

DELO MAGNETNIH SIL

Vsebina poglavja: izračun dela magnetnih sil iz spremembe fluksa skozi tokovodnik.

Spoznali smo že enačbo za izračun sile na vodnik v magnetnem polju

$$\vec{F} = \int_L I d\vec{l} \times \vec{B} \quad (5.1)$$

Sedaj nas zanima, kolikšno delo opravimo pri premiku vodnika s tokom I v magnetnem polju \mathbf{B} iz začetne lege, ki jo bomo označili s T_1 , v končno lego T_2 . To dobimo z integracijo sile po poti S

$$A = \int_S \vec{F} \cdot d\vec{s} \quad (5.2)$$

kjer smo z ds označili diferencial poti v smeri premika in z S celotno pot. Z vstavitvijo enačbe (5.1)

v (5.2) dobimo $A = \int_S I (d\vec{l} \times \vec{B}) \cdot d\vec{s} = I \int_{T_1}^{T_2} (d\vec{s} \times d\vec{l}) \cdot \vec{B}$. Sedaj moramo pogledati, kaj predstavlja

produkt $d\vec{s} \times d\vec{l}$ oziroma celotna integracija tega produkta na poti od začetne do končne lege zanke. Vrednost vektorskega produkta je površina, ki jo določata vektorja glede na definicijo vektorskega produkta, smer pa je pravokotna na to površino (v smeri normale). Če to površino skalarno pomnožimo z vektorjem gostote pretoka dobimo diferencial fluksa $(d\vec{s} \times d\vec{l}) \cdot \vec{B} = d\vec{A} \cdot \vec{B} = \vec{B} \cdot d\vec{A} = d\Phi$ in v skladu s to ugotovitvijo lahko delo zapišemo v obliki

$$A = I \int_{\text{Začetna lega}}^{\text{Končna lega}} d\Phi.$$

Rezultat integracije je celoten fluks, ki gre skozi »plašč«, ki ga opiše vodnik na poti. $A = I\Phi_{\text{plašča}}$.

Ker pa je, kot smo že spoznali, magnetno polje brezizvorno ($\oint_A \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$), mora biti celoten fluks

skozi navidezno telo, ki ga opiše premikajoči vodnik, enak nič. To pa tudi pomeni, da mora biti fluks skozi plašč enak razliki fluksa skozi površino, ki jo opisuje vodnik v končnem položaju in fluksu začetnem v položaju. Če želimo pri tem fluks skozi zanko, ki jo opisuje vodnik računati v isti smeri tako na začetku kot na koncu, velja $\Phi_{\text{plašča}} = \Phi_{\text{končni}} - \Phi_{\text{začetni}}$. Smer teh fluksov računamo v t.i. pozitivni smeri, ki jo določa tok v gibajoči zanki (smer polja v zanki, ki jo povzroča tok I).

$$A = I (\Phi_{\text{končni}} - \Phi_{\text{začetni}}) \quad (5.3)$$

SLIKA: Primer premikanja tokovne zanke iz lege T_1 v lego T_2 v polju B.

Kdaj bo rezultat (delo magnetnih sil) pozitiven? Tedaj, ko bo fluks skozi zanko v končni legi večji kot v začetni. Če ima torej tokovna zanka možnost prostega gibanja, se bo zanka postavila tako, da bo fluks skozi zanko največji. (Enako ugotovitev bomo postavili tudi v naslednjem poglavju, ko se bomo srečali z navorom na tokovno zanko.) Če je rezultat pozitiven, pomeni, da so delo opravile magnetne sile magnetnega polja, če pa je negativen pa to, da je delo za premik zanke v magnetnem polju moral vložiti nek zunanji vir (recimo kar mi sami): $A_{\text{mag}} + A_{\text{zun}} = 0$.

Primer: Vzporedno z ravnim vodnikom s tokom $I_1 = 10$ A, na oddaljenosti $d = 2$ cm leži pravokotna zanka dolžine $a = 5$ cm in širine $b = 3$ cm s tokom $I_2 = 0,2$ A. Koliko dela opravi magnetno polje za translatorski premik zanke stran od vodnika za razdaljo $d = 2$ cm? Primer reši tako z integracijo magnetnih sil kot z razliko fluksov. (SLIKA)

Izračun: Sila deluje na dva vodnika zanke, ki sta vzporedna z vodnikom. Delo magnetnih sil potrebno za premik bo torej:

$$A = A' + A'' = \int_d^{d+2 \text{ cm}} \vec{F}' \cdot d\vec{l} + \int_{d+a}^{d+a+2 \text{ cm}} \vec{F}'' \cdot d\vec{l}$$

$$d\vec{l} = \vec{e}_x dx$$

$$\vec{F}' = I_2 b \frac{\mu_0 I_1}{2\pi x} (-\vec{e}_x)$$

$$\vec{F}'' = \vec{e}_x I_2 b \frac{\mu_0 I_1}{2\pi x}$$

$$A' = -I_2 b \frac{\mu_0 I_1}{2\pi} \ln \frac{d+2 \text{ cm}}{d}$$

$$A'' = I_2 b \frac{\mu_0 I_1}{2\pi} \ln \frac{d+a+2 \text{ cm}}{d+a}$$

$$A = \frac{\mu_0 I_1 I_2 b}{2\pi} \ln \left(\frac{d}{d+2 \text{ cm}} \frac{d+a+2 \text{ cm}}{d+a} \right) \cong \underline{\underline{-5,3 \text{ nJ}}}$$

Drugi način:

$$A = I_2 (\Phi_{\text{končni}} - \Phi_{\text{začetni}})$$

$$\Phi_{\text{končni}} = \int_A \vec{B} d\vec{A} = \int_{d+a}^{d+a+2\text{ cm}} \frac{\mu_0 I_1 b}{2\pi x} dx = \frac{\mu_0 I_1 b}{2\pi} \ln \frac{d+a+2\text{ cm}}{d+a}$$

$$\Phi_{\text{začetni}} = \int_A \vec{B} d\vec{A} = \int_d^{d+2\text{ cm}} \frac{\mu_0 I_1 b}{2\pi x} dx = \frac{\mu_0 I_1 b}{2\pi} \ln \frac{d+2\text{ cm}}{d}$$

$$A = I_2 \frac{\mu_0 I_1 b}{2\pi} \ln \left(\frac{d}{d+2\text{ cm}} \frac{d+a+2\text{ cm}}{d+a} \right) \cong \underline{\underline{-5,3\text{ nJ}}}$$

Vprašanje: Zakaj je končni rezultat negativen? **Odgovor:** Če računamo delo z integracijo sile po poti vidimo, da je sila na bližjo stranico zanke usmerjena v smeri vodnika (privlačna), sila na daljno pa je odbojna. Torej mora delo opraviti zunanji vir.

Primer: Koliko dela opravi magnetno polje, da se zanka iz primera 1 zavrti okoli sredinske osi za kot 90° ? (SLIKA)

Izračun: Delo najlažje izračunamo iz spremembe fluksa skozi zanko. Pred vrtenjem je bil fluks

skozi zanko maksimalen, enak $\Phi_{\text{začetni}} = \int_A \vec{B} d\vec{A} = \int_d^{d+2\text{ cm}} \frac{\mu_0 I_1 b}{2\pi x} dx = \frac{\mu_0 I_1 b}{2\pi} \ln \frac{d+2\text{ cm}}{d}$, po vrtenju pa je

fluks skozi zanko enak nič (enako veliko fluksa, kot v zanko vstopa, tudi iz zanke izstopa). Zato je

delo enako $A = I_2 (0 - \Phi_{\text{začetni}}) = -I_2 \frac{\mu_0 I_1 b}{2\pi} \ln \frac{d+2\text{ cm}}{d} = \underline{\underline{-8,3\text{ nJ}}}$.

Vprašanja:

1. Zakaj je rezultat negativen? Ker mora zunanji vir opraviti delo. Zanko moramo zavrteti v nasprotni smeri, kot bi se zavrtela pod vplivom magnetne sile.
2. Zakaj je fluks skozi zanko enak nič, ko je zanka postavljena prečno na osnovno lego? Ker gre skozi en del zanke fluks skozi zanko v pozitivni smeri, skozi drugi (enako velik) del pa enako velik fluks v negativni smeri.
3. Kateri je stabilen položaj zanke? Zanka se želi postaviti tako, da je fluks skozi zanko največji. Torej tedaj, ko leži ravni vodnik v ravnini zanke. Ta lega je stabilna, če so sile usmerjene stran od zanke in labilna, le so sile na vodnika v smeri osi zanke.
4. Kolikšen bi bil rezultat, če bi zanko zavrteli za 180° ? Fluks skozi zanko je v končni legi enako velik kot v začetni legi, le nasprotnega predznaka je. Torej bo rezultat $A = 2I_2 \Phi_{T_2}$. Kaj pa, če zanko zavrtimo tako, da zopet pride v začetno lego (obrat za

360^0)? Takrat je fluks skozi zanko enako velik, kot na začetku, vendar če je v prvi polovici zasuka (za 180^0) delo negativno, bo v drugem delu zasuka delo pozitivno (delo opravi magnetno polje), skupno delo pa bo enako nič. (V prejšnji veziji napaka). Lahko pa s pomočjo preklopa smeri toka v zanki ob polovici obrata zagotovimo pogoje (komutator), v katerih bo sila na zanko vedno v smeri rotacije, kar je osnovni princip delovanja raznovrstnih motorjev.

POVZETEK:

- 1) Delo magnetnih sil lahko izračunamo iz osnovne zveze $A = \int_{T_1}^{T_2} \vec{F}_m \cdot d\vec{l}$, ali pa kar iz razlike fluksov skozi zanko v končni in začetni legi $A = I(\Phi_{\text{končni}} - \Phi_{\text{začetna}})$. Fluks je potrebno računati v pozitivni smeri (kot bi kazal \vec{B} v notranjost premikajoče zanke, ki ga povzroča tok v zanki). Negativen rezultat pomeni, da je delo za premik morala opraviti zunanja sila, pozitiven pa, da je delo opravilo magnetno polje – da se je zanka gibala v smeri rezultirajočih magnetnih sil na zanko.
- 2) Naredili smo primer iz translatorskega premika in pokazali, da dobimo enak rezultat z integracijo magnetne sile po poti in iz produkta toka zanke in razlike fluksov skozi zanko v začetni in končni legi zanke. V primeru vrtenja zanke je lažje računati le z razliko fluksov, pri čemer je potrebno upoštevati število rotacij.
- 3) S pomočjo komutacije toka v zanki omogočimo vrtenje zanke v magnetnem polju.

Naloge:

izpit, 24. junij 2003

izpit, 31. avgust, 2004

izpit, 20. september 2004