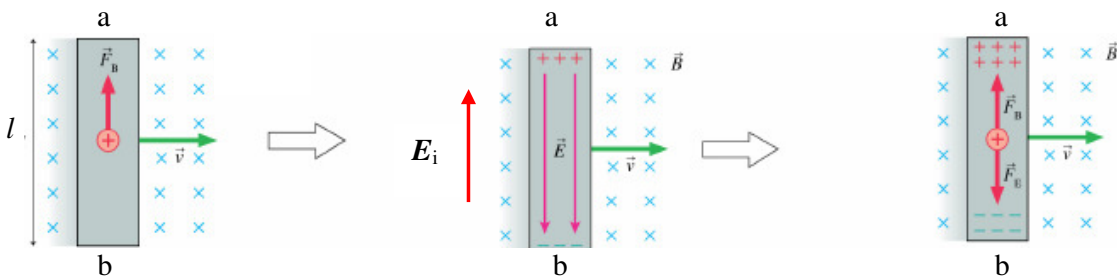


## 29. FARADAYEV ZAKON ELEKTROMAGNETSKE INDUKCIJE

Poslije Öerstedova otkrića 1820. godine koje je pokazalo da električna struja stvara magnetsko polje, mnogo je istraživača pokušavalo doći do odgovora na pitanje da li se magnetskim poljem može proizvesti električna struja. Bitan korak načinio je M. Faraday koji je uočio onaj dio koji je u dotadašnjim pokusima nedostajao, a to je da će se električni učinci pojaviti samo ako dolazi do promjena u magnetskom polju. To otkriće formulirano u *Faradayevom zakonu elektromagnetske indukcije* predstavlja jedno od fundamentalnih otkrića u povijesti znanosti, te je dovelo do razvitka elektrotehnike koja je omogućila brz razvoj civilizacije poznat pod nazivom „industrijska revolucija XX stoljeća“.

### 29.1. Elektromagnetska indukcija u vodiču koji se giba u magnetskom polju

Na slici 29.1. prikazan je vodič duljine  $l$ , koji se brzinom  $v$  giba u homogenom magnetskom polju indukcije  $B$ .



Slika 29.1. Gibanje vodiča u homogenom magnetskom polju

Na naboje u vodiču, koji se gibaju u magnetskom polju, djelovat će magnetska sila određena s (16.2):

$$\mathbf{F}_m = q(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (16.2)$$

Magnetska sila će na pozitivne naboje biti usmjerena uzduž vodiča prema gore, a na negativne naboje ta sila će biti suprotno usmjerena. Posljedica djelovanja magnetske sile je ta da će se na gornjem kraju vodiča pojaviti višak pozitivnih a na donjem kraju vodiča višak negativnih naboja. Magnetska sila djeluje na naboje u vodiču na isti način kao kad bi se vodič nalazio u homogenom *induciranom električnom polju* jakosti  $E_i$  usmjerenom kao i magnetska sila  $F_m$ :

$$\mathbf{F}_m = q(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) = q \cdot \mathbf{E}_i \quad ; \quad \mathbf{E}_i = \mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad (29.1)$$

Međutim, razdvojeni pozitivni i negativni naboji na krajevima vodiča stvaraju svoje električno polje jakosti  $E'$ , usmjereno od pozitivnih prema negativnim nabojima, tj. suprotno od induciranog električnog polja  $E_i$ . To električno polje djeluje električnom silom na naboje, koja je suprotno usmjerena od magnetske sile:

$$\mathbf{F}_e = q \cdot \mathbf{E}' \quad (29.2)$$

Razdvajanje naboja odvijat će se sve dotle dok se ne uspostavi ravnoteža magnetske  $F_m$  i električne sile  $F_e$  na naboje, tj. sve dotle dok količina razdvojenih naboja ne postane dovoljno velika da stvori električno polje jakosti  $E'$  iznosa potrebnog da poništi magnetsku silu  $F_m$ , tj. kad je:

$$\mathbf{E}_i + \mathbf{E}' = 0 \quad ; \quad \mathbf{E}_i = -\mathbf{E}' \quad (29.3)$$

Uzduž vodiča stvoreno je *elektromagnetskom indukcijom* inducirano električno polje  $\mathbf{E}_i$ , pa stoga između krajeva „a“ i „b“ vodiča postoji razlika potencijala, odnosno *inducirani napon* (*elektromotorna sila*). Iznos tog napona možemo odrediti iz sljedećeg razmatranja.

Pomakom naboja, magnetska sila je izvršila rad (dobijen iz djelovanja vanjske mehaničke sile kojom je ostvareno gibanje vodiča). Pomak naboja ostvaren je duž puta  $\mathbf{l}$  usmjerenog od kraja  $b$  do kraja  $a$  vodiča. Rad je:

$$A = \mathbf{F}_m \cdot \mathbf{l} = q(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{l} \quad (29.4)$$

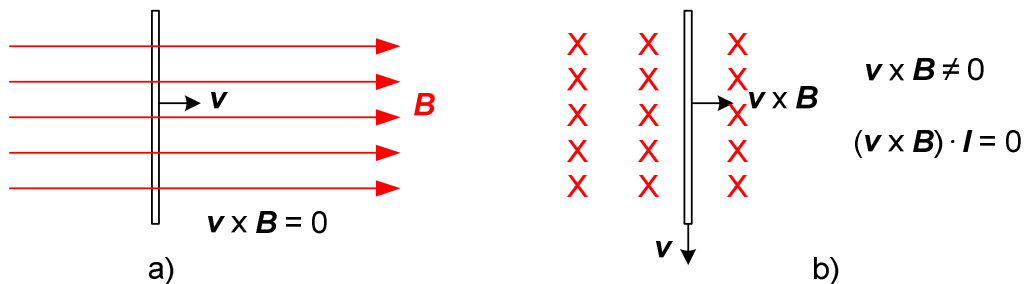
Taj rad je pretvoren u potencijalnu energiju razdvojenih naboja:  $W = A$ . Inducirani napon je onda:

$$u_i = u_{ab} = \frac{W}{q} = (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{l} \quad (29.5)$$

Ako su svi vektori  $\mathbf{v}$ ,  $\mathbf{B}$  i  $\mathbf{l}$  međusobno okomiti (kao u primjeru na slici 29.1.) inducirani napon je:

$$u_i = v \cdot B \cdot l \quad (29.6)$$

Relacija (29.5) ukazuje da se inducirani napon pojavljuje samo ako vodič *siječe* silnice magnetskog polja  $\mathbf{v} \times \mathbf{B} \neq 0$  (slika 29.2.a). Osim toga, da bi došlo do induciranja napona, gibanje vodiča ne smije biti u ravnini koju određuju magnetska indukcija i uzdužna dimenzija vodiča (slika 29.2.b):



Slika 29.2. Primjeri kada nema induciranja napona pri gibanju vodiča

Ako vodič nije ravni, ili ako magnetsko polje nije homogeno, inducirani napon u diferencijalnom dijelu vodiča  $d\mathbf{l}$  je:

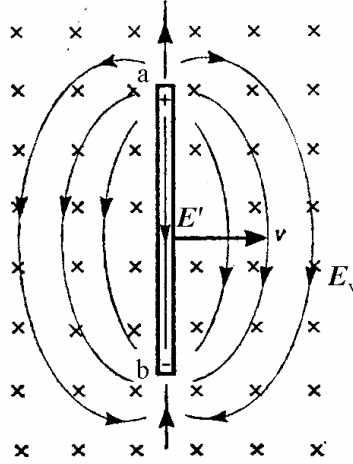
$$du_i = (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot d\mathbf{l} \quad (29.7)$$

a ukupni inducirani napon računamo integracijom po cijeloj duljini vodiča  $l$ :

$$u_i = \int_l (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot d\mathbf{l} \quad (29.8)$$

Inducirani napon nastao gibanjem vodiča u magnetskom polju nazivamo *napon gibanja* (*rotacije*).

Inducirani napon možemo prikazati i na sljedeći način. Razdvojeni naboji na krajevima vodiča stvaraju izvan vodiča statičko električno polje  $E_v$  usmjereno od „+“ prema „-“ kraju vodiča, te unutar vodiča električno polje  $E'$  također usmjereno od „+“ prema „-“ kraju vodiča, slika 29.3.



Slika 29.3. Statičko električno polje razdvojenih naboja u vodiču

Statičko električno polje je konzervativno polje, pa za njega vrijedi relacija (9.14):

$$\oint_c \mathbf{E}_s \cdot d\mathbf{l} = 0 \quad (9.14)$$

Primjenimo li uvjet konzervativnosti za to statičko električno polje, dobijemo:

$$\int_b^a \mathbf{E}' \cdot d\mathbf{l} + \int_a^b \mathbf{E}_v \cdot d\mathbf{l} = 0 \quad ; \quad \int_b^a \mathbf{E}' \cdot d\mathbf{l} - \int_b^a \mathbf{E}_v \cdot d\mathbf{l} = 0 \quad ; \quad \int_b^a \mathbf{E}' \cdot d\mathbf{l} + u_{ab} = 0 \quad (29.9)$$

odakle slijedi:

$$u_{ab} = -\int_b^a \mathbf{E}' \cdot d\mathbf{l} = \int_b^a \mathbf{E}_i \cdot d\mathbf{l} = \int_b^a (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot d\mathbf{l} \quad (29.10)$$

što je identično (29.5) odnosno (29.8). Primijenimo li krivuljni integral  $\mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}$  po bilo kojoj zatvorenoj krivulji  $c$  na ukupno električno polje kojeg unutar vodiča čine statičko električno polje razdvojenih naboja  $\mathbf{E}'$  i inducirano električno polje  $\mathbf{E}_i$ , a izvan vodiča vanjsko polje  $\mathbf{E}_v$ , dobijemo:

$$\oint_c \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = \int_b^a (\mathbf{E}_i + \mathbf{E}') \cdot d\mathbf{l} + \int_a^b \mathbf{E}_v \cdot d\mathbf{l} = \int_b^a \mathbf{E}_i \cdot d\mathbf{l} + \int_b^a \mathbf{E}' \cdot d\mathbf{l} - \int_b^a \mathbf{E}_v \cdot d\mathbf{l}$$

Zbroj drugog i trećeg integrala prema (29.9) daje nulu, pa je konačno:

$$\oint_c \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = \int_b^a \mathbf{E}_i \cdot d\mathbf{l} = u_i$$

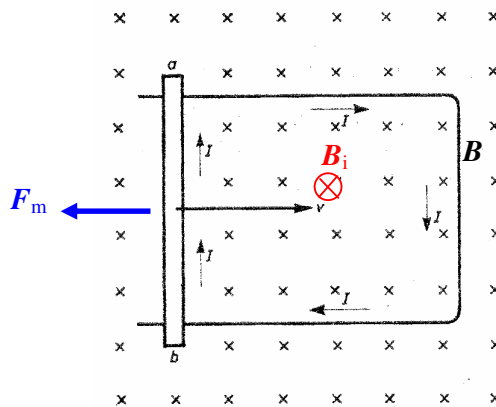
odnosno:

$$u_i = \oint_c \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = \oint_c \mathbf{E}_i \cdot d\mathbf{l} = \oint_c (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot d\mathbf{l} \quad (29.11)$$

jer je inducirano električno polje izvan vodiča jednako nuli.

## 29.2. Polaritet inducirano napona i smjer inducirane struje – Lenzovo pravilo

Uzmimo sada da se vodič giba po vodljivim tračnicama zatvorenim u obliku slova U prema slici 29.4. Inducirani napon u vodiču koji je izvor električne energije uspostaviti će kroz vodljivi krug induciranu struju koja će se u vanjskom dijelu kruga (tračnice) zatvarati od „+“ kraja vodiča prema „–“ kraju vodiča, a kroz vodič (izvor) od „–“ prema „+“ polu izvora.



Slika 29.4. Inducirana struja u vodiču koji se giba u magnetskom polju

Pomakom vodiča u smjeru gibanja, smanjuje se magnetski tok kojeg obuhvaća petlja koju čine vodič i tračnice, jer se smanjuje površina kroz koju magnetski tok prolazi. Inducirana struja stvorit će svoje magnetsko polje indukcije  $\mathbf{B}_i$  koja je usmjerena kao i magnetska indukcija vanjskog magnetskog polja  $\mathbf{B}$ . Ukupna magnetska indukcija će se stoga povećati, čime se nastoji kompenzirati smanjenje magnetskog toka zbog smanjenja površine. Dakle, inducirana struja je takvog smjera da se suprotstavlja promjeni magnetskog toka. Ovo pravilo za induciranu struju naziva se *Lenzovo pravilo*.

Lenzovo pravilo uočavamo i u slijedećem. Naime, kroz vodič koji se giba u magnetskom polju teče struja i stoga na njega djeluje magnetska sila određena sa (17.5):

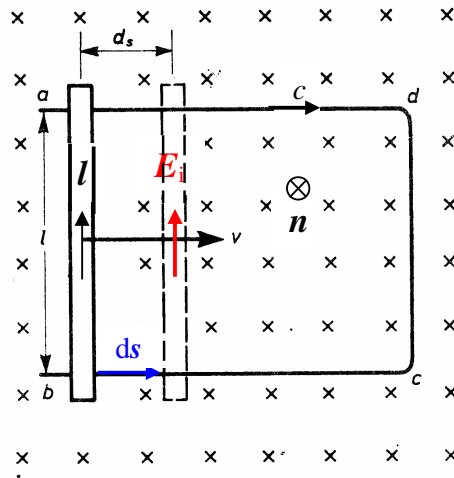
$$\mathbf{F}_m = I(\mathbf{l} \times \mathbf{B}) \quad (17.5)$$

Smjer te sile je suprotan od smjera gibanja vodiča. To znači da je učinak inducirane električne struje takav da se suprotstavlja gibanju vodiča – *Lenzovo pravilo*.

Prikazani sustav na slici 29.4. predstavlja osnovu pretvorbe mehaničke energije u električnu energiju. Potrebno je uložiti mehaničku energiju kako bi se ostvarilo gibanje vodiča a posljedica toga je induciranje napona i struje, tj. generiranje električne energije. Zamislamo da tračnice na kraju nisu zatvorene već da na kraju spajamo trošila. Što je veća struja koju trošila trebaju (veća električna energija trošila), bit će veća kočna magnetska sila (17.5), pa je potrebno uložiti veću mehaničku energiju da bi se gibanje vodiča i proizvodnja električne energije nastavili.

### 29.3. Faradayev zakon elektromagnetske indukcije

Analizirajmo promjenu magnetskog toka koji prolazi kroz zatvorenu površinu koju čine vodič i tračnice pri gibanju vodiča prema slici 29.5.



Slika 29.5. Promjena obuhvaćenog magnetskog toka pri gibanju vodiča

Ako se vodič giba brzinom  $v$ , u diferencijalnom vremenu  $dt$  prijeći će put  $ds$  i doći u crtkani položaj. Prijeđeni put je:  $ds = v \cdot dt$ . Inducirano električno polje je prema (29.1) jakosti:

$$\mathbf{E}_i = \mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad (29.1)$$

Obiđemo li u smjeru kazaljke na satu zatvorenu konturu koju čine vodič i tračnice dobit ćemo prema (29.11) inducirani napon:

$$u_i = \oint_c \mathbf{E}_i \cdot d\mathbf{l} = \oint_c (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot d\mathbf{l} = (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{l} \quad (29.11.a)$$

Obilazak konture u smjeru kazaljke na satu daje normalu  $\mathbf{n}$  na površinu  $S$  petlje (prema pravilu desne ruke) usmjerenu u papir.

Gibanjem vodiča smanjila se površina kroz koju prolazi magnetski tok za diferencijalnu površinu  $dS$ :

$$\mathbf{n} \cdot d\mathbf{S} = \mathbf{l} \times d\mathbf{s} \quad (29.12)$$

To smanjenje magnetskog toka je:

$$d\phi = -\mathbf{B} \cdot \mathbf{n} \cdot dS = -\mathbf{B} \cdot (\mathbf{l} \times d\mathbf{s}) \quad (29.13)$$

Primjenom vektorskog identiteta za mješoviti produkt vektora:

$$\mathbf{A} \cdot (\mathbf{B} \times \mathbf{C}) = \mathbf{B} \cdot (\mathbf{C} \times \mathbf{A})$$

relacija (29.13) prelazi u:

$$d\phi = -\mathbf{l} \cdot (d\mathbf{s} \times \mathbf{B}) = -\mathbf{l} \cdot (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) dt \quad (29.14)$$

odakle slijedi:

$$(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{l} = -\frac{d\phi}{dt} \quad (29.15)$$

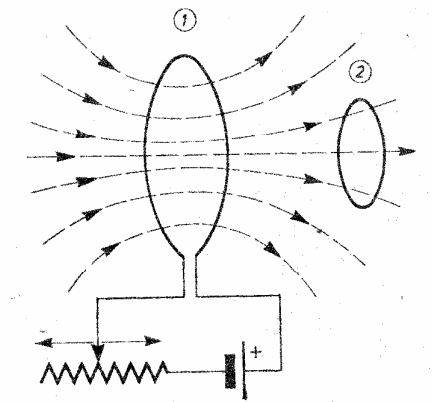
Izjednačavanjem (29.15) s (29.11.a) slijedi:

$$u_{ind} = -\frac{d\phi}{dt} = -\frac{d}{dt} \int_S \mathbf{B} \cdot \mathbf{n} \cdot dS \quad (29.16)$$

Relacija (29.16) ukazuje da inducirani napon nastaje zbog vremenske promjene magnetskog toka. Predznak „-“ u (29.16) ne treba uzimati strogo matematički pri izračunavanju polariteta induciranih napona, već se polaritet određuje primjenom Lenzovog pravila.

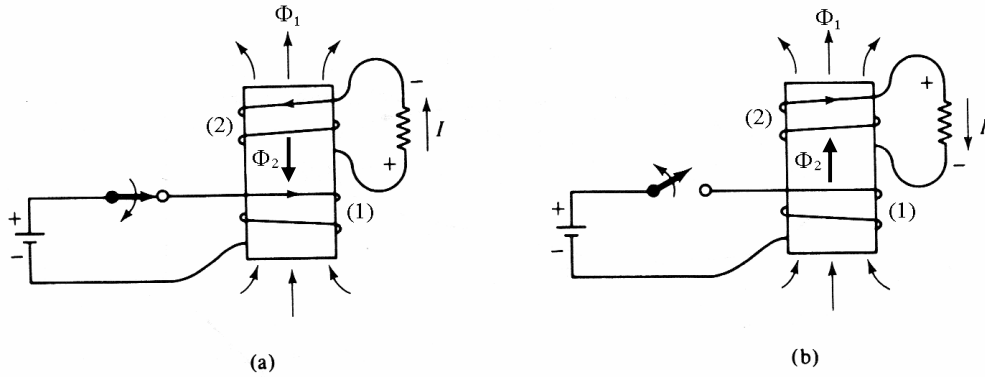
Iz (29.16) vidimo da inducirano napona može nastati i ako nema gibanja vodiča u magnetskom polju, ali postoji vremenska promjena magnetskog toka obuhvaćenog vodljivom petljom. Inducirani napon nastao zbog vremenske promjene obuhvaćenog magnetskog toka nazivamo *napon transformacije*.

Npr. ako imamo dvije vodljive nepomične petlje jednu pokraj druge prema slici 29.6., vremenska promjena struje u petlji „1“ uzrokovat će vremenski promjenjivo magnetsko polje koje dijelom prolazi i kroz petlju „2“. Obuhvaćeni magnetski tok petljom „2“ bit će vremenski promjenjiv, pa će se stoga u petlji „2“ prema (29.16) inducirati napon.



Slika 29.6. Induciranje napona zbog vremenske promjene obuhvaćenog magnetskog toka

Primjena Lenzovog pravila na određivanje polariteta induciranog napona i smjera inducirane struje prikazana je na slici 29.7. na primjeru dvije magnetski spregnute zavojnice.



Slika 29.7. Inducirana struja u magnetski spregnutoj zavojnici „2“

a) kod uspostavljanja struje kroz zavojnicu „1“; b) kod prekida struje kroz zavojnicu „1“

Na slici 29.7.a) prikazano je uspostavljanje struje u zavojnici „1“. Kako struja postupno raste, povećava se magnetski tok kroz jezgru preko koje je magnetski spregnuta zavojnica „2“. Prema Lenzovom pravilu, polaritet induciranog napona i smjer inducirane struje bit će takvi da se suprotstave povećanju magnetskog toka kroz jezgru. Stoga će inducirana struja u zavojnici „2“ biti naznačenog smjera i stvarat će svoj magnetski tok suprotan od rastućeg toka zavojnice „1“. Zavojnica „2“ predstavlja izvor induciranog napona kroz kojeg struja teče od „-“ prema „+“ polaritetu a u vanjskom dijelu strujnog kruga zavojnice „2“ (kroz priključeni otpornik) od „+“ prema „-“ polaritetu. Time je određen polaritet induciranog napona.

Na slici 29.7.b) prikazano je prekidanje struje kroz zavojnicu „1“. Kako se struja postupno smanjuje, smanjuje se magnetski tok kroz jezgru preko koje je magnetski spregnuta zavojnica „2“. Prema Lenzovom pravilu polaritet induciranog napona i smjer inducirane struje bit će takvi da se suprotstave smanjenju magnetskog toka kroz jezgru. Stoga će inducirana struja u zavojnici „2“ biti naznačenog smjera i stvarat će svoj magnetski tok istog smjera kao i opadajući tok zavojnice „1“. Time je određen i polaritet induciranog napona.

Ako se vodljiva petlja giba brzinom  $\mathbf{v}$  u nehomogenom magnetskom polju indukcije  $\mathbf{B}$ , koja se još mijenja u vremenu, totalna derivacija indukcije je:

$$\frac{d\mathbf{B}}{dt} = \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} + \frac{\partial s}{\partial t} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial s} = \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} + v_s \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial s} = \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{B} \quad (29.17)$$

Primjenimo vektorski identitet:

$$\text{rot}(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) = \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) = (\mathbf{B} \cdot \nabla) \mathbf{v} - (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{B} + \mathbf{v}(\nabla \cdot \mathbf{B}) - \mathbf{B}(\nabla \cdot \mathbf{v})$$

u kojem vrijedi:

$$(\mathbf{B} \cdot \nabla) \mathbf{v} = 0 \quad ; \quad \nabla \cdot \mathbf{v} = \text{div } \mathbf{v} = 0$$

te uz uvažavanje Gaussovog zakona (19.2)  $\text{div } \mathbf{B} = 0$ , relacija (29.17) prelazi u:

$$\frac{d\mathbf{B}}{dt} = \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} - \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (29.18)$$

Inducirani napon prema (29.16) je:

$$u_{ind} = -\frac{d}{dt} \int_S \mathbf{B} \cdot \mathbf{n} \cdot dS = -\int_S \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot \mathbf{n} \cdot dS + \int_S \text{rot}(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{n} \cdot dS \quad (29.19)$$

Primjenimo li na drugi integral iz (29.19) Stokesov teorem:

$$\int_S \text{rot} \mathbf{F} \cdot \mathbf{n} \cdot dS = \oint_c \mathbf{F} \cdot d\mathbf{l}$$

gdje je  $c$  kontura koja obrubljuje površinu  $S$ , a  $d\mathbf{l}$  je element konture, dobije se:

$$u_{ind} = -\int_S \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot \mathbf{n} \cdot dS + \oint_c (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot d\mathbf{l} \quad (29.20)$$

Ukupni inducirani napon također se može izraziti preko totalne promjene magnetskog toka:

$$u_{ind} = -\frac{d\phi}{dt} = -\frac{\partial \phi}{\partial t} - \frac{\partial \phi}{\partial t} \frac{\partial s}{\partial s} = -\frac{\partial \phi}{\partial t} - v_s \frac{\partial \phi}{\partial s} = -\frac{\partial \phi}{\partial t} - (\mathbf{v} \cdot \nabla) \phi = -\frac{\partial \phi}{\partial t} - \mathbf{v} \cdot \text{grad} \phi \quad (29.21)$$

U relacijama (29.20) i (29.21) prvi pribojnik na desnoj strani predstavljaju inducirani napon uslijed vremenske promjene obuhvaćenog magnetskog toka (napon transformacije) a drugi pribojnik predstavljaju inducirani napon uslijed gibanja vodiča u magnetskom polju (napon gibanja).

#### 29.4. Inducirani napon uslijed samoindukcije i međuindukcije

Vremenski promjenjiv magnetski tok proizveden vremenski promjenjivom strujom  $i$  u strujnom krugu i obuhvaćen istim tim strujnim krugom  $\psi$ , prema (26.3) možemo izraziti preko induktiviteta  $L$ :

$$L = \frac{\psi}{i} \Rightarrow \psi = L \cdot i \quad (26.3.a)$$

Inducirani napon prema (29.16) je:

$$u_{ind} = -\frac{d\psi}{dt} = -\frac{d}{dt}(L \cdot i) = -L \frac{di}{dt} \quad (29.22)$$

Vremenski promjenjiv magnetski tok proizveden vremenski promjenjivom strujom  $i_1$  u strujnom krugu „1“ i obuhvaćen strujnim krugom „2“  $\psi_{21}$ , prema (26.9) možemo izraziti preko međuinduktiviteta  $M_{21} = M$ :



$$M_{21} = \frac{\psi_{21}}{I_1} \Rightarrow \psi_{21} = M \cdot i_1 \quad (26.9.a)$$

Inducirani napon u strujnom krugu „2“ prema (29.16) je:

$$u_{ind2} = -\frac{d\psi_{21}}{dt} = -\frac{d}{dt}(M \cdot i_1) = -M \frac{di_1}{dt} \quad (29.23)$$

### 29.5. Diferencijalni oblik Faradayevog zakona

Primjenimo na izraz za inducirani napon (29.16):

$$u_{ind} = \oint_c \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \mathbf{B} \cdot \mathbf{n} \cdot dS \quad (29.16)$$

Stokesov teorem:

$$\int_S \text{rot } \mathbf{F} \cdot \mathbf{n} \cdot dS = \oint_c \mathbf{F} \cdot d\mathbf{l}$$

gdje je  $c$  kontura koja obrubljuje površinu  $S$ , a  $d\mathbf{l}$  je element konture. Dobije se:

$$\int_S \text{rot } \mathbf{E} \cdot \mathbf{n} \cdot dS = -\frac{d}{dt} \int_S \mathbf{B} \cdot \mathbf{n} \cdot dS \quad (29.24)$$

Iz (29.24) slijedi diferencijalni oblik Faradayevog zakona elektromagnetske indukcije:

$$\nabla \times \mathbf{E} = \text{rot } \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (29.25)$$

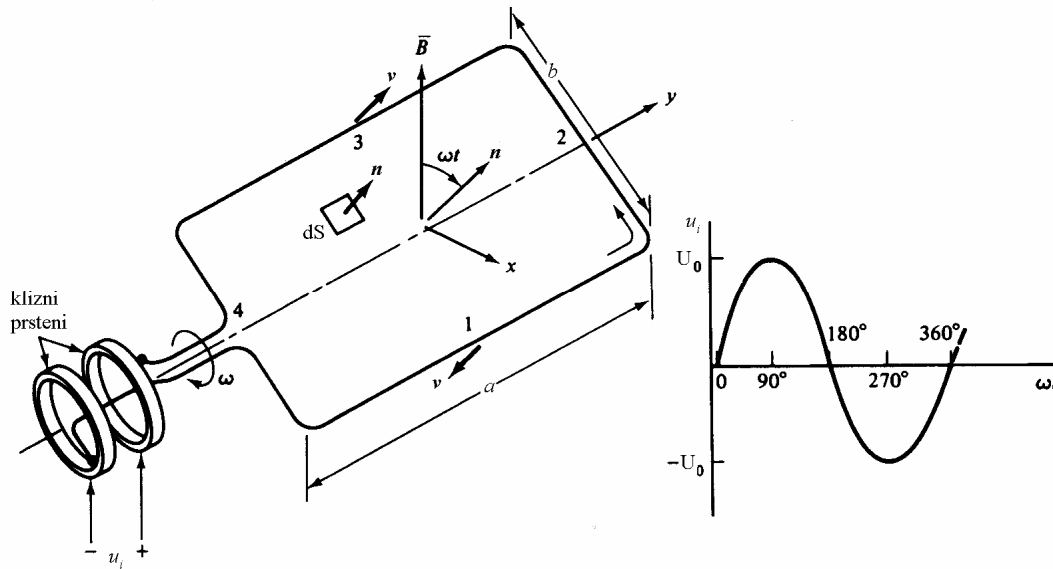
### 29.6. Inducirani napon u rotirajućoj vodljivoj petlji

Mehanička se energija najlakše pretvara u električnu energiju uz pomoć rotirajućeg sustava prikazanog na slici 29.8. Vodljivi zavoj površine  $S$  rotira oko svoje osi u homogenom magnetskom polju indukcije  $\mathbf{B}$ . Krajevi zavoja spojeni su na vodljive klizne prstenove koji rotiraju zajedno sa zavojem, a kontakt s vanjskim strujnim krugom ostvaruje se preko četkica koje klize po prstenovima. U nekom trenutku prikazanom na slici kut između normale na zavoj  $\mathbf{n}$  i magnetske indukcije  $\mathbf{B}$  je  $\alpha = \omega t$ . Magnetski tok kroz zavoj je:

$$\phi = \int_S \mathbf{B} \cdot \mathbf{n} \cdot dS = \mathbf{B} \cdot \mathbf{n} \cdot S = B \cdot S \cdot \cos(\alpha) = B \cdot S \cdot \cos(\omega t) \quad (29.26)$$

Iznos induciranog napona prema (29.16) je:

$$|u_i| = \left| -\frac{d\phi}{dt} \right| = B \cdot S \cdot \omega \cdot \sin(\omega t) \quad (29.27)$$



Slika 29.8. Induciranje napona u rotirajućem zavoju

Ako umjesto jednog zavoja imamo namot s  $N$  zavoja spojenih u seriju, inducirani napon će biti:

$$u_i = N \cdot B \cdot S \cdot \omega \cdot \sin(\omega t) \quad (29.28)$$

Dakle, u takvom namotu inducira se napon sinusno promjenjiv u vremenu.

Polaritet inducirano napona određen primjenom Lenzovog zakona prikazan je na slici 29.8. U trenutku  $t = 0$ , smjer normale na zavoj i smjer magnetske indukcije se podudaraju. Rotacijom zavoja magnetski tok kroz zavoj se smanjuje pa je smjer inducirane struje takav da svojim magnetskim poljem podržava smanjujući magnetski tok. Kad se promjeni smjer magnetskog polja kroz zavoj (nakon prijeđenog kuta  $\alpha = \pi$ ) promijenit će se smjer inducirane struje i polaritet inducirano napona.

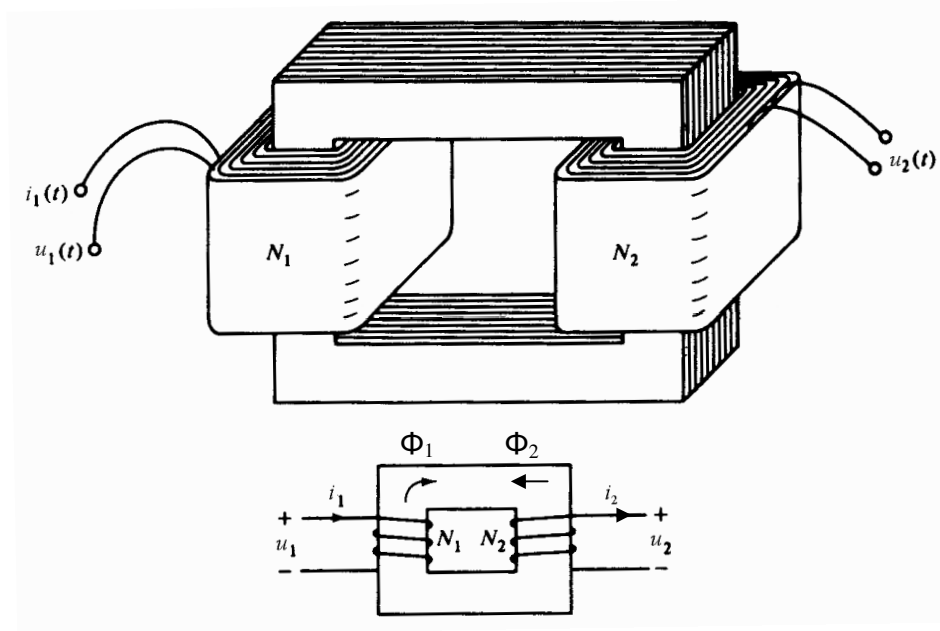
### 29.7. Načelo rada transformatora

Tipični transformator prikazan je na slici 29.9. Transformator se sastoji od dva namota: *primarnog* s  $N_1$  zavoja i *sekundarnog* s  $N_2$  zavoja namotanih na zajedničku jezgru načinjenu od feromagnetskih limova. Ako kroz primarni namot teče vremenski promjenjiva struja  $i_{1m}$ , a stezaljke sekundarnog namota su otvorene, primarna struja će stvoriti vremenski promjenjivi magnetski tok kroz jezgru  $\Phi_m$ . Struja  $i_{1m}$  se naziva *struja magnetiziranja*. Taj magnetski tok obuhvaćen je zavojima primarnog i sekundarnog namota, pa će u njima inducirati napone prema (29.16):

$$u_1 = N_1 \frac{d\phi_m}{dt} \quad ; \quad u_2 = N_2 \frac{d\phi_m}{dt} \quad (29.29)$$

Napon  $u_1$  je inducirani napon primarnog namota koji je u ravnoteži s narinutim naponom izvora koji daje struju magnetiziranja  $i_{1m}$ . Napon  $u_2$  je napon otvorenih stezaljki sekundarnog namota. Omjer napona jednak je omjeru broja zavoja namota:

$$\frac{u_1}{u_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad ; \quad u_2 = u_1 \frac{N_2}{N_1} \quad (29.30)$$



Slika 29.9. Transformator

Ako zatvorimo strujni krug sekundara tako da na stezaljke spojimo npr. otpornik, kroz sekundarni namot će poteći struja  $i_2$  čiji smjer je po Lenzovom zakonu takav da stvara svoj magnetski tok suprotstavljen primarnom magnetskom toku. Da bi se očuvao magnetski tok u jezgri, mora iz izvora poteći dodatna struja  $i_1$  takvog iznosa kojim će se poništiti magnetski tok sekundarne struje  $i_2$ , tj. mora biti:

$$N_1 \cdot i_1 = N_2 \cdot i_2 \quad \Rightarrow \quad \frac{i_1}{i_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad ; \quad i_2 = i_1 \frac{N_1}{N_2} \quad (29.31)$$

Omjer struja obrnuto je srazmjeran omjeru broja zavoja namota. Transformator služi da električnu energiju jednih parametara ( $u_1$ ,  $i_1$ ) transformiramo u električnu energiju drugih parametara ( $u_2$ ,  $i_2$ ).

Ukupna struja kroz primarni namot bit će:

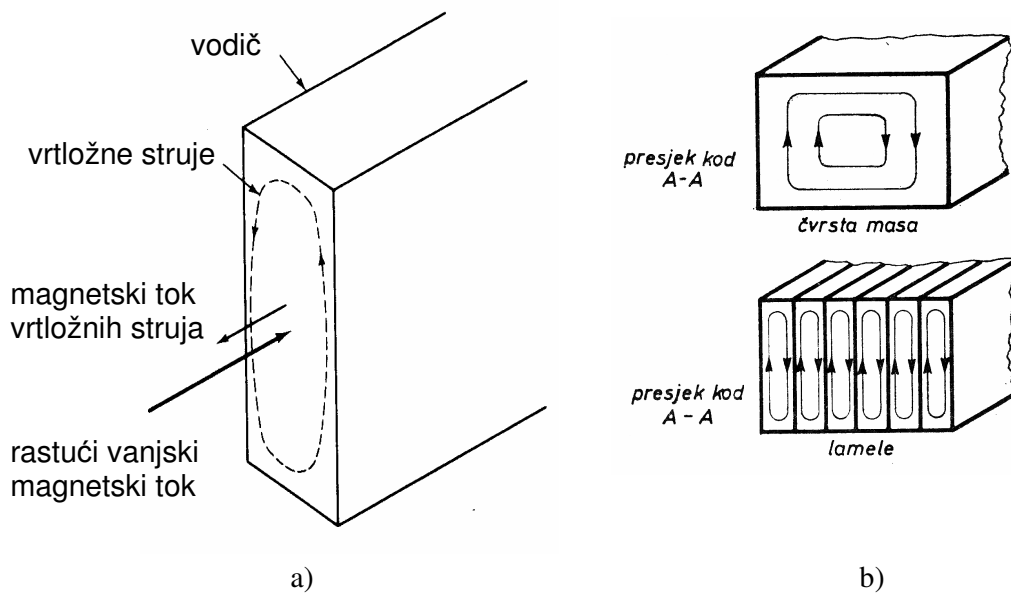
$$i_1 = i_{1m} + \left( \frac{N_2}{N_1} \right) i_2 \quad (29.32)$$

Zanemarimo li struju magnetiziranja i gubitke koji nastaju u transformatoru (toplinske gubitke u vodičima namota, gubitke usljed histereze), transformatorom se prenosi ista električna snaga:

$$p_2 = u_2 \cdot i_2 = u_1 \frac{N_2}{N_1} i_1 \frac{N_1}{N_2} = u_1 \cdot i_1 = p_1 \quad (29.33)$$

### 29.8. Vrtložne struje

U masivnom vodljivom materijalu koji se nalazi u promjenjivom magnetskom polju nastaju kružne inducirane struje koje nazivamo *vrtložnim strujama*, slika 29.10.



Slika 29.10. Vrtložne struje

Na slici 29.10.a) prikazan je masivni vodljivi materijal kroz koji prolazi magnetski tok  $\Phi$ . Ako taj tok u vremenu raste, u vodljivom materijalu će se, prema Lenzovom pravilu, inducirati kružne vrtložne struje koje će stvoriti vlastiti magnetski tok  $\Phi_v$ , suprotnog smjera od rastućeg magnetskog toka  $\Phi$ . Time će se reducirati magnetski tok kroz materijal a osim toga tok vrtložnih struja u vodljivom materijalu uzrokovat će dodatne toplinske gubitke. Suzbijanje nastanka vrtložnih struja sprovodi se tako da se vodljivi dijelovi ne izvedu kao masivni, već se izrađuju kao izolirane metalne lamele, slika 29.10.b). Time se povećava ukupni otpor, zbog povećane ukupne duljine toka vrtložnih struja.