

ELEKTROMAGNETNO POLJE

Faradejev zakon elektromagnetne indukcije

Već početkom devetnaestog veka je bilo poznato da električna struja oko sebe stvara magnetno polje. Tako je engleski fizičar Majkl Faradej došao na ideju da uradi upravo obrnuto – da pomoću magnetnog polja stvori (indukuje) električnu struju. Posle deset godina bezuspešnog eksperimenatisanja, Faradej 1831. godine otkriva čak tri različita načina za indukciju struje.

Praktičan značaj njegovog otkrića je u tome što nam je ono omogućilo da na jeftin način proizvodimo velike količine električne energije – pomoću generatora, čiji se rad zasniva, na kasnije prikazanom, III Faradejevom eksperimentu. To otkriće je na bitan način odredilo dalji razvoj i današnji izgled naše civilizacije.

Teorijski značaj Faradejevog otkrića je u tome što je, sredinom XIX veka, Maksvel otkrio novi vid fizičkog polja – elektromagnetno polje, pri pokušaju da objasni dešavanja u I Faradejevom eksperimentu.

Uspešno okončavši svoje eksperimente, Faradej je došao do sledećeg zakona:

$$\varepsilon_i = - \frac{\Delta \Phi_m}{\Delta t}.$$

Način čitanja ovog obrasca je sledeći:

U datom strujnom kolu doći će do indukcije elektromotorne sile tj. struje, ako dođe do promene magnetnog fluksa kroz površinu koju to strujno kolo oivičava.

Dati obrazac i prethodna formulacija predstavljaju Faradejev zakon elektromagnetne indukcije.

Dodatak I – Magnetni fluks Φ_m (Wb)

Za razumevanje daljeg objašnjavanja Faradejevog zakona nužno je reći nekoliko osnovnih stvari o magnetnom fluksu.

Magnetni fluks kroz datu površinu (S) je jednak broju prodora linija sile magnetnog polja kroz tu površinu.

Magnetni fluks je određen obrascem:

$$\Phi_m = \vec{B} \cdot \vec{S}$$

tj. određen je kao skalarni proizvod: vektora indukcije (jačine) magnetnog polja i vektora zadate površine.

Kao što je poznato iz magnetnog polja - \vec{B} ima pravac tangente na liniju sile magnetnog polja u datoj tački, dok mu je smer isti sa smerom te linije sile. Ako su linije sile magnetnog polja pravolinijske (kao što je slučaj u prostoru između dva suprotna magnetna pola), tada \vec{B} ima isti pravac i smer sa njima.

Iz matematike znamo da je vektor date površine \vec{S} , vektor čija je napadna tačka u centru te površine, a čiji pravac je normalan na ovu površinu. Smer ovog vektora zavisi od načina obeležavanja ove površine i u ovom slučaju nije bitan.

Za izračunavanje magnetnog fluksa koristimo sledeći obrazac:

$$\Phi_m = B \cdot S \cdot \cos \alpha$$

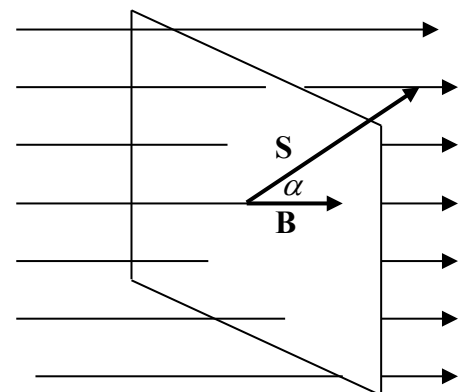
koji je u skladu sa zakonom skalarnog množenja, gde je:

$$\alpha = \angle(\vec{B}, \vec{S}).$$

Magnetni fluks (a to znači broj prodora linija sile kroz datu površinu) je direktno srazmeran jačini magnetnog polja i površini, a od ugla zavisi na složen kosinusni način:

$$\begin{aligned} \alpha = 0^\circ &\Rightarrow \Phi_{m,\max} \\ \alpha \uparrow (0^\circ \rightarrow 90^\circ) &\Rightarrow \Phi_m \downarrow \\ \alpha = 90^\circ &\Rightarrow \Phi_m = 0 \end{aligned}$$

sl. 1.



$$\alpha \uparrow (90^\circ \rightarrow 180^\circ) \Rightarrow \Phi_m \uparrow$$

$$\alpha = 180^\circ \Rightarrow \Phi_{m,\max} \dots$$

Direktnu srazmeru fluksa i jačine magnetnog polja je lako razumeti ako imamo na umu da se jače magnetno polje uvek, po dogovoru u fizici, prikazuje gušće raspoređenim linijama sile.

Najlakše je razumeti direktnu srazmeru fluksa i površine, jer će povećana površina sigurno zahvatiti veći broj linija sile.

Zavisnost fluksa od ugla je najteže shvatiti, ali ako zamislite da izvestan broj linija sile magnetnog polja prolazi kroz površinu pod pravim uglom (tada je $\alpha = 0^\circ$, ili $\alpha = 180^\circ$, koja je vrednost ugla od ove dve, zavisi od smera vektora površine) tada je fluks maksimalan. Ako počnete da okrećete tu površinu vrednost ugla će se menjati, ali će se broj prodora linija sile kroz tu površinu smanjivati sve dok površinu ne okrenete tako da linije sile budu sa njom paralelne. Tada je $\alpha = 90^\circ$, a nema više ni jednog prodora kroz tu površinu – pa je i fluks kroz nju tada jednak nuli.

Faradejevi eksperimenti

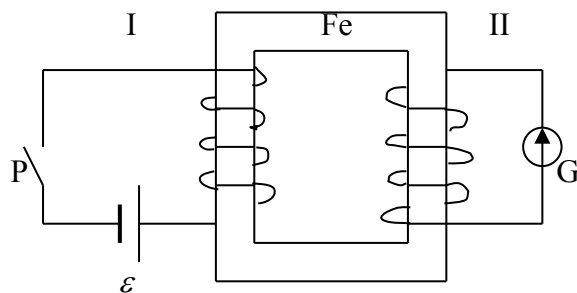
Prethodno izneti podaci o magnetnom fluksu i Faradejev zakon ukazuju na tri različita načina za indukciju struje. Logika je sledeća: promena magnetnog fluksa je uzrok indukcije, a fluks zavisi od tri veličine – B , S i α . Promena svake od njih će izazvati promenu fluksa, što će rezultovati indukcijom elektromotorne sile tj. struje.

U I Faradejevom eksperimentu promena jačine magnetnog polja B izaziva promenu fluksa, a to dovodi do indukcije. U ovom eksperimentu (sl. 2.)

Faradej je prvi put uspeo da ostvari elektromagnetnu indukciju. Primarno strujno kolo – primar je sa leve strane gvoždenog jezgra, dok je sa desne strane sekundarno strujno kolo – sekundar.

U primaru je jak izvor struje i prekidač, dok se u sekundaru nalazi samo galvanometar – uređaj za detekciju vrlo slabih struja. Žica od koje su napravljene primar i sekundar je izolovana.

Faradej je otkrio da se u sekundaru indukuje kratkotrajna struja samo pri uključivanju, tj. pri isključivanju prekidača u primaru. Razlog za ovo je sledeći: dok raste jačina struje u primaru, njeno magnetno polje se pojačava, dakle B raste, pri čemu je sekundarno kolo zahvaćeno ovim rastućim magnetnim poljem, što povećava magnetni

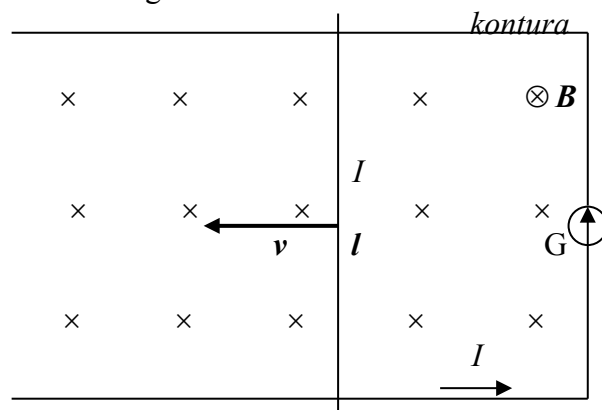


sl. 2.

fluks kroz površinu sekundara: $\Delta\Phi_m = \Delta B \cdot S \cdot \cos\alpha$, a to po Faradejevom zakonu: $\varepsilon_i = -\frac{\Delta\Phi_m}{\Delta t}$

izaziva indukciju struje u sekundaru, koju je moguće očitati na galvanometru.

U II Faradejevom eksperimentu, stujno kolo je načinjeno od žice savijene u obliku slova P (ćirilicom) – taj deo kola se naziva kontura i provodnika dužine l . Polovi magneta su postavljeni tako, da linije sile magnetnog polja prodiru pod pravim uglom kroz površinu S koju to strujno kolo oivičava. Na sl. 3. uzeto je da su linije sile usmerene u sliku, pa su zato njihovi prodori kroz površinu S prikazani oznakom \times . Provodnik se, po dva kraka konture, može kretati kao po šinama i u prikazanom slučaju on se kotrlja ulevo brzinom v , što je uzrok indukcije elektromotorne sile u njemu, tj. indukcije struje u celom kolu.

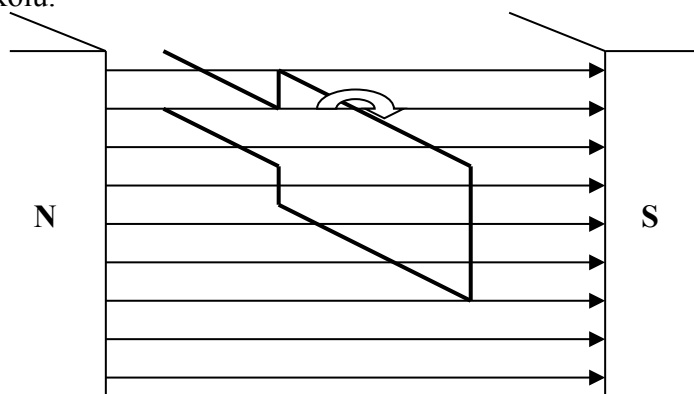


sl. 3.

Pritom je važno da između provodnika i konture postoji, sve vreme, idealni električni kontakt – da bi strujno kolo, koje oni čine, bilo zatvoreno.

Razlog, da kretanje provodnika, na prethodno opisani način, bude uzrok indukcije elektromotorne sile u njemu, tj. struje u kolu, je sledeći: kretanjem provodnika (sl. 3.) povećava se površina S koju dato strujno kolo oivičava – zbog čega se povećava i magnetni fluks kroz tu površinu: $\Delta\Phi_m = B \cdot \Delta S \cdot \cos\alpha$, a to po Faradejevom zakonu: $\varepsilon_i = -\frac{\Delta\Phi_m}{\Delta t}$, dovodi do indukcije elektromotorne sile u provodniku, tj. struje u kolu.

U III Faradejevom eksperimentu, stalno i homogeno magnetno polje je izazvano pomoću dva komada magnetita okrenutih jedan prema drugome suprotnim polovima (sl. 4.). U prostoru između polova se nalazi žičani ram – koji predstavlja strujno kolo. Okretanje rama, oko uzdužne ose, izaziva indukciju elektromotorne sile u njemu. Ovo je, kao što je na početku lekcije rečeno, princip rada generatora. Razlog za indukciju elektromotorne sile, tj. struje u ramu je ponovo promena magnetnog fluksa kroz površinu koju ram oivičava. Ali sada je



sl. 4.

razlog za promenu magnetnog fluksa drugačiji nego u prethodna dva slučaja. Zbog obrtanja rama menja se ugao α između vektora magnetne indukcije \mathbf{B} i vektora površine rama \mathbf{S} . To dovodi do neprestane promene magnetnog fluksa kroz površinu rama: $\Delta\Phi_m = B \cdot S \cdot \Delta(\cos\alpha)$, što dovodi do indukcije elektromotorne sile u ramu u skladu sa Faradejevim zakonom: $\varepsilon_i = -\frac{\Delta\Phi_m}{\Delta t}$.

Kod realnih generatora kao pogonska energija za obrtanje rama koristi se energija vode u hidroelektranama ili energija sabijene vrele vodene pare u termoelektranama. Više o generatorima biće rečeno u istoimenoj lekciji u oblasti: »Naizmjenična struja«.

Izvođenje Faradejevog zakona:

Na sl. 5. prikazano je kretanje pravolinijskog provodnika dužine l kroz magnetno polje tako da vektor njegove brzine \mathbf{v} i vektor indukcije magnetnog polja \mathbf{B} zaklapaju ugao $\theta = \angle(\mathbf{v}, \mathbf{B}) = 90^\circ$. Elektroni, koji se nalaze u međuatomskom prostoru unutar provodnika, su izloženi dejstvu magnetne sile po Lorencovom zakonu: $\vec{F}_L = q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$.

Kako je: $q = -e = -1,6 \cdot 10^{-19} C$,

sledi: $\vec{F}_L = -e \cdot \vec{v} \times \vec{B}$.

Zbog osobine vektorskog proizvoda da je:

$$-\vec{A} \times \vec{B} = \vec{B} \times \vec{A}$$

tj. da vektorski proizvod nije komutativan,

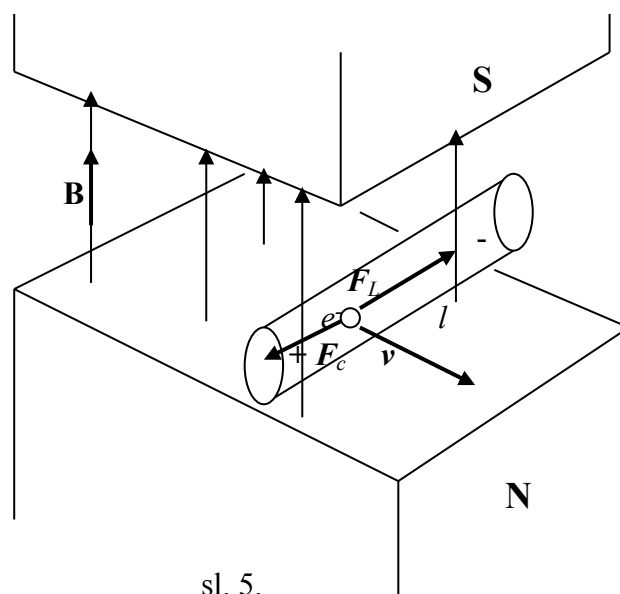
Lorencova sila koja deluje na elektron je, koji se nalazi unutar provodnika koji se kreće stalnom brzinom \mathbf{v} kroz magnetno polje indukcije \mathbf{B} , je:

$$\vec{F}_L = e \cdot \vec{B} \times \vec{v}.$$

3 prsta palac kažiprst (pravilo desne ruke)

Brojna vrednost ovakve Lorencove sile, u slučaju prikazanom na sl. 5. je:

$$F_L = e \cdot B \cdot v \cdot \sin\theta = e \cdot B \cdot v \cdot \sin 90^\circ = e \cdot B \cdot v.$$



sl. 5.

Na sl. 5. je primenjeno pravilo desne ruke za određivanje pravca i smera delovanja Lorencove sile. Sila, unutar provodnika, deluje na slobodne elektrone tako što ih premešta ka desnom kraju provodnika, čineći desni kraj provodnika negativnim, dok levi kraj provodnika ostaje sa manjkom elektrona, dakle pozitivan. Prelazak sve većeg broja elektrona na desni kraj provodnika izaziva u unutrašnjosti provodnika sve jače električno polje, koje deluje na elektrone sve jačom Kulonovom silom F_c , u smeru suprotnom od smera delovanja Lorencove sile. Elektroni nastavljaju sa odlaskom ka desnom kraju provodnika, sve dok se Kulonova sila ne izjednači – i poništi sa Lorencovom silom. Od tog trenutka nastaje dinamička ravnoteža, koja rezultuje stalnom elektromotornom silom, tj. potencijalnom razlikom između krajeva pokretnog provodnika.

U oblasti: »Jednosmerna struja u metalima«, definisana je elektromotorna sila na sledeći način: **Elektromotorna sila je brojno jednaka radu koji mora da izvrši strana sila u izvoru struje da bi premestila jedinicu količine elektriciteta sa jednog pola izvora na drugi, ali kroz izvor.**

U našem slučaju ulogu strane sile ima Lorencova sila koja premešta elektrone sa jednog kraja provodnika na drugi, a očigledno je da sam provodnik koji se kreće kroz magnetno polje ima ulogu izvora struje. Dakle po definiciji:

$$\varepsilon_i = \frac{A_s}{q} = \frac{F_L \cdot l}{-e} = \frac{e \cdot B \cdot v \cdot l}{-e} = -v \cdot B \cdot l.$$

Dakle, obrazac za elektromotornu silu, indukovanu u provodniku koji se kreće kroz magnetno polje, glasi:

$$\varepsilon_i = -v \cdot B \cdot l.$$

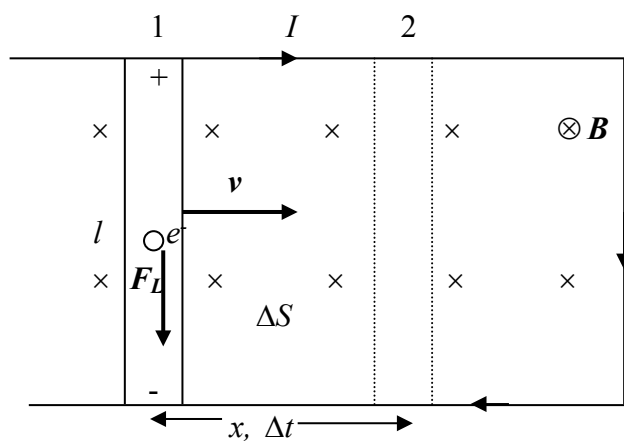
Treba imati na umu da smo ovaj obrazac izveli u specijalnom slučaju kada je: $\theta = 90^\circ$, što je imalo za posledicu da je iz izraza za jačinu Lorencove sile nestao član: $\sin \theta$, zato što je jednak jedinici. U opštem slučaju, tj. za bilo koju vrednost ugla θ dobijeni obrazac za indukovanu elektromotornu silu bi glasio:

$$\varepsilon_i = -v \cdot B \cdot l \cdot \sin \theta.$$

Ovaj obrazac pokazuje da je brojna vrednost indukovane elektromotorne sile direktno srazmerna: brzini provodnika, intenzitetu indukcije magnetnog polja i dužini provodnika, ali da zavisi i od ugla θ na složen sinusni način:

$$\begin{aligned} \theta = 0^\circ &\Rightarrow \varepsilon_i = 0 \\ \theta \uparrow (0^\circ \rightarrow 90^\circ) &\Rightarrow \varepsilon_i \uparrow \\ \theta = 90^\circ &\Rightarrow \varepsilon_{i,\max} \\ \theta \uparrow (90^\circ \rightarrow 180^\circ) &\Rightarrow \varepsilon_i \downarrow \\ \theta = 180^\circ &\Rightarrow \varepsilon_i = 0 \text{ itd.} \end{aligned}$$

Na sl. 6. prikazan je II Faradejev eksperiment, ali tako da bude vidljivo razdvajanje naelektrisanja u pokretnom provodniku. Na slici su prikazana dva položaja provodnika, pa je na taj način vidljiva promena površine strujnog kola ΔS .



sl. 6.

Ako je x rastojanje između dva položaja provodnika, a Δt vreme za koje je provodnik ovo rastojanje prešao krećući se brzinom v , sledi:

$$x = v \cdot \Delta t.$$

Promena površine je:

$$\Delta S = l \cdot x = l \cdot v \cdot \Delta t.$$

U ovom slučaju promena površine, koju oivičava dato strujno kolo, izaziva promenu magnetnog fluksa kroz tu površinu:

$$\Delta \phi_m = B \cdot \Delta S \cdot \cos \alpha.$$

Kako su linije sile magnetnog polja normalne na površinu strujnog kola, ugao α između vektora B i S je jednak nuli, pa je zato: $\cos \alpha = 1$, pa sledi:

$$\Delta \phi_m = B \cdot \Delta S$$

$$\Delta\phi_m = B \cdot l \cdot v \cdot \Delta t$$

$$\frac{\Delta\phi_m}{\Delta t} = v \cdot B \cdot l$$

$$-v \cdot B \cdot l = -\frac{\Delta\phi_m}{\Delta t}$$

Kako je prethodno izvedeno: $\varepsilon_i = -v \cdot B \cdot l$, sledi:

$$\varepsilon_i = -\frac{\Delta\phi_m}{\Delta t}$$

Ovaj obrazac, iako je izveden iz II Faradejevog eksperimenta, važi u svim slučajevima i predstavlja najopštiji oblik Faradejevog zakona elektromagnetne indukcije.

Rekapitulacija:

Ako uzmemo u razmatranje upravo izveden Faradejev zakon elektromagnetne indukcije i obrazac za magnetni fluks, može se videti da će svaka promena magnetnog fluksa kroz površinu strujnog kola dovesti do indukcije elektromotorne sile u kolu. Sada je jasno je da postoje tri načina za indukciju struje:

1. $\Delta\phi_m = \Delta B \cdot S \cdot \cos\alpha$, dakle u ovom slučaju promenom indukcije (jačine) magnetnog polja, kao u I Faradejevom eksperimentu,
2. $\Delta\phi_m = B \cdot \Delta S \cdot \cos\alpha$, u ovom slučaju promenom površine koju obuhvata strujno kolo, kao u II Faradejevom eksperimentu i
3. $\Delta\phi_m = B \cdot S \cdot \cos\Delta\alpha$, i na kraju promenom ugla čiji su kraci: vektor indukcije magnetnog polja i vektor površine, kao u III Faradejevom eksperimentu.

U II i III Faradejevom eksperimentu važi obrazac za indukovanu elektromotornu silu:

$$\varepsilon_i = -v \cdot B \cdot l \cdot \sin\theta$$

S obzirom kako indukovana elektromotorna sila zavisi od ugla (složeni sinusni način), može se zaključiti da će se indukcija elektromotorne sile u provodniku dešavati uvek kada se on kreće tako - da seče magnetne linije sile. Najveća elektromotorna sila će se indukovati ako je ugao presecanja 90° . Indukcije uopšte neće biti ako provodnik klizi po linijama sile, svejedno da li klizi niz njih (tada je ugao $\theta = 0^\circ$), ili uz njih (tada je ugao $\theta = 180^\circ$).

Otkriće elektromagnetnog polja

Ako se vratimo Faradejevim eksperimentima i postavimo pitanje – šta razdvaja naelektrisanja u provodniku da bi se na njegovim krajevima pojavila potencijalna razlika koja, u stvari, predstavlja indukovanu elektromotornu silu, videćemo da je odgovor lak kod II i III Faradejevog eksperimenta, jer tu razdvajanje naelektrisanja vrši Lorencova sila: $\vec{F}_L = q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$, koja se javlja kao posledica kretanja provodnika u oba eksperimenta, pri čemu provodnik nosi sa sobom brzinom v i slobodne elektrone u sebi – što je uzrok delovanja Lorencove sile na njih.

Međutim, potraga za odgovorom na isto pitanje u I Faradejevom eksperimentu bi ukazala da razlog razdvajanja naelektrisanja u sekundarnom navoju ne može biti isti kao u preostala dva slučaja, jer se nijedan deo sekundarnog strujnog kola ne kreće. Dakle ako elektrone u sekundaru ne razdvaja magnetna – Lorencova sila šta je uzrok njihovog razdvajanja na krajevima sekundarnog navoja.

Odgovor na ovo pitanje otkrio je Maksvel sredinom XIX veka. On je uveo novu pretpostavku da: po jačini promenljivo magnetno polje primara izaziva (indukuje) u prostoru oko sebe promenljivo električno polje, koje bi moglo biti uzrok pokretanja elektrona u sekundarnom kolu. Ili uopšteno: ***u prostoru oko promenljivog magnetnog polja indukuje se promenljivo električno polje. Ovakva kombinacija dva polja nazvana je elektromagnetno polje.***

Treba napomenuti da su linije sile ovog električnog polja zatvorene (kružne), pa da ovo električno polje spada u vrtložna polja – za razliku od elektrostatičkog polja čije su linije sile otvorene (pravolinijske). Razlog za razliku se svakako nalazi u različitim izvorima ova dva polja.

Izvor promenljivog vrtložnog električnog polja je promenljivo i takođe vrtložno magnetno polje, a izvor elektrostatičkog polja je naelektrisanje koje miruje.

Linije sila magnetnog i električnog polja, koja čine elektromagnetno polje, su uvučene jedne u druge kao karike na lancu, a površine kojima ove kružne linije sile pripadaju međusobno grade prav ugao.

Dakle na ovaj način je otkriveno postojanje elektromagnetnog polja, a u tome je i teorijski značaj Faradejevog zakona u oblasti elektromagnetnog polja.

Lencovo pravilo

Na samom početku srednjoškolskog kursa fizike bilo je reči o temeljnim zakonima fizike. Jedan od ta dva temeljna zakona je Zakon održanja energije. Tada je rečeno da nas ovaj zakon sprečava da napravimo Perpetuum mobile I vrste – mašinu koja bi radila ali ne bi trošila ništa. Treba imati na umu da Zakon održanja energije nije moguće dokazati, pa se zato njegovo važenje proverava za svaku novootkrivenu fizičku pojavu. On je proveren i važi u svim do danas otkrivenim prirodnim pojavama, a proveru njegovog važenja u pojavi elektromagnetne indukcije izveo je Lenc.

Posle dužeg eksperimentisanja Lenc je došao do svog pravila, koje se može izreći na više različitih načina, ali smisao ovog pravila je uvek isti:

Nemoguće je napraviti Perpetuum mobile I vrste koristeći pojavu elektromagnetne indukcije, tj. u pojavi elektromagnetne indukcije važi Zakon održanja energije.

U ovome se sadrži teorijski značaj Lencovog pravila, a njegov praktični značaj je da pomoću ovog pravila možemo određivati smer indukovane struje. Pre nego što prikazem ovo određivanje smeru indukovane struje na primeru II Faradejevog eksperimenta, evo još nekoliko definicija ovog pravila:

Smer indukovane struje je takav da se ona svojim magnetnim poljem uvek suprotstavlja promeni magnetnog fluksa koji je izaziva. Ova formulacija je najopštija i važi za sva tri Faradejeva eksperimenta.

Pri indukciji struje vektori magnetne – Amperove sile i brzine imaju uvek suprotan smer. Ova formulacija važi u II i III, a ne važi za I Faradejev eksperiment. Upravo ovu formulaciju ću malo kasnije iskoristiti za određivanje smeru indukovane struje.

Može se čak reći: **Indukovana struja se uvek ponaša kao samoubica.**

Insistiranje na reči uvek u svim prethodnim definicijama Lencovog pravila znači da ovo pravilo nema izuzetke.

Pogledajmo sada ponovo II Faradejev eksperiment i način određivanja smeru indukovane struje u pokretnom provodniku.

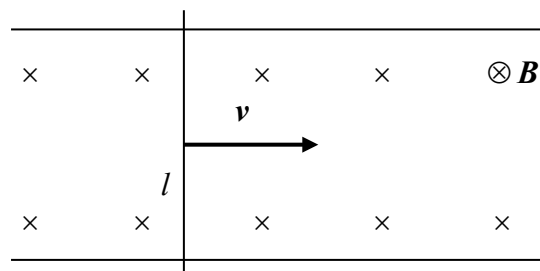
Na sl. 7.a. prikazana je početna pozicija, provodnik se kreće »u desno« po konturi, a magnetno polje je usmereno »u sliku«.

Na sl. 7.b. prvo je dodata magnetna – Amperova sila, koja po Lencovom pravilu mora biti usmerena u smeru suprotnom od smeru kretanja provodnika. Ova sila deluje na provodnik po Amperovom zakonu koji glasi:

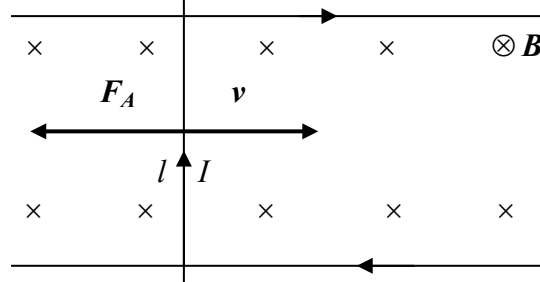
$$\vec{F}_A = I \cdot \vec{l} \times \vec{B}.$$

I – je jačina struje u provodniku, l – je njegova zahvaćena dužina, tj. ona dužina provodnika koja je zahvaćena magnetnim poljem, čija je indukcija označena sa B .

Kako je na slici poznat pravac i smer vektora Amperove sile (tri prsta) i vektora indukcije magnetnog polja (kažiprst), tada je moguće, pravilom desne ruke za vektorski proizvod, odrediti pravac i smer struje u pokretnom provodniku (palac).



sl. 7.a.



sl. 7. b.

Na kraju treba naglasiti da bi izuzetak od Lencovog pravila omogućio da se konstruiše Perpetuum mobile I vrste. Kada bi, na primer, na sl. 7. b. Amperova sila bila usmerena u istom smeru u kome provodnik vrši kretanje, tj. kada bi F_A i v bili u istom a ne u suprotnom smeru, tada bi Amperova sila povećavala brzinu provodnika, što bi na osnovu obrasca: $\varepsilon_i = -v \cdot B \cdot l \cdot \sin \theta$ dovelo do porasta indukovane elektromotorne sile, što bi logično izazvalo povećanje jačine indukovane struje I , a što bi opet na osnovu Amperovog zakona: $F_A = I \cdot l \cdot B \cdot \sin \varphi$ povećalo jačinu Amperove sile, a to bi dodatno povećalo brzinu...

Pritom treba uzeti u obzir da bi za izvor magnetnog polja mogli uzeti prirodni magnet, pa ne bi uopšte trošili energiju, osim za inicijalno pokretanje provodnika.

Samoindukcija

Samoindukcija je efekat koji se javlja uvek, kada se u strujnom kolu desi promena jačine struje. Tada se u strujnom kolu indukuje sama od sebe jedna elektromotorna sila – elektromotorna sila samoindukcije - ε_{si} , koja teži da spreči promenu jačine struje – koja je izaziva. Očigledno je da se i elektromotorna sila samoindukcije ponaša kao samoubica, tj. u skladu sa Lencovim pravilom, što znači da ni ovaj efekat ne možemo iskoristiti za pravljenje Perpetuum mobila I vrste.

Obrazac za elektromotornu silu samoindukcije glasi:

$$\varepsilon_{si} = -L \frac{\Delta i}{\Delta t}$$

Δi - je pomenuta promena jačine struje, dok je Δt vreme trajanja te promene. Zbog toga se količnik ove dve veličine $\frac{\Delta i}{\Delta t}$ može smatrati brzinom promene jačine struje.

L - je koeficijent samoindukcije (ili induktivnost) i za dato strujno kolo je konstanta, ali se kod različitih strujnih kola razlikuje. Vrednost koeficijenta samoindukcije zavisi od geometrijskog oblika provodnika: ako je provodnik pravolinijski tada je L_{min} , a ako je provodnik u obliku kalema tada L ima povećanu vrednost. Dakle koeficijent samoindukcije datog strujnog kola zavisi od ukupnog broja navojaka svih kalemova koji se nalaze u tom kolu. L zavisi i od vrste materijalne sredine u kojoj se strujno kolo nalazi. Recimo prisustvo gvožđa (i ostalih feromagneta) u značajnoj meri povećava vrednost koeficijenta samoindukcije. Jedinica za koeficijent samoindukcije je 1 H (Henri).

Znak »minus« u obrascu ukazuje na činjenicu da se elektromotorna sila samoindukcije uvek suprotstavlja promeni jačine struje.

Na osnovu svega prethodno rečenog ovaj obrazac čitamo na sledeći način: Elektromotorna sila samoindukcije je direktno srazmerna brzini promene jačine struje. Ona takođe zavisi i od koeficijenta samoindukcije. To znači da je elektromotorna sila samoindukcije utoliko jača ukoliko se jačine struje brže menja, ali i ukoliko je koeficijent samoindukcije veći, tj. ukoliko je broj navojaka u kolu veći, ali i ukoliko se kolo nalazi u blizini nekog feromagneta.

Elektromotorna sila samoindukcije nikada nije dovoljno jaka da u potpunosti zaustavi promenu jačine struje u kolu. Jedini vidljivi efekat njenog delovanja je da ona produžava vreme potrebno da se ta promena desi, tj. ona usporava promenu jačine struje. Ovaj efekat je u fizici poznat pod skraćenim nazivom »kašnjenje struje«.

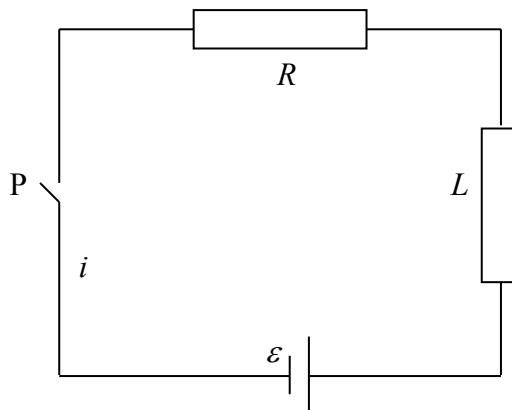
Kašnjenje struje se javlja u složenim strujnim kolima (televizor, radio aparat itd.) pri njihovom uključenju – tada raste jačina struje, ili pri njihovom isključenju – tada se jačina struje smanjuje. Objašnjenje je sledeće. Pri uključenju televizora jačina struje sporo dostiže maksimalnu jačinu, jer je u porastu ometa jaka elektromotorna sila samoindukcije, pa je to uzrok usporenog pojavljivanja slike na ekranu, pod uslovom da kolo za grejanje katode nije bilo isključeno – u slučaju da je kolo za grejanje katode ipak bilo isključeno, tada je jedan od uzroka kašnjenja slike i vreme potrebno da se katoda zagreje na radnu temperaturu. Takođe, treba imati na umu da kod najnovijih tipova televizora, kašnjenje slike može biti uzrokovano i vremenom potrebnim za učitavanje podataka u radnu memoriju TV aparata. Pri isključenju televizora slika se postepeno gubi zato što jačina struje usporeno opada do nule, opet zbog dejstva elektromotorne sile samoindukcije.

Međutim efekat samoindukcije može biti vidljiv i u manje složenim strujnim kolima. Kao primer mogu navesti varnicu koja se može javiti u prekidaču kada, recimo, isključimo sijalicu.

Posle isključenja prekidača jačina struje ne može da odmah padne na nulu, jer je u tome ometa elektromotorna sila samoindukcije. Taj produženi tok struje izaziva da se elektroni gomilaju na jednom polu prekidača čineći ga negativnim, dok se drugi pol istovremeno elektriše pozitivno zbog odlaska elektrona sa njega. Na taj način se između polova prekidača javlja razlika potencijala koja može da izazove električno pražnjenje (malu varnicu) između njih, naročito ako su, kada je prekidač isključen, njegovi polovi nedovoljno odmaknuti jedan od drugog.

Energija magnetnog polja

Na sl. 8. je prikazano strujno kolo u kome je prekidač uključen u datom trenutku vremena t_1 , pri čemu struja raste do svoje maksimalne vrednosti koju postiže u trenutku vremena t_2 . Na ovaj način definišano je interval vremena $\Delta t = t_2 - t_1$. U toku ovog intervala vremena javlja se u kolu promena jačine struje $\Delta i = i_{\max} - i_0 = I$ zato što je početna jačina struje i_0 jednaka nuli i zato što je za maksimalnu jačinu struje u kolu uvedena oznaka I . U kolu se nalazi: prekidač P, izvor jednosmerne struje, tj. baterija, otpornik R i kalem inductivnosti L .



sl. 8.

U intervalu vremena Δt , u toku koga struja raste, u kolu se pored elektromotorne sile izvora javlja i jaka elektromotorna sila samoindukcije – zbog čega je uostalom kalem i stavljen u ovo kolo. Sada se može napisati Omov zakon za ovo kolo, pod pretpostavkom da je otpor R jedini otpor u kolu, a iz njega sledi niz transformacija:

$$i = \frac{\varepsilon + \varepsilon_{si}}{R} \cdot R$$

$$i \cdot R = \varepsilon + \varepsilon_{si}$$

$$i \cdot R = \varepsilon - L \frac{\Delta i}{\Delta t}$$

$$\varepsilon = i \cdot R + L \frac{\Delta i}{\Delta t} \quad / \cdot i \cdot \Delta t$$

$$\varepsilon \cdot i \cdot \Delta t = i^2 \cdot R \cdot \Delta t + L \cdot i \cdot \Delta i.$$

Na levoj strani dobijenog izraza je rad koji se u ovom kolu vrši u toku vremena Δt , što je poznato iz Džul – Lencovog zakona za kolo jednosmerne struje. Na osnovu ovog istog zakona sledi da je prvi deo izraza na desnoj strani količina toplote koja se oslobodi u provodniku otpora R , kroz koji u toku vremena Δt protiče struja jačine i . Dakle:

$$\varepsilon \cdot i \cdot \Delta t = A$$

$$i^2 \cdot R \cdot \Delta t = Q.$$

Dakle ostaje pitanje – šta predstavlja član: $L \cdot i \cdot \Delta i$?

Definicija rada glasi: rad meri koliko energije pređe iz jednog oblika u drugi. Rad je dakle brojno jednak i potrošenoj energiji, ali i iz nje dobijenoj energiji. U ovom kolu se troši samo električna energija izvora struje, pa izraz na levoj strani (koji smo već proglasili za rad) možemo smatrati i za potrošenu električnu energiju izvora:

$$\varepsilon \cdot i \cdot \Delta t = A = \Delta E_{e,i}.$$

Ova potrošena električna energija se, u skladu sa zakonom održanja energije pretvara u dva nova oblika energije. Za prvi od njih smo utvrdili da je količina toplote Q , ali je ostalo nejasno koji se to još oblik energije stvara u ovom kolu dok struja raste od nule do svoje maksimalne vrednosti. Ta energija bi bila nepoznati drugi član $L \cdot i \cdot \Delta i$.

Od ranije znamo da oko provodnika sa strujom postoji magnetno polje. Pre uključenja prekidača u kolu nije bilo struje – što znači da oko kola nije bilo ni magnetnog polja. Posle uključenja prekidača u toku porasta jačine struje na maksimalnu vrednost nastaje i magnetno polje oko ovog kola. Očigledno je da za to vreme raste i jačina magnetnog polja, ali i količina magnetne energije u prostoru oko našeg strujnog kola. Zaključak je da je nepoznati član upravo ova rastuća energija magnetnog polja:

$$L \cdot i \cdot \Delta i = \Delta W_m.$$

Sada ranije dobijeni izraz možemo pisati sažeto kao:

$$\Delta E_{e,i} = Q + \Delta W_m.$$

On očigledno predstavlja zakon održanja energije, jer mu je na levoj strani potrošena, a na desnoj strani dobijena energija.

Na kraju može se odrediti i ukupna količina energije magnetnog polja W_m , koja se stvori u toku celog intervala vremena Δt u toku koga struja raste od nule pa do svoje maksimalne vrednosti u kolu. To se dobija zbirom svih delića energije ΔW_m u toku vremena Δt . Matematički, ovaj postupak zahteva upotrebu više matematike tj. upotrebu integralnog računa. Zato dajem samo krajnji rezultat:

$$W_m = \frac{L \cdot I^2}{2}.$$

Veličine na desnoj strani su poznate: L je koeficijent samoindukcije kalema, dok je I maksimalna jačina struje u kolu.

Prethodni postupak omogućava uvođenje pojma energije magnetnog polja, kao i direktno izračunavanje ove važne fizičke veličine. Pored toga od ovog postupka imamo još jednu neposrednu korist. To je mogućnost objašnjenja »kašnjenja struje« pri uključenju, kao i pri isključenju strujnog kola. Ovakvo objašnjenje je dato i u prethodnoj lekciji preko efekta samoindukcije. Ovoga puta objašnjenje ne koristi ovaj efekt, već je u osnovi sledećeg objašnjenja sam zakon održanja energije.

Ako pogledamo ponovo izraz:

$$\varepsilon \cdot i \cdot \Delta t = i^2 \cdot R \cdot \Delta t + L \cdot i \cdot \Delta i$$

možemo zaključiti da se, neposredno posle uključenja strujnog kola, električna energija izvora struje ($\varepsilon \cdot i \cdot \Delta t$) troši na dve stvari: na ubrzavanje elektrona u provodniku, tj. na povećanje jačine struje u njemu ($i^2 \cdot R \cdot \Delta t$) i na stvaranje energije magnetnog polja ($L \cdot i \cdot \Delta i$). Dakle u periodu porasta jačine struje neposredno po uključenju prekidača, a dok se stvara magnetno polje ovog strujnog kola, samo deo energije izvora ide na povećanje jačine struje u njemu, pa se zato i javlja »kašnjenje struje«.

Znamo da posle isključenja strujnog kola struja teče još neko izvesno vreme. Postavlja se pitanje: koju energiju koriste elektroni za ovakvo svoje produženo kretanje, ako se zna da su »odsečeni« od električne energije izvora struje isključenjem prekidača ? Drugo logično pitanje je: a šta se dešava sa energijom magnetnog polja koja je postojala oko strujnog kola sve vreme dok je u njemu tekla struja ? Ova energija, očigledno, ne može postojati i dalje, tj. kada u kolu prestane da postoji električna struja – zato što je upravo električna struja izvor magnetnog polja. Postoji odgovor koji rešava oba ova pitanja ! Upravo energiju magnetnog polja elektroni i koriste za svoje produženo kretanje posle isključenja strujnog kola – trošeći je. Na taj način oni će se produženo kretati sve dok energiju magnetnog polja potpuno ne potroše. Od tog trenutka neće više postojati ni kretanje elektrona u žici tj. električna struja u kolu, a ni energija magnetnog polja u prostoru oko njega.