. Ker sta smer hitrosti $\vec{v}$ in magnetnega polja $\vec{B}$ pravokotni med sabo ($\varphi = 0$), je velikost vektorskega produkta enaka

$$|F| = F = |e_e v B| = |-1,6 \cdot 10^{-19} \text{ A s} \cdot 4,7 \cdot 10^6 \text{ m/s} \cdot 0,20 \text{ T}| = 1,5 \cdot 10^{-13} \text{ N}.$$

Zaradi sile v smeri, ki je pravokotna na trenutno smer hitrosti, se elektron začne gibati navzgor na sliki. Spremeni se mu smer trenutne hitrosti. Sila bo znova pravokotna na smer nove hitrosti, smer gibanja se še bolj zasuka elektron se zavrti. Tirnica elektrona bo krožnica, saj je sila ves čas pravokotna na smer trenutne hitrosti.

Radij in frekvenco kroženja bomo določili z znanjem o kroženju. Magnetna sila je v tem primeru tista sila, ki telo (elektron) vleče proti središču kroženja (to je torej centripetalna sila). Newtonov zakon pravi:

$$F = m a = m \frac{v^2}{R}.$$

Poznamo maso elektrona, hitrost (ta se zaradi magnetne sile ne spreminja. Magnetna sila le spreminja smer hitrosti, ne pa njene velikosti!), silo F , zato lahko iz zadnje enačbe izračunamo polmer trajektorije

$$R = \frac{m_e v^2}{F} = \frac{9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \cdot (4,7 \cdot 10^6 \text{ m/s})^2}{1,5 \cdot 10^{-13} \text{ N}} = 0,134 \text{ mm}.$$

Frekvenca kroženja ν je enaka $1/t_0$, kjer je t_0 čas potreben za en obrat:

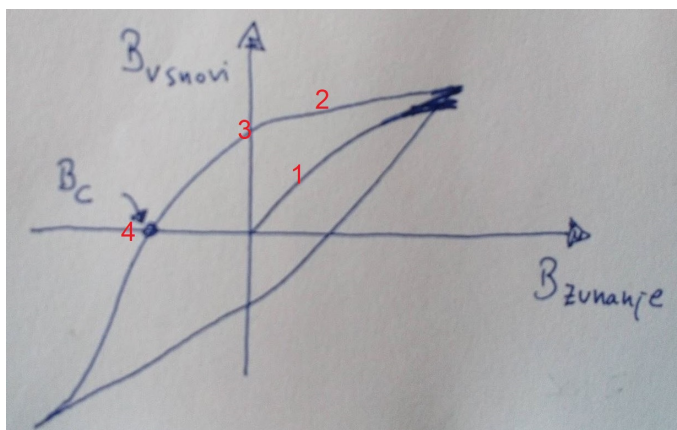
$$t_0 = \frac{2 \pi R}{v},$$

torej

$$\nu = \frac{1}{t_0} = \frac{v}{2 \pi R} = \frac{4,7 \cdot 10^6 \text{ m/s}}{2 \cdot \pi \cdot 0,134 \cdot 10^{-3} \text{ m}} = 5,6 \cdot 10^9 \text{ s}^{-1}.$$

3. **naloga:** Skiciraj histerezo krivuljo in pojasni kaj predstavljajo posamezni odseki. Na grafu označi gostoto magnetnega polja, ki je potrebna, da se feromagnetna snov razmagnetni.

Rešitev:



Slika 3 Histerezna krivulja

Zunanje magnetno polje $B_{zunanje}$ ustvarimo

- a) z nekim drugim trajnim magnetom blizu snovi, ki jo želimo namagnetiti, ali tako,
- b) da snov postavimo v tuljavo po kateri poženemo električni tok. V zadnjem primeru je potem zunanje magnetno polje kar polje, ki nastane v notranjosti tuljave zaradi toka skozi tuljavo.

Z B_{vsnovi} smo označili magnetno polje v snovi.

Deli histrezne zanke: Od izhodišča po poti 1 gre *magnetilna krivulja*. V tem delu snov namagnetimo.

Ko potem po poti 2 zmanjšujemo zunanje magnetno polje, v snovi (če je ta feromagnetna) ostane remanentno magnetno polje (točka 3). Po domače pravimo, da smo dobili *magnet*. Okoli magneta je magnetno polje različno od nič, tudi če zraven ni drugega vira magnetnega polja.

Med točkama 3 in 4 je zunanje magnetno polje nasprotno magnetnemu polju v snovi in snov počasi razmagnetujemo. V točki 4 (B_c , to je *koercitivno* magnetno polje) snov popolnoma razmagnetimo. To je tista točka, ki jo naj označimo, da je snov razmagnetena.

Tukaj: <https://www.fmf.uni-lj.si/%7Ejazbinsek/Eksperimenti.iz.moderne.fizike/fermag.pdf> so lepo pojasnjeni deli magnetilne krivulje. Le *jakost magnetnega polja* H zamenjajte z gostoto zunanjega magnetnega polja $B_{zunanje}$.

4. **naloga:** Naprava deluje s povprečno močjo $\bar{P} = 4,2 \text{ kW}$, ko je priključena na izmenično napetost z amplitudo $U_0 = 300 \text{ V}$. Kolikšen efektivni tok I_{ef} priteče skozi napravo?

Rešitev: Povprečna moč je $\bar{P} = U_{ef} I_{ef}$.

Zveza med amplitudo naptosti U_0 in efektivno napetostjo U_{ef} je pri sinusni izmenični napetosti enaka $U_{ef} = U_0/\sqrt{2}$.

Tukaj: https://si.openprof.com/wb/izmeni%C4%8Dna_napetost?ch=244 je lepo pojasnjeno kaj je efektivna napetost.

Pri tej nalogi lahko izračunamo

$$U_{ef} = \frac{300 \text{ V}}{\sqrt{2}} = 212 \text{ V}$$

in potem

$$I_{ef} = \frac{\bar{P}}{U_{ef}} = \frac{4200 \text{ W}}{212 \text{ V}} \approx 20 \text{ A}.$$

5. **naloga:** Primarna tuljava transformatorja ima $N_1 = 5000$ obojev, sekundarna pa $N_2 = 800$. Primarna tuljava transformatorja je priključena na enosmerno napetost 60 kV. Kolikšna je napetost na sekundarni tuljavi? Kolikšna pa, če je napetost na primarni tuljavi izmenična z amplitudo $U_1 = 60$ kV?

Rešitev: Če primarno tuljavo priključimo na **enosmerno napetost** se na sekundarni tuljavi ne bo spreminjal magnetni pretok in posledično se ne bo inducirala napetost. Transformator ne dela pri enosmerni napetosti! Odgovor na prvo vprašanje je torej 0.

Ko na primarno tuljavo priključimo izmenično napetost, bo na sekundarni tuljavi napetost večja ali manjša v enakem razmerju kakor je razmerje števila obojev:

$$U_2 = \frac{N_2}{N_1} U_1 = \frac{800}{5000} \cdot 60 \text{ kV} = 9,6 \text{ kV}.$$

6. **naloga:** Električni nihajni krog tvorita tuljava z 20 oboji na centimeter, dolžine $L = 5,0$ cm in polmerom $r = 1,0$ cm ter kondenzator s površino plošče $S = 0,56 \text{ cm}^2$ in razmikom med ploščama $d = 1$ mm. Kolikšna sta lastna nihajni čas t_0 in frekvenca tega nihajnega kroga ν ? Kolikšen je največji tok I_0 , ki teče čez tuljavo, če smo na začetku kondenzator napolnili z napetostjo $U_0 = 15$ V?

Rešitev: Nihajni čas električnega nihajnega kroga izračunamo kakor

$$t_0 = 2\pi\sqrt{LC},$$

kjer je $L = \frac{\mu_0 N^2 S}{L}$ induktivnost tuljave in $C = \frac{\epsilon_0 S}{d}$ kapaciteta kondenzatorja.

Izračunajmo najprej L in C !

Tuljava ima $N = 20$ obojev/cm $\cdot 5$ cm = 100 obojev, torej

$$L = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} (\text{Vs/A m}) \cdot 100^2 \cdot \pi \cdot (10^{-2} \text{ m})^2}{5 \cdot 10^{-2} \text{ m}} = 7,9 \cdot 10^{-5} \frac{\text{Vs}}{\text{A}}.$$

Kapaciteta kondenzatorja je

$$C = \frac{8,9 \cdot 10^{-12} (\text{As/V m}) \cdot 0,56 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2}{10^{-3} \text{ m}} = 5,0 \cdot 10^{-13} \frac{\text{As}}{\text{V}}.$$

Nihajni čas

$$t_0 = 2 \cdot \pi \sqrt{7,9 \cdot 10^{-5} \frac{\text{Vs}}{\text{A}} \cdot 5,0 \cdot 10^{-13} \frac{\text{As}}{\text{V}}} = 3,9 \cdot 10^{-8} \text{ s}.$$

in frekvenca

$$\nu = \frac{1}{3,9 \cdot 10^{-8} \text{ s}} = 25 \text{ MHz}.$$

Največji tok skozi tuljavo izračunamo tako, da upoštevamo, da sta maksimalna električna energija $C U_0^2/2$ in maksimalna magnetna energija $L I_0^2/2$ enaki:

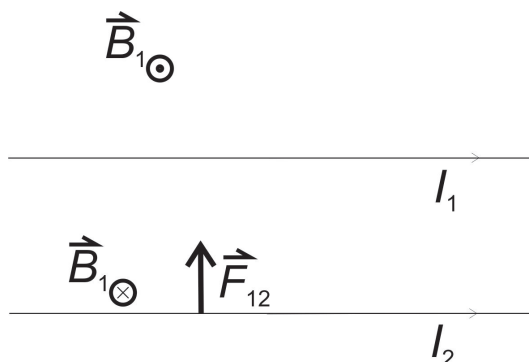
$$I_0 = \sqrt{\frac{C}{L}} U_0 = \sqrt{\frac{5,0 \cdot 10^{-13} \frac{\text{As}}{\text{V}}}{7,9 \cdot 10^{-5} \frac{\text{Vs}}{\text{A}}}} \cdot 15 \text{ V} = 1,2 \text{ mA}.$$

7. **naloga:** Po dveh vzporednih vodnikih teče električni tok. Po prvem $I_1 = 1,2$ A in po drugem $I_2 = 0,45$ A. Med seboj sta oddaljena za $r = 10$ cm. Kolikšna sila na meter dolžine deluje med njima? Kako sta usmerjena tokova, če je sila privlačna? Kolikšna je skupna gostota magnetnega polja na sredi med vodnikoma? Skiciraj smer. Kolikšna je 7,5 cm nad drugim vodnikom in v kateri smeri (označi na skici)? Kje je skupno polje enako 0 T?

Rešitev: Naj vodnika ležita vodoravno v ravnini lista/zaslona, kakor je narisano na spodnji skici. Magnetno polje okoli dolgega vodnika kaže v tangentialni smeri in pojema z razdaljo kakor $11/r$:

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

Smer določimo z desno roko: palec usmerimo vzdolž vodnika v smeri toka, ostali štirje prsti pokažejo kam kaže magnetno polje. Na spodnji sliki kaže magnetno polje pod vodnikom 11. (po tem teče tok I_1) v ravnino lista/zaslona, nad njim pa iz lista/zaslona.



Slika 4 Sila med vodnikoma

Magnetno polje, ki ga povzroča vodnik 1 na mestu vodnika 2, je:

$$B_1 = \frac{\mu_0 I}{2 \pi r} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \cdot 1,2 \text{ A}}{2 \cdot \pi \cdot 0,1 \text{ m}} = 2,4 \cdot 10^{-6} \text{ T}.$$

Vodnik 2, po katerem teče tok I_2 je v magnetnem polju B_1 . Smer toka je pravokotna na smer magnetnega polja, zato na $l_2 = 1 \text{ m}$ dolg odsek vodnika 2 deluje maksimalna sila ($\varphi = 90^\circ$, glej prvo nalogo):

$$F_{12} = I_2 l_2 B_1 = 0,45 \text{ A} \cdot 1 \text{ m} \cdot 2,4 \cdot 10^{-6} \text{ T} = 1,08 \cdot 10^{-6} \text{ N}.$$

Sila na meter dolžine je $1,08 \cdot 10^{-6} \text{ N}$. Z enako veliko silo tudi vodnik 2 privlači vodnik 1.

Kako sta usmerjena tokova, če je sila privlačna?

Vidimo, da smo dobili privlačno silo, ko smo (po sreči) tokova usmerili v isto smer. Za vajo je koristno premisliti o smereh magnetnega polja in potem še sile (vektorski produkt, naloga 1) ko tokova tečeta v nasprotnih smereh. Dobimo odbojno silo med vodnikoma.

Kolikšna je skupna gostota magnetnega polja na sredi med vodnikoma? Skiciraj smer.

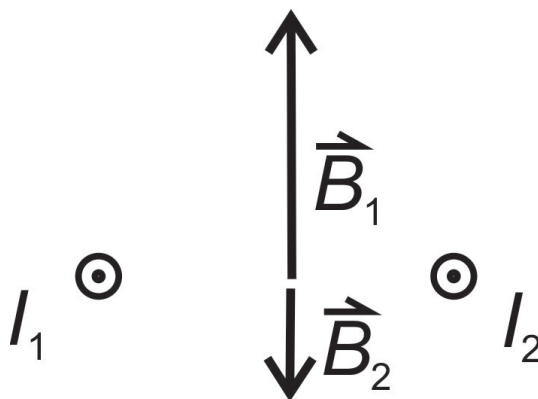
Med vodnikom magnetno polje $\vec{B}_1$, ki ga povzroča vodnik 1, kaže v smeri v list (slika 4). Magnetno polje $\vec{B}_2$, ki ga povzroča vodnik 2 pa iz lista. Celotno magnetno polje je vsota - v tem primeru - nasprotno usmerjenih vektorjev. Zato moramo velikosti B_1 in B_2 odšteti.

Izračunajmo!

$$B_1 = \frac{\mu_0 I}{2 \pi (r/2)} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \cdot 1,2 \text{ A}}{2 \cdot \pi \cdot 0,05 \text{ m}} = 4,8 \cdot 10^{-6} \text{ T}.$$

$$B_2 = \frac{\mu_0 I}{2 \pi (r/2)} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \cdot 0,45 \text{ A}}{2 \cdot \pi \cdot 0,05 \text{ m}} = 1,8 \cdot 10^{-6} \text{ T}.$$

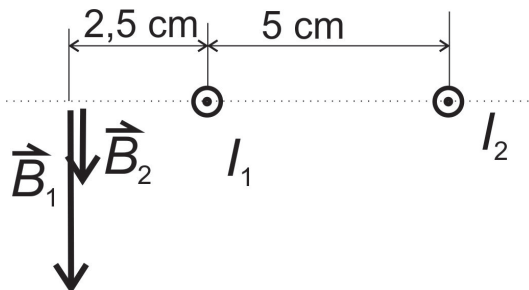
Skupna gostota magnetnega polja na sredi med vodnikoma je $B_1 - B_2 = 3,0 \cdot 10^{-6} \text{ T}$. Na sliki 5 je narisana tudi smer. Slika je obrnjena za 90° glede na sliko 4. Tokova zdaj tečeta navpično navzgor.



Slika 5 Magnetno polje med vodnikoma. Tokova tečeta navpično navzgor (iz lista).

Kolikšna je 7,5 cm nad drugim vodnikom in v kateri smeri (označi na skici)?

Glede na to, da nimamo slike vodnikov kakor si jih je zamislil avtor naloge, se držimo narisane na sliki 4. 7,5 cm NAD drugim vodnikom pomeni, da je to 2,5 cm nad prvim vodnikom. Na tem mestu vodnika povzročata magnetno polje v isti smeri - glej sliko 6, ki je znova za 90° zavrtena glede na sliko 4.



Slika 6 Magnetno polje 7,5 cm nad drugim vodnikom

Polje, ki ga na tem mestu povzroča vodnik 1, je

$$B_1 = \frac{\mu_0 I}{2\pi (r/2)} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \cdot 1,2 \text{ A}}{2 \cdot \pi \cdot 0,025 \text{ m}} = 9,6 \cdot 10^{-6} \text{ T}.$$

$$B_2 = \frac{\mu_0 I}{2\pi (r/2)} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \cdot 0,45 \text{ A}}{2 \cdot \pi \cdot 0,075 \text{ m}} = 1,2 \cdot 10^{-6} \text{ T}.$$

Skupaj: $B_1 + B_2 = 10,8 \cdot 10^{-6} \text{ T}$.

Kje je skupno polje enako 0 T?

Magnetni polji B_1 in B_2 kažeta v nasprotnih smereh le med vodnikoma. Očitno bo točka (pravzaprav premica vzporedna vodnikoma), kjer sta B_1 in B_2 po velikosti enaki nekoliko bližje vodniku 2, saj po njemu teče manjši tok.

Označimo razdaljo točke od vodnika 1, kjer je na zveznici med vodnikoma skupno magnetno polje enako 0, z x . Potem je razdalja od vodnika 2 enaka $r - x$, kjer je r razdalja med vodnikoma. Pričakujemo x manjši od 5 cm in večji od 2,5 cm, saj mora biti točka bližje vodniku 2. Upoštevajmo:

$$B_1 = B_2,$$

$$\frac{\mu_0 I_1}{2 \pi x} = \frac{\mu_0 I_2}{2 \pi (r - x)}.$$

Sledi

$$\frac{x}{I_1} = \frac{r - x}{I_2}$$

in

$$x = \frac{\frac{I_1}{I_2}}{1 + \frac{I_1}{I_2}} r = \frac{\frac{1,2 \text{ A}}{0,45 \text{ A}}}{1 + \frac{1,2 \text{ A}}{0,45 \text{ A}}} \cdot 5 \text{ cm} = 3,64 \text{ cm}.$$