

7.9. ELEKTROMAGNETSKA INDUKCIJA

Promatrajmo dio ravnog vodiča duljine l , koji se giba brzinom v u homogenom magnetskom polju tako da je vodič okomit na silnice magnetskog polja \vec{B} . Na slobodne elektrone u vodiču djeluje magnetska komponenta Loretzove sile $\vec{F}_m = q\vec{v} \times \vec{B}$, odnosno $F_m = qvB$. Smjer sile je takav da su elektroni pomaknuti prema dolje, a na gornjem kraju javlja se višak pozitivnih naboja. Duž vodiča se uspostavlja električno polje koje raste kako raste broj elektrona na donjem kraju. Kad F_m više nije dovoljno jaka da premješta elektrone, došlo je do uravnoteženja F_e i F_m : $F_e = qE = F_m = qvB$ ili $E = vB$

SLIKA: GIBANJE VODIČA U MAGNETSKOM POLJU KOJE „GLEDA“ U PAPIR – HORVAT SL.5.15. STR. 5-16.

Razlika potencijala, koja je stvorila električno polje, je: $V = El = Blv$

Gornji kraj je na većem potencijalu od donjeg.

Ako ovakav vodič stavimo da se giba po „U“ vodiču koji zatvara strujni krug, struja će teći kao na slici. Struja je uzrokovana elektromotornom silom. To je inducirana elektromotorna sila: $EMS_i = \mathcal{E}_i$.

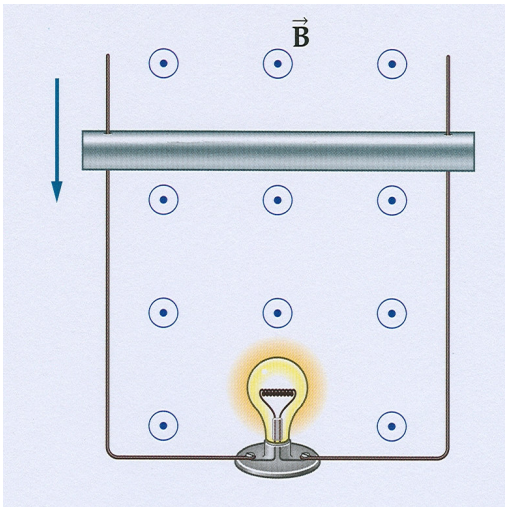
SLIKA: GIBANJE VODIČA U MAGNETSKOM POLJU PO „TRAČNICAMA“ KOJE ZATVARAJU STRUJNI KRUG – HORVAT SL.5.16. STR. 5-16.

Ovdje je EMS dobijena gibanjem vodiča u stalnom magnetskom polju.

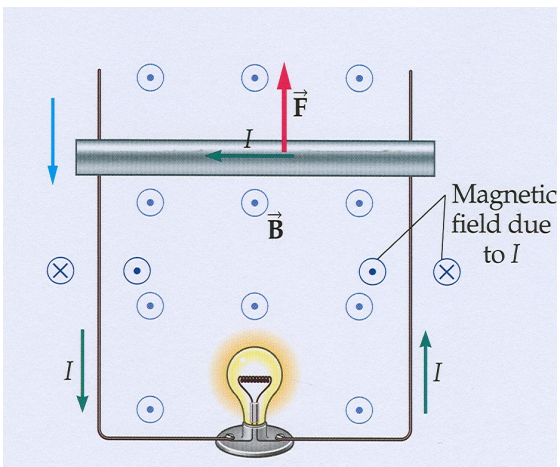
EMS određujemo tako da nađemo rad izvršen pri premještanju naboja q duž vodiča duljine l : $W = Fl = qvBl$

EMS je jednak radu po naboju: $\mathcal{E}_i = W / q = Blv$

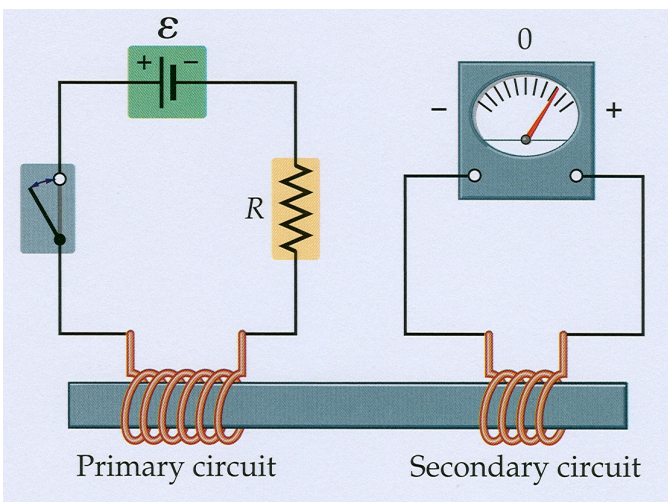
U općenitom slučaju proizvoljne orijentacije vodiča, smjera njegova gibanja ($\propto \vec{v}$) i polja \vec{B} imamo: $\mathcal{E}_i = W / q = l(\vec{v} \times \vec{B})$



Elektromotorna sila



Određivanje smjera inducirane struje



Magnetska indukcija

7.10. FARADAYEV ZAKON INDUKCIJE. TREĆA MAXWELLOVA JEDNADŽBA

7.10.1. FARADAYEV ZAKON INDUKCIJE

SLIKA: SILA NA VODIČ KOJIM TEČE STRUJA, U MAGNETSKOM POLJU – HORVAT SL.5.17. STR. 5-17.

Vodič kojim teče struja stavimo u magnetsko polje potkovastog magneta. Gibanjem vodiča u magnetskom polju inducira se EMS. Za razumijevanje inducirane EMS Faraday je pokazao u svojim pokusima da treba razmotriti magnetski tok.

FARADAYEVI POKUSI

Faraday je ustanovio da promjenjivo magnetsko polje stvara električno polje. Eksperimentalno je dokazao da promjenjivi magnetski tok kroz neki vodič (zavojnici) na njegovim krajevima inducira EMS. Uvlačenjem magnetskog štapa u zavojnicu (ili strujnu petlju) na njenim se krajevima inducira EMS, odnosno kroz strujni krug poteče struja. Izvlačenjem magneta nastaje EMS suprotnog smjera. Dok magnet u zavojnici miruje, nema inducirane EMS. Ako kroz zavojnicu gibamo elektromagnet, isto tako primjećujemo elektromagnetsku indukciju. Ako u jednoj od dvije zavojnice, koje su blizu jedna drugoj, mijenjamo jakost struje, u drugoj se inducira EMS. EMS se inducira i kad vodič siječe magnetske silnice.

Svi ovi pokusi pokazuju da se u petlji od jednog ili više zavoja žice inducira EMS uvijek kad se kroz petlju mijenja tok magnetskog polja. Inducirana EMS je veća što je promjena toka brža i što je broj zavoja veći.

Magnetski tok se može mijenjati na više načina:

- gibanjem vodiča u magnetskom polju
- gibanjem magneta s obzirom na vodič
- rotacijom zavojnice
- promjenom struje u zavojnici....

Općenito možemo reći da je elektromagnetska indukcija pojava u kojoj se mehanička energija pretvara u električnu u prisustvu magnetskog polja. Inducirana elektromotorna sila je proporcionalna brzini promjene magnetskog toka kroz petlju (zavoj žice):

$$\varepsilon = -d\phi / dt \quad \text{FARADAYEV ZAKON INDUKCIJE}$$

Ako umjesto jednog zavoja imamo N njih kod zavojnice, onda je: $\varepsilon = -Nd\phi / dt$

Ukupni tok je $N\phi$.

FARADAYEV ZAKON INDUKCIJE

$$\mathcal{E} = -d\phi / dt$$

Predznak „-“ je posljedica zakona o održanju energije (Lenzovo pravilo, kasnije)

Izvod Faradayeva zakona indukcije za poseban slučaj koji smo spominjali ranije: kratki metalni vodič duljine l klizi jednoliko brzinom \vec{v} preko 2 paralelne metalne tračnice okomito na homogeno magnetsko polje \vec{B} .

SLIKA: UZ IZVOD FARADAYEVA ZAKONA – HENČ-BARTOLIĆ, KULIŠIĆ – SL. 3.9. STR. 139.

Dok se vodič giba u magnetskom polju, na njegove slobodne elektrone djeluje Lorentzova sila $-e\vec{v} \times \vec{B}$ i tjera ih prema jednom kraju žice. To gibanje naboja (od D do C kod nas) je uzorkovano induciranim neelektrostatskim električnim poljem: $\vec{E}_{ind} = \vec{F} / Q$

$$\vec{E}_{ind} = -\vec{F} / e = \vec{v} \times \vec{B}$$

Žica se električki polarizira: jedan kraj žice je pozitivan, drugi negativan.

Tako razdvojeni naboji u žici stvaraju elektrostatsko polje \vec{E} - razdvajanje naboja prestaje i ravnoteža se uspostavlja kada \vec{E} postane $-\vec{v} \times \vec{B}$ i tako poništi inducirano električno polje. Inducirana EMS jednaka je cirkulaciji induciranog polja (neelektrostatskog polja):

$$\mathcal{E}_{ind} = \oint \vec{E}_{ind} d\vec{s} = \int_C^D (\vec{v} \times \vec{B}) d\vec{s} = vBl \quad (vB \text{ jer su okomiti})$$

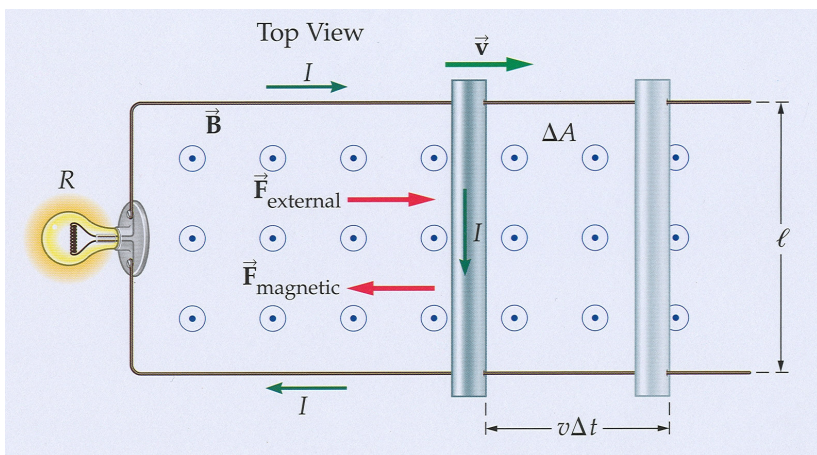
Ako \vec{v} i \vec{B} zatvaraju neki kut θ , onda je: $\mathcal{E}_{ind} = vB \sin \theta l = Blv \sin \theta$

Gibanjem vodiča mijenja se površina S koju petlja obuhvaća u magnetskom polju. Kod nas je petlja pravokutnik CDEF. Za vrijeme dt vodič se pomakne za $ds = vdt$ i pri tom se površina promijeni za $lvdt$ (odnosno lds).

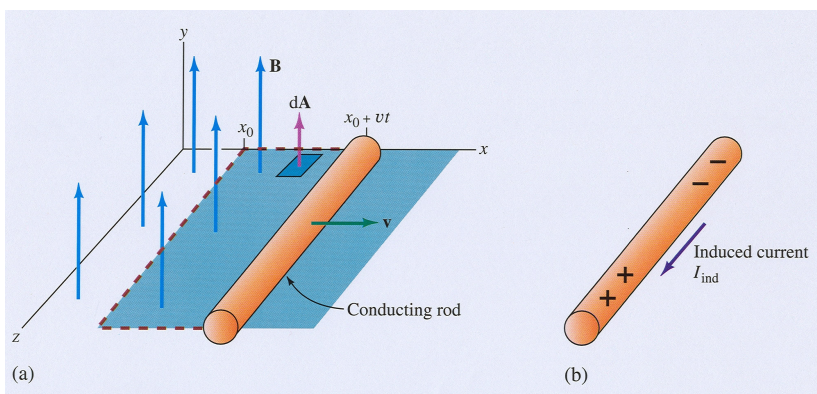
Promjena magnetskog toka je onda: $d\phi = Blvdt$

Slijedi: $d\phi / dt = Blv$

$$\mathcal{E}_{ind} = -d\phi / dt$$



Sila i inducirana struja



Vodič koji se giba kroz magnetsko polje

FARADAYEV ZAKON INDUKCIJE OPĆENITO

Inducirana EMS je cirkulacija induiranog električnog polja po zatvorenoj krivulji K:

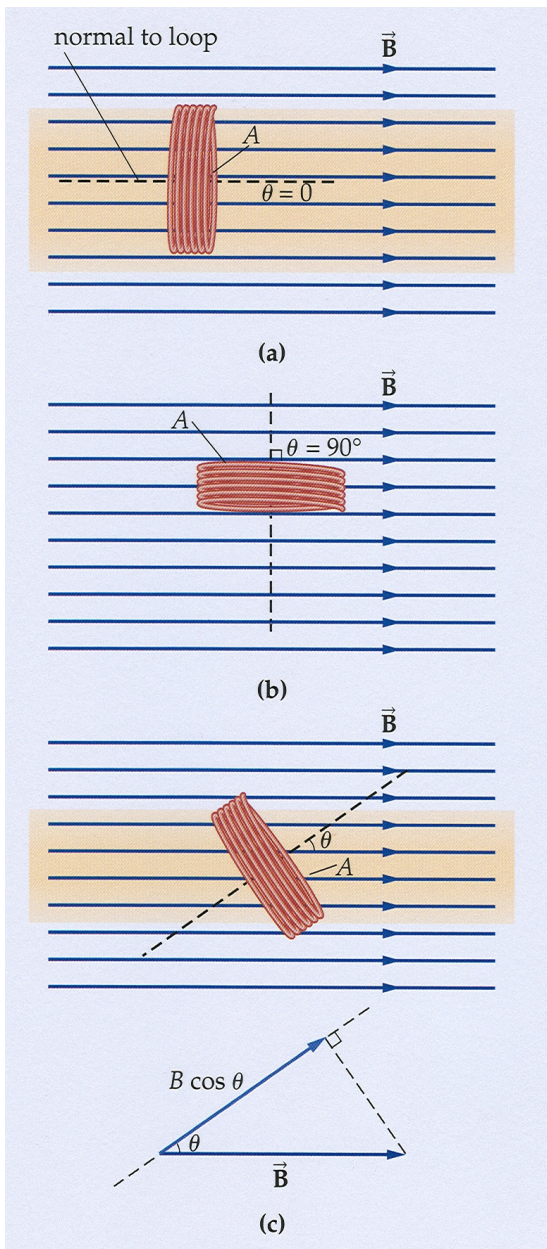
$$\mathcal{E}_{ind} = \oint_K \vec{E} d\vec{s}$$

Tok magnetskog polja je plošni integral magnetske indukcije po površini S koju krivulja K obuhvaća:

$$\phi = \iint_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

Iz $\mathcal{E}_{ind} = -d\phi/dt$ slijedi:

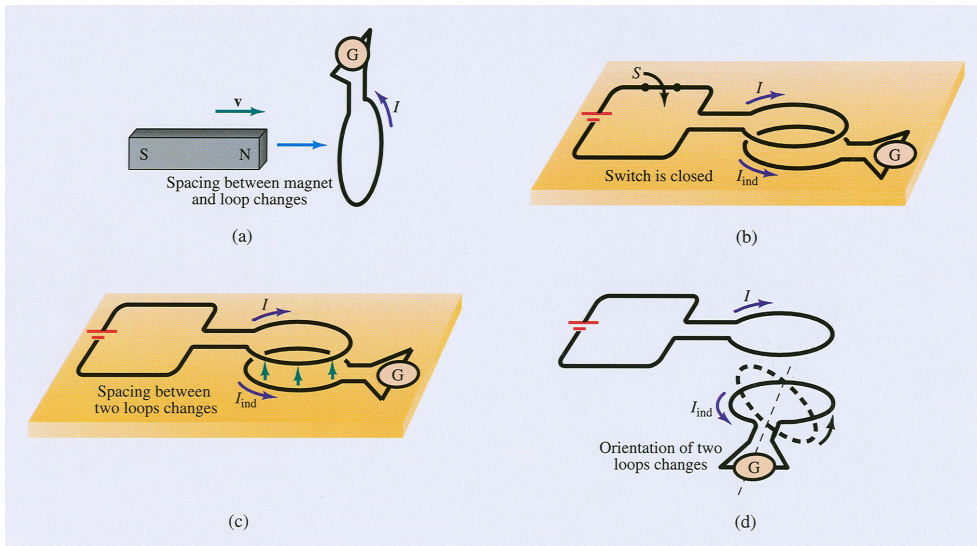
$$\mathcal{E}_{ind} = \oint_K \vec{E} d\vec{s} = -\frac{d}{dt} \iint_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$$



Magnetski tok kroz petlju

Promjena magnetskog toka inducira je električno polje. Magnetski tok se može mijenjati na dva načina:

1. Mijenjanjem toka magnetskog polja u vremenu zbog vremenske promjene magnetskog polja u mirnoj petlji (parcijalna derivacija toka po vremenu $\partial\phi/\partial t$)
2. Mijenjanjem toka zbog promjene površine petlje, to jest gibanjem pojedinih dijelova petlje (tu promjenu općenito pišemo kao $\oint_K (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{s}$, to jest u posebnom slučaju je to bilo Blv)



Promjena magnetskog toka kroz petlju

$$\text{Zajedno pisano imamo: } \mathcal{E}_{ind} = \oint_K \vec{E} \cdot d\vec{s} = -\frac{d\phi}{dt} = -\frac{\partial\phi}{\partial t} - \oint_K (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{s}$$

Općeniti izraz za Faradayev zakon indukcije.

$$\text{U elektrostatici: } \oint_K \vec{E} \cdot d\vec{s} = 0$$

To ne vrijedi za inducirano električno polje jer ono nije konzervativno.

LENZOVO PRAVILO

Inducirana EMS ovisi o brzini promjene magnetskog toka: $\mathcal{E} = -d\phi/dt$

Kad je strujni krug zatvoren, inducirana EMS uzrokuje struju: $I = \frac{\mathcal{E}}{R} = -\frac{1}{R} \frac{d\phi}{dt}$

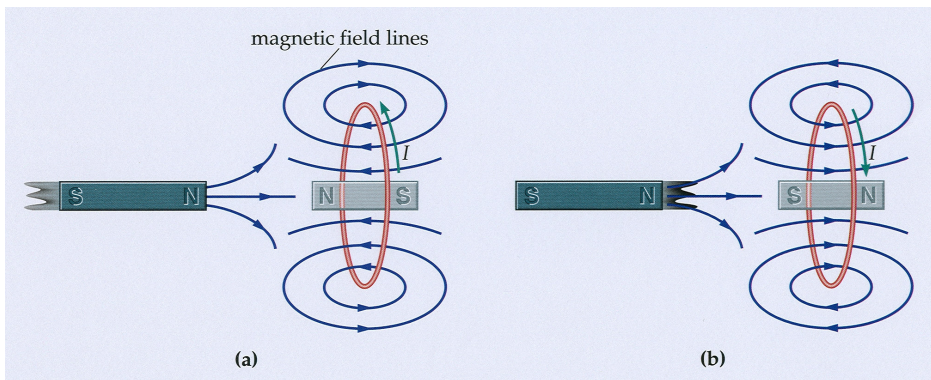
Lenzovo pravilo: inducirana električna struja ima takav smjer da proizvodi magnetski tok koji se suprotstavlja promjeni toka zbog kojeg je nastala.

Na primjer tok kroz petlju se smanjuje $d\phi < 0$, a inducirana struja ga svojim vlastitim tokom nastoji povećati – kad se tok poveća, inducira se struja koja ga svojim magnetnim učinkom nastoji smanjiti.

Lenzovo pravilo proizlazi iz zakona o očuvanju energije:

- rad koji ulažemo kad u magnetskom polju gibamo vodič pretvara se u vodiču u Jouleovu toplinu
- u suprotnom bi inducirana struja još jače mijenjala tok koji ju je proizveo – imali bismo pojačanje inducirane struje – nešto poput perpetuum mobile

Aragoov pokus (1824. godine) – ilustracija elektromagnetske indukcije i Lenzovog pravila



Primjena Lenzovog pravila na magnet koji se giba u i iz strujne petlje