

Elektromagnetska indukcija

Povijesni pregled

-1831. Michael Faraday (Engleska) i Joseph Henry (SAD) → promjena magnetskog polja može inducirati ems.

- Faradayev zakon indukcije: promjena magnetskog toka inducira ems (struju)
- Lentzovo pravilo
- Maxwellove jednadžbe

Faradayev zakon indukcije

Oersted → Pokazao da el. struja stvara mag. polje.

Vrijedi li obrnuto? Da li magneti stvaraju el. struju?

Pokusi:

- Oko magneta se stave zavoji bakrene žice. → Nema struje.
- Umjesto magneta uzmemmo zavojnicu kroz koju teče struja (elektromagnet). → Nema struje.

Ne vrijedi obrat?

Faraday → Bitan korak:

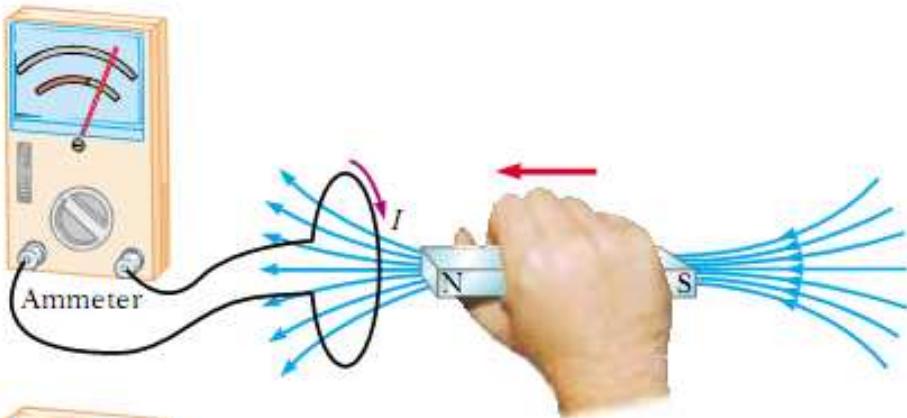
→ ***Moramo "pomicati" magnet (mijenjati struju kroz zavojnicu)!***

Promjenjivi magnetski tok kroz neki vodič stvara induciranu elektromotornu silu na njegovim krajevima. ← tzv.

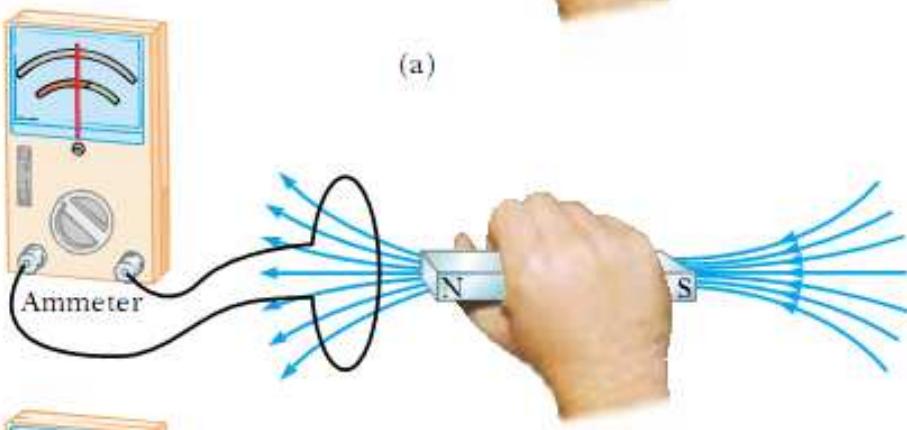
ELEKTROMAGNETSKA INDUKCIJA

Elektromag. indukcija → Jeden od najvažnijih načina dobivanja el. struje

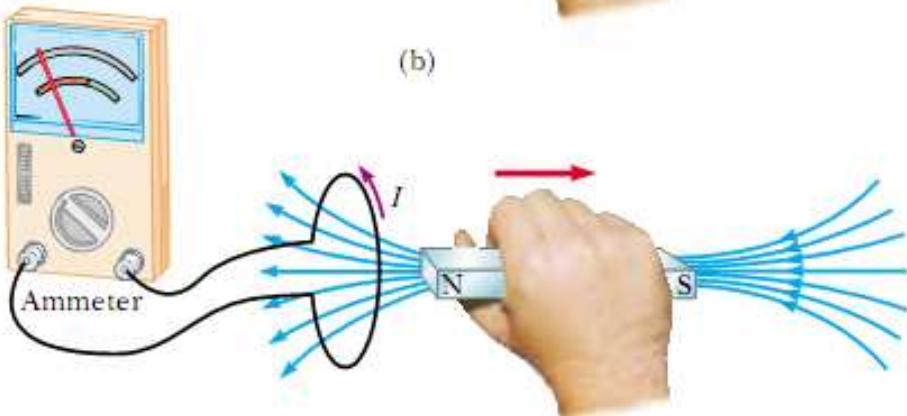
Pokus 1: gibanje/mirovanje magneta u odnosu na strujnu petlju.



Inducira se ems.

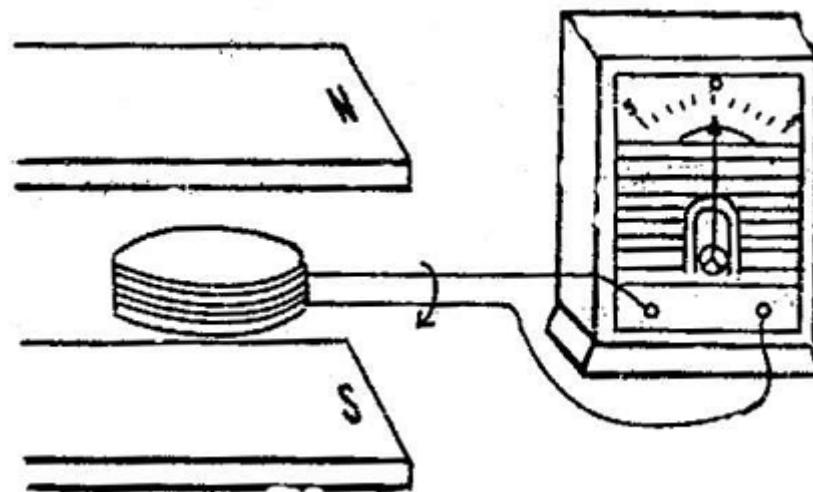


Ne inducira se ems.



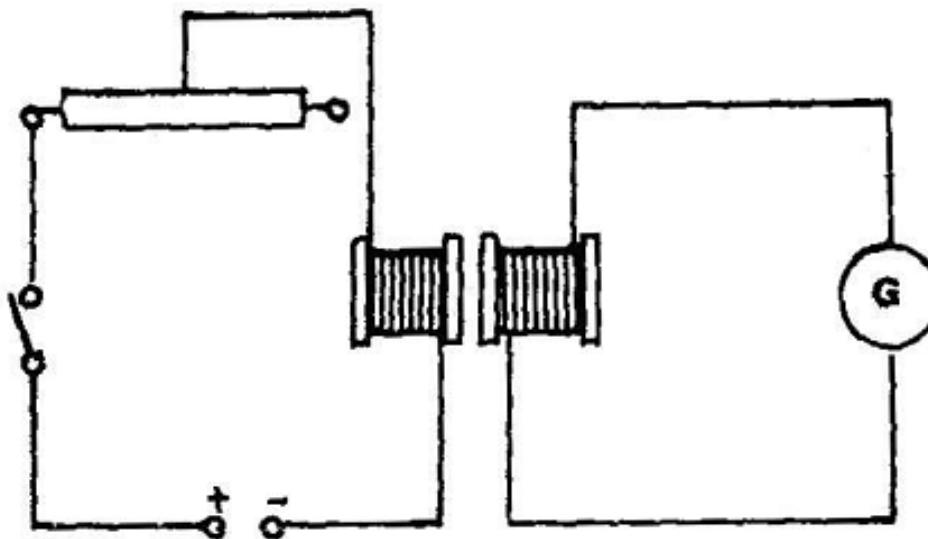
Inducira se ems.

Pokus 2: gibanje/mirovanje strujne petlje u odnosu na magnet.



Induciranje ems ukoliko se petlja giba – ukoliko postoji promjena toka magnetskog polja kroz petlju.

Pokus 3: promjena jakosti struje.



Promjena jakosti struje → induciranje ems – ukoliko postoji promjena toka magnetskog polja kroz petlju/zavojnicu.

Rezultat:

Postoji struja iako nema nikakve baterije u strujnom krugu!

Takvu struju nazivamo induciranoj, a stvara ju inducirana ems.

Zaključci:

- Inducirana EMS se javlja kada postoji promjena mag. toka.
- Veći broj namotaja → Veća EMS.
- Brža promjena toka → Veća EMS.

Promjena mag. toka?

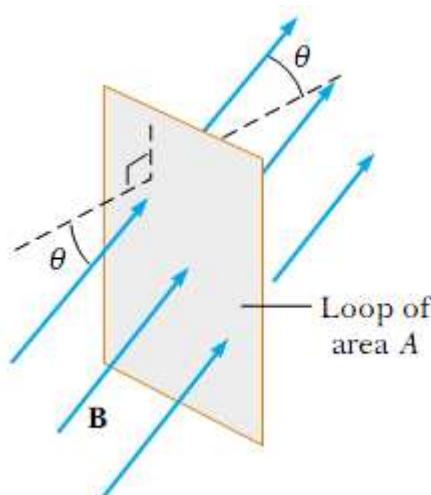
- Gibanjem vodiča u mag. polju.
- Gibanjem magneta s obzirom na vodič.
- Rotacijom zavojnice.
- Promjenom struje kroz zavojnicu. ...

Faradayev zakon indukcije

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

Inducirana ems u krugu proporcionalna je negativnoj promjeni toka magnetskog polja kroz krug.

$$\Phi_B = \oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} \quad \text{-tok mag. polja kroz krug}$$



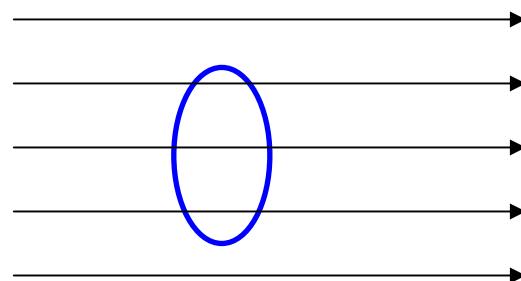
$$\mathcal{E} = -\frac{d}{dt} (BA \cos \theta)$$

Indukcija → vremenska promjena:
-iznos **B**
-površina **A**
-kut **θ** se mijenja u vremenu
-bilo koja kombinacija prethodnog

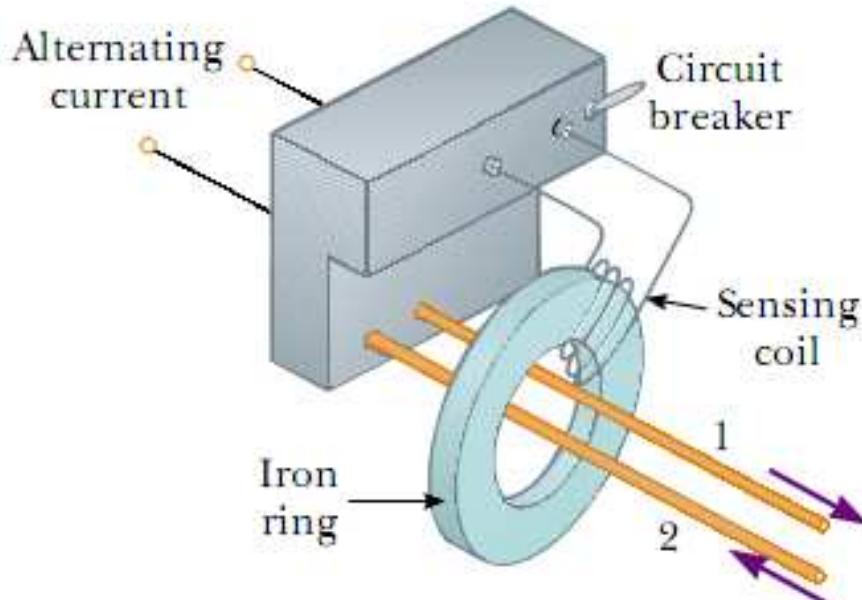
Primjer:

Kružna žičana petlja nalazi se u homogenom magnetskom polju postavljena okomito na smjer polja. U kojoj situaciji neće doći do induciranja ems:

- a) ako stisnemo petlju,
- b) ako rotiramo petlju oko osi okomite na smjer polja,
- c) ako ne mijenjamo orientaciju petlje, ali je pomicemo duž smjera polja.
- d) ako petlju izvučemo iz polja.



Primjena: Sigurnosni prekidač.



-uređaj se sastoji od željeznog prstena, koji obuhvaća ulaznu i izlaznu struju, oko kojeg je namotana zavojnica

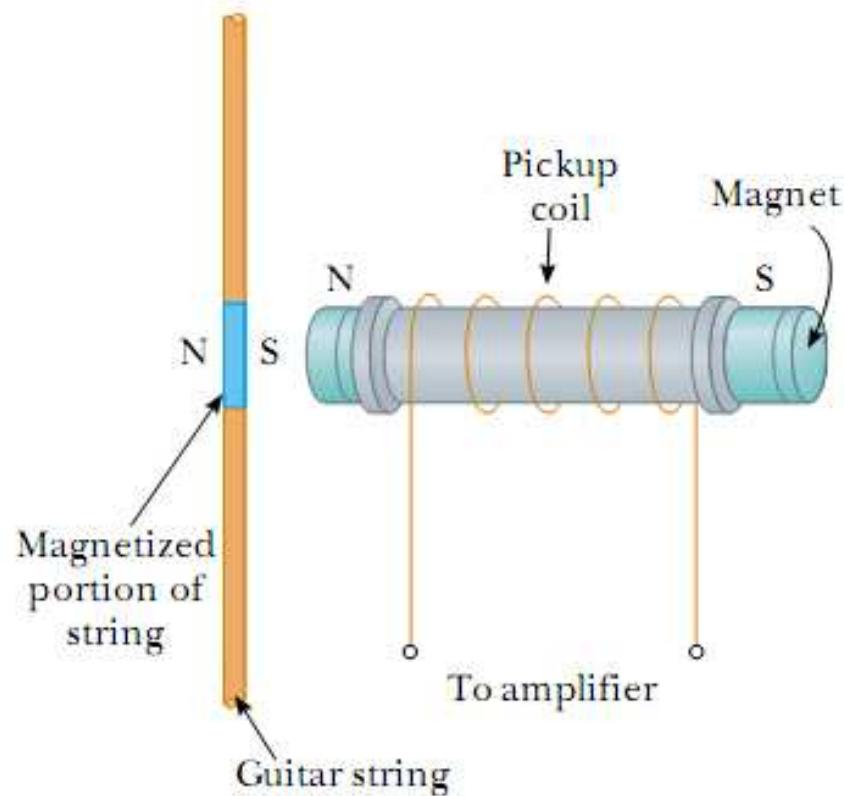
-dok su struje kroz vodiče 1 i 2 jednake, nema promjene toka magnetskog polja kroz zavojnicu (Amperov zakon)

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = 0$$

-ako se struja u povratnom vodu promjeni (zbog vlage prisutne u priključenom uređaju, dio struje se uzemlji), dolazi do promjene toka magnetskog polja kroz zavojnicu, inducira se ems. i uzrokuje izbijanje osigurača

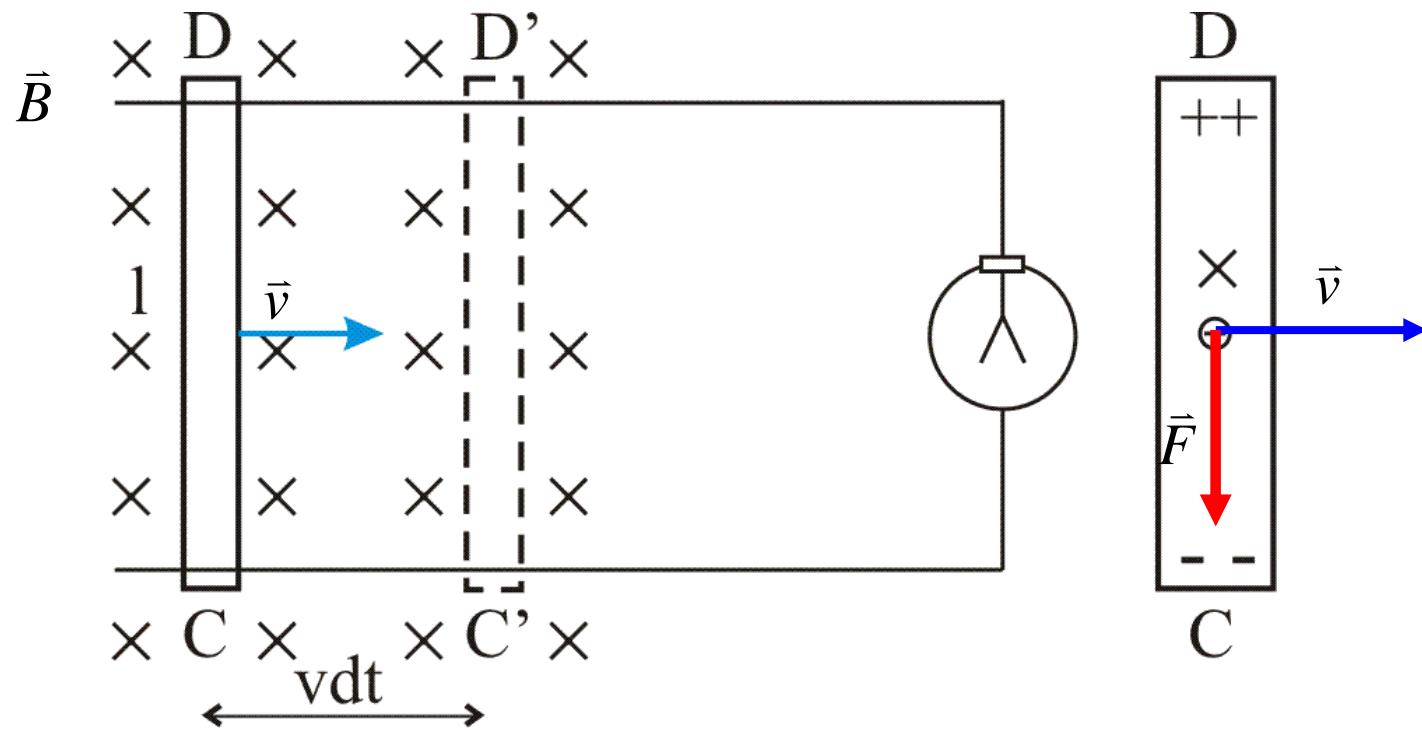
-time se prekida strujni krug i sprečava opasna situacija da velika struja prođe kroz strujni krug (fen, aparat za brijanje u kupaoni)

Primjena: Električna gitara.



Elektromagnetska indukcija – Faradayev zakon indukcije

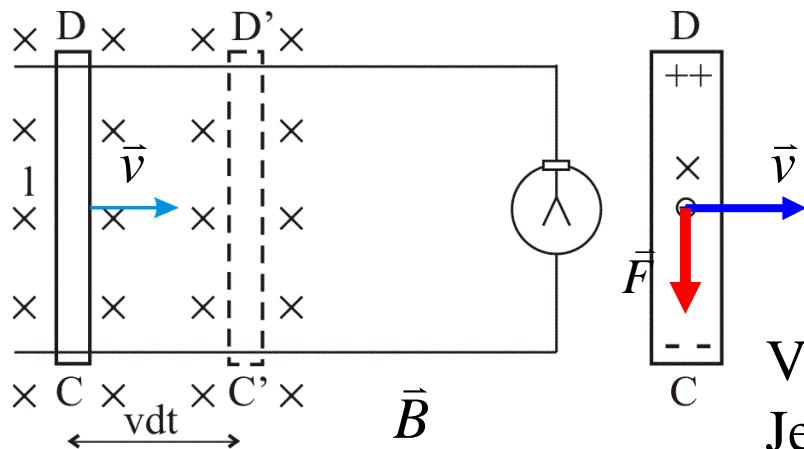
Promatramo kratki metalni vodič duljine l koji klizi jednolikom brzinom v (okomito na mag. polje indukcije \vec{B}) preko dviju usporednih metalnih tračnica.



Gibanje vodiča. → Slobodni elektroni u vodiču. → Lorentzova sila

$$\vec{F} = -e\vec{v} \times \vec{B}$$

Rezultat: Elektroni (protoni) "potjerani" na jedan kraj vodiča.



$$\vec{F} = -e\vec{v} \times \vec{B}$$

Rezultat: Elektroni (protoni)
"potjerani" na jedan kraj vodiča.

Vodič se električki polarizira:

Jedan kraj postaje pozitivan, a drugi negativan.
Javlja se električna sila $F_e = qE$ koja
uravnotežava Lorentzovu silu

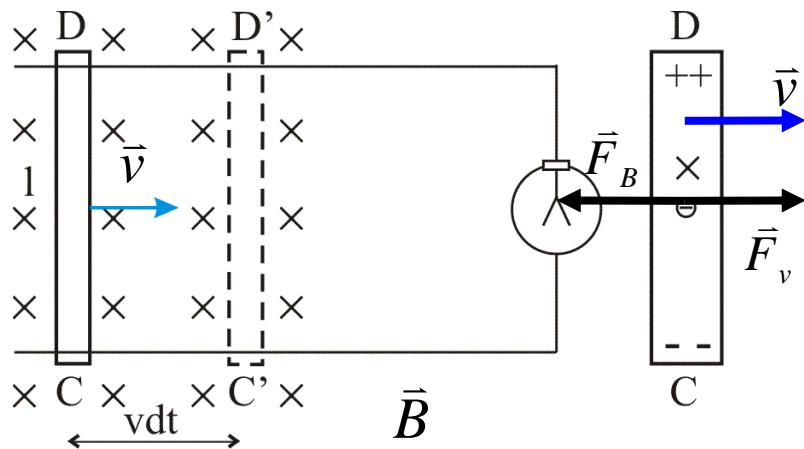
$$qE = qvB \longrightarrow E = vB$$

Ako su krajevi vodiča spojeni \rightarrow Teče el. struja jakosti I.

Vanjske sile. \rightarrow Utroše rad za gibanje vodiča.

Taj utrošeni rad (za gibanje vodiča) je izvor za stvaranje inducirane elektromotorne sile.

Rezultat: Pretvorena mehanička energija u električnu.



Vanjske sile F_v .
 → Utroše rad za gibanje vodiča.

Koliki je taj rad?

Sila na vodič u gibanju unutar mag. polja indukcije B: $\vec{F}_B = I\vec{l} \times \vec{B}$

Smjer sile? "U lijevo", suprotno od smjera gibanja.

$$\vec{l} \perp \vec{B} \Rightarrow F_B = BIl$$

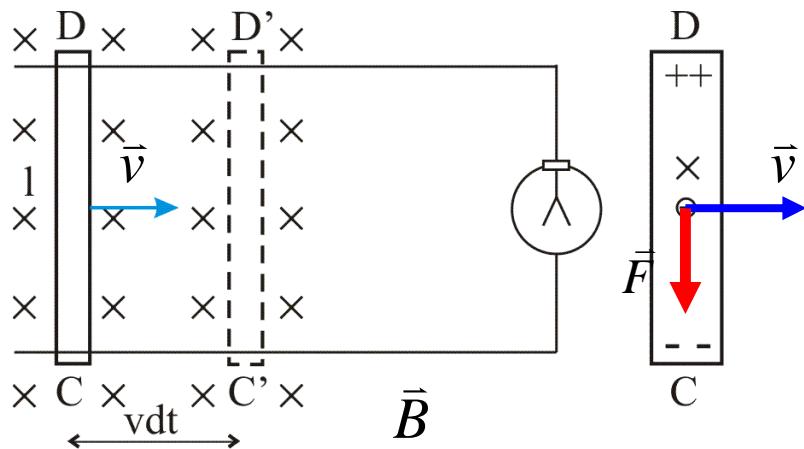
Put što ga prijeđe vodič? $s = vdt$

Rad = sila na putu. $\rightarrow dW = Fds \Rightarrow dW = BIlvdt$

$$\Rightarrow dW = BlvdQ$$

$$I = \frac{dQ}{dt}$$

Elektromotorna sila (napon) = rad po jediničnom naboju: $\mathcal{E} = \frac{dW}{dQ} = Blv$



$$\mathcal{E} = Blv$$

Ako smjer gibanja vodiča i smjer mag. indukcije zatvaraju neki kut $\theta \rightarrow$

$$\mathcal{E} = Blv \sin \vartheta$$

Gibanjem vodiča mijenja se površina S koju pravokutnik (**CD** – galvanometar) (petlja) obuhvaća u mag. polju indukcije B :

Put što ga prijeđe vodič? $ds = vdt$

Promjena površine. $\rightarrow dS = lds$

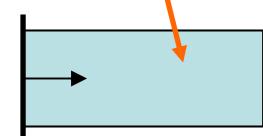
Sjetimo se veze mag. indukcije i toka: $d\Phi = -BdS$

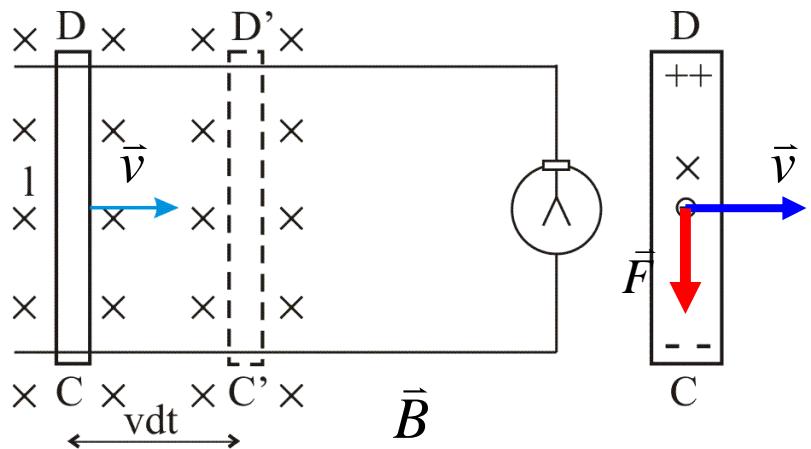
Promjena magnetskog toka: $d\Phi = -Blds \Rightarrow d\Phi = -Blvdt \mid : dt$

$$\Rightarrow \frac{d\Phi}{dt} = -Blv$$

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi}{dt}$$

Površina se smanjila.





$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi}{dt}$$

Inducirana elektromotorna sila u krugu numerički je jednaka negativnoj brzini promjene toka kroz krug.

Bitno: **PROMJENA TOKA MAGNETSKOG POLJA.**

Fizikalno?

Magnetsko polje sadržava određenu energiju. Inducirana EMS je posljedica pretvaranja te energije u energiju el. polja.

Što je s gibanjem? Da li je ono neophodno?

NE!!! Bitna je **PROMJENA TOKA MAGNETSKOG POLJA.**

Primjer indukcije kada nema nikakvog gibanja:

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi}{dt}$$

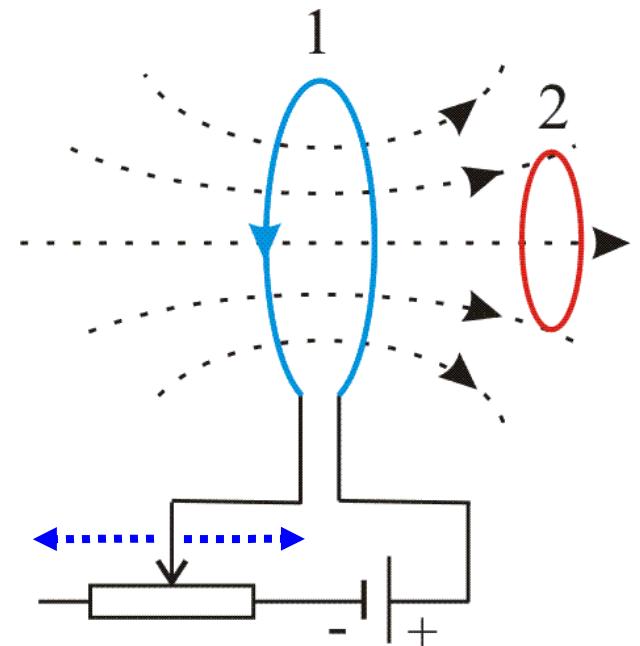
Mijenjamo struju (potenciometar) kroz petlju 1.

Mijenja se i polje mag. indukcije koje stvara ta petlja (1).

Jedan dio toka polja mag. indukcije prolazi petljom 2.

Zaključak: Mijenjajući struju petljom 1 \rightarrow Mijenja se tok polja kroz petlju 2. \rightarrow Inducirana EMS u petlji 2.

Zaključak 2: I bez gibanja možemo dobiti inducirani EMS.



Općenito: $\mathcal{E} = -\frac{d\Phi}{dt}$ $\Phi = \int \bar{B} d\bar{S} = \int B \cdot \cos \varphi \cdot dS$

φ = Kut između smjera indukcije \mathbf{B} i okomice na element površine $d\mathbf{S}$.

Od prije: napon (ind ems)= rad po jedinici naboja, tj: $\mathcal{E} = \oint_K \bar{E} d\bar{s}$

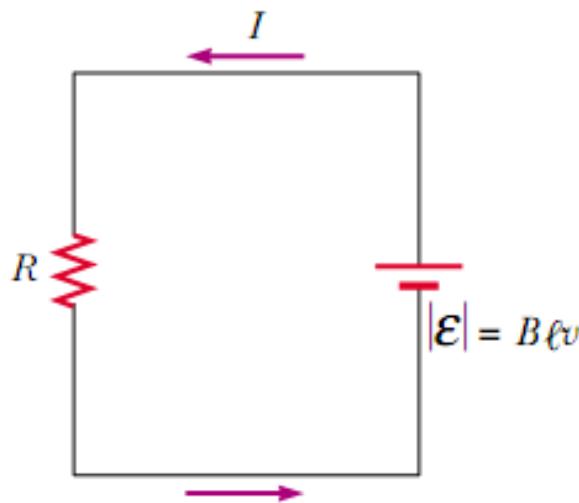
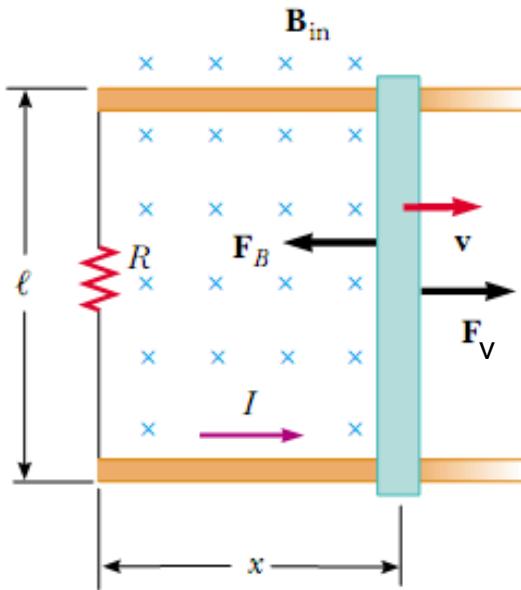
Opći oblik Faradayeva zakona.

$$\boxed{\mathcal{E} = \oint_K \bar{E} d\bar{s} = -\frac{d\Phi}{dt}} = -\frac{d}{dt} \int \bar{B} d\bar{S} = -\frac{d}{dt} \int B \cdot \cos \varphi \cdot dS$$

DIREKTNA VEZA ELEKTRIČNOG I MAGNETSKOG POLJA.

Primjene elektromagnetske indukcije:
generatori, transformatori, induktori, mikrofon, betatron itd.

Primjer:



- neka metalni štap duljine ℓ klizi po vodljivim tračnicama
- neka je ukupni otpor toga kruga $= R$
- mag. tok kroz petlju je $\Phi_B = B\ell x$

-inducirana ems je:

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi_B}{dt} = -\frac{d}{dt}(B\ell x) = -B\ell \frac{dx}{dt}$$

$$\mathcal{E} = -B\ell v$$

-inducirana struja je: $I = \frac{|\mathcal{E}|}{R} = \frac{B\ell v}{R}$

-ali, u krugu nema baterije – odakle onda struja i energija predana krugu?

→ od vanjske sile koja vrši rad $dW = F_v ds$

-snaga predana krugu je:

$$\mathcal{P} = F_v v = (I\ell B)v = \frac{B^2 \ell^2 v^2}{R} = \frac{\mathcal{E}^2}{R}$$

Lenzovo pravilo

Heinrich Lenz (1804 -1865), njemački fizičar, radio u carskoj Rusiji

Pronašao pravilo za određivanje smjera inducirane EMS.

Inducirana EMS ima uvijek smjer suprotan uzroku koji ju je stvorio.

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi}{dt} \quad \rightarrow \quad I = \frac{\mathcal{E}}{R} = -\frac{1}{R} \frac{d\Phi}{dt}$$

Inducirana struja nastoji spriječiti promjenu mag. toka.

Inducirana el. struja u nekoj petlji ima takav smjer da proizvodi magnetsko polje koje se suprostavlja promjeni magnetskog toka kroz plohu zatvorenu tom petljom.

Kada se tok kroz petlju smanjuje ($d\Phi < 0$), ind. struja vlastitim tokom nastoji povećati tok; kada se tok povećava, inducira se takva struja koja svojim mag. učinkom nastoji smanjiti taj tok.

Ako je induc. EMS nastala zbog gibanja vodiča, inducirana EMS će u tom vodiču dati struju takvog smjera da će sila vanjskog polja na vodič djelovati u smjeru suprotnom gibanju.

Inducirana el. struja ima takav smjer da proizvodi magnetski tok koji se suprostavlja promjeni toka zbog kojega je nastala.

Lenzovo pravilo – Posljedica zakona sačuvanja energije

Rad koji ulažemo kad npr. mičemo vodič u mag. polju, pretvara se u električnu energiju.

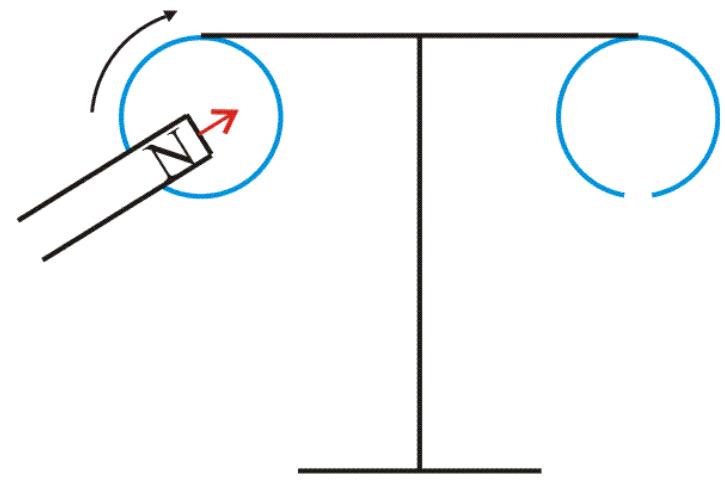
Da ne vrijedi Lenzovo pravilo, inducirana struja stalno bi rasla. → perpetuum mobile (ne bi vrijedio zakon sač. energije)

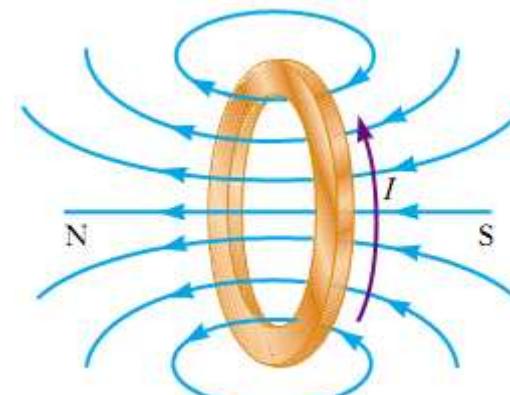
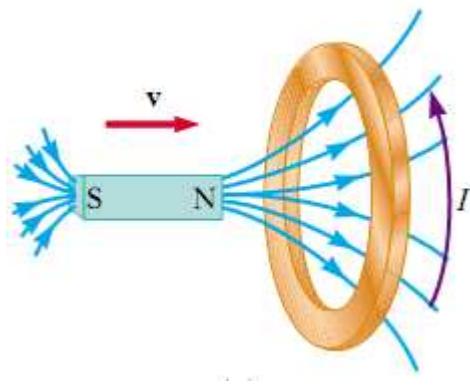
Demonstracija Lenzovog pravila:

U zatvoreni aluminijski prsten uvlačimo magnet → Prsten se protivi i nastoji se izmaknuti.

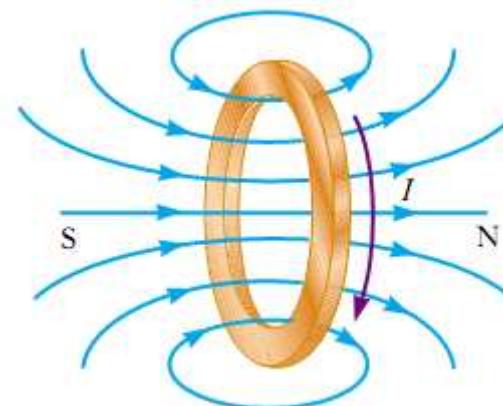
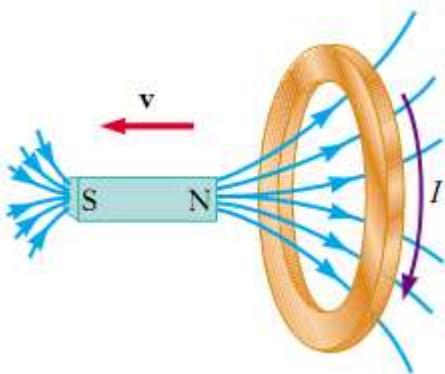
U zatvorenom aluminijskom prstenu izvlačimo magnet → Prsten se protivi i nastoji slijediti magnet.

Ako prsten nije zatvoren → Ništa se ne događa (Jer struja ne može teći).





Gibanje magneta udesno povećava mag. tok kroz prsten → Inducirana struja u prstenu nastoji svojim mag. poljem održati mag. tok konstantnim, tj. suprotstavlja se promjeni toka kroz prsten; zato je smjer struje takav da je njeni mag. polje orijentirano suprotno polju magneta

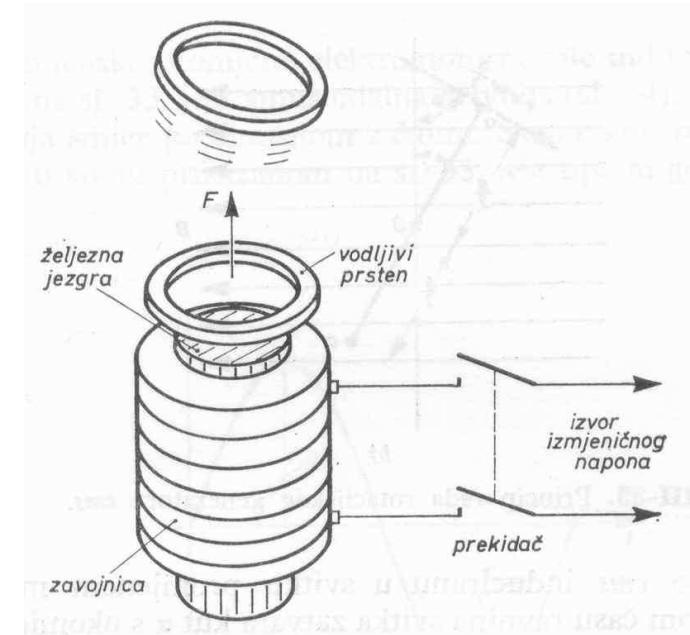


Gibanje magneta ulijevo smanjuje mag. tok kroz prsten → Inducirana struja u prstenu nastoji svojim mag. poljem održati mag. tok konstantnim, tj. suprotstavlja se promjeni toka kroz prsten; zato je smjer struje takav da je njeni mag. polje orijentirano u istom smjeru kao i polje magneta

Demonstracija Lenzovog pravila 2:

Aluminijski prsten se postavi na elektromagnet.

Pustimo izmj. struju kroz elektromagnet.
→ Prsten odskoči.



Zašto odskoči? Struja stvara promjenjivo polje koje stvara induciranu struju u prstenu koja se protivi uzroku koji ju je stvorio.

Npr., ako je struja u elektromagnetu takva da je sjeverni pol gore, inducirane struje u prstenu stvaraju sjeverni pol na donjem dijelu prstena i dolazi do odbijanja (istoimeni polovi).

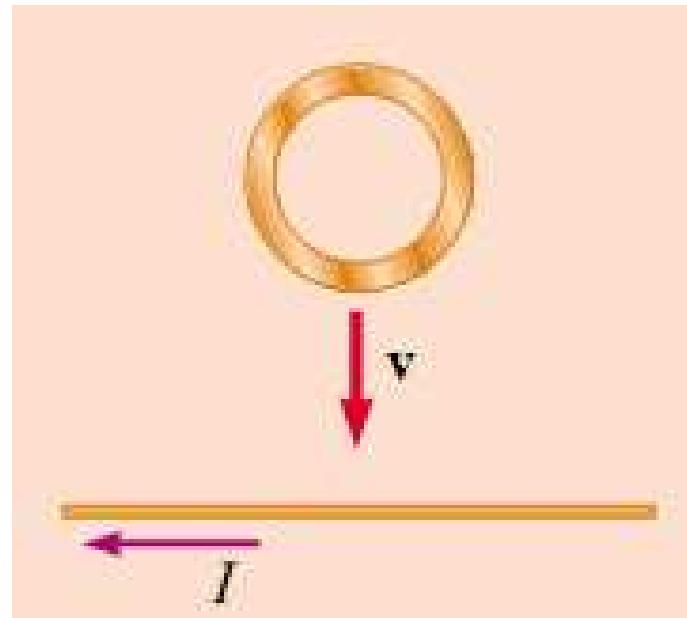
Ako prsten nije zatvoren → Ništa se ne događa (Jer struja ne može teći).

Zadatak 1:

Prsten pada u magnetskom polju ravnog vodiča kao što je prikazano na slici.

Koji je smjer inducirane struje u prstenu?

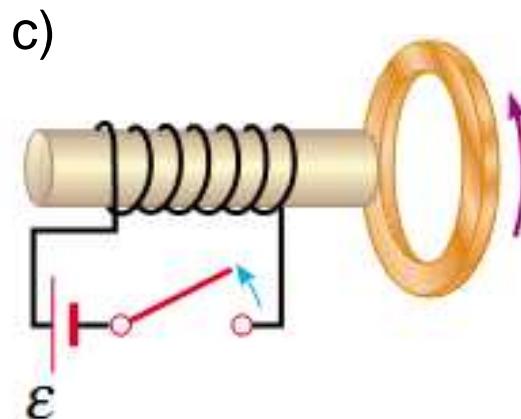
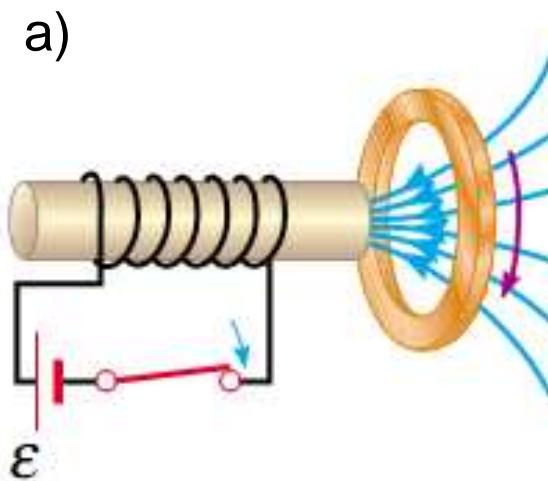
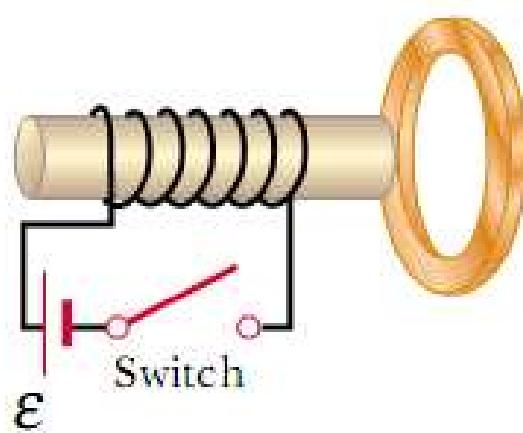
- a) u smjeru kazaljke na satu
- b) suprotno od smjera kazaljke na satu
- c) nula
- d) ne može se odrediti



Zadatak 2:

Metalni prsten nalazi se blizu zavojnice. Nađi smjer inducirane struje u prstenu:

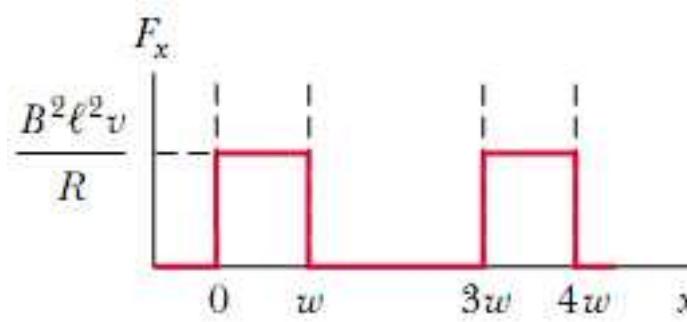
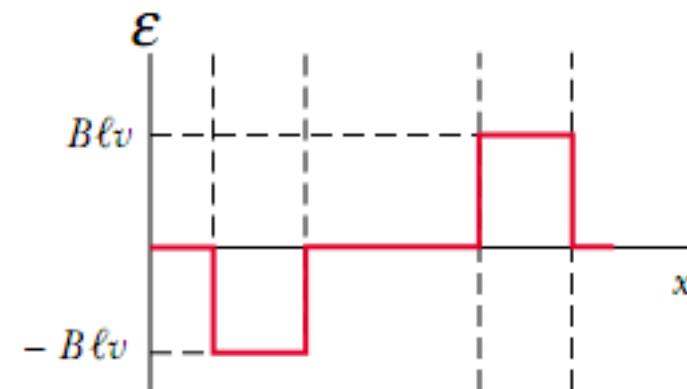
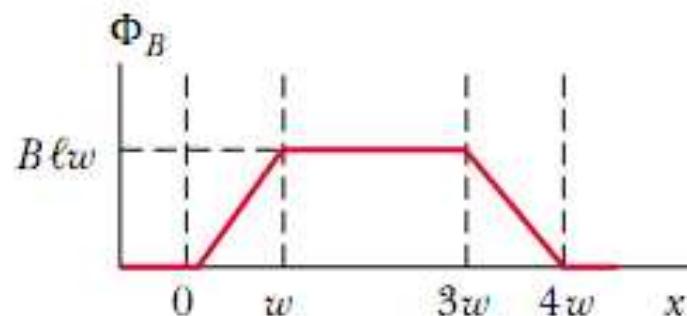
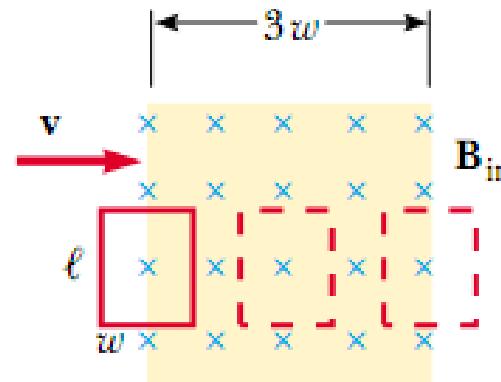
- a) Kada se strujni krug zatvori.
- b) Nekoliko sekundi nakon zatvaranja strujnog kruga.
- c) Kada se strujni krug otvori.



Zadatak 3:

Pravokutna metalna petlja dimenzija $l \times w$ i otpora R giba se konstantnom brzinom udesno kroz homogeno mag. polje B usmjereni u podlogu širine $3w$ (slika). Neka je x položaj desnog ruba petlje. Nacrtaj ovisnost o x :

- magnetskog toka kroz površinu petlje,
- inducirane ems,
- vanjske sile potrebne za konstantno gibanje petlje brzinom v .

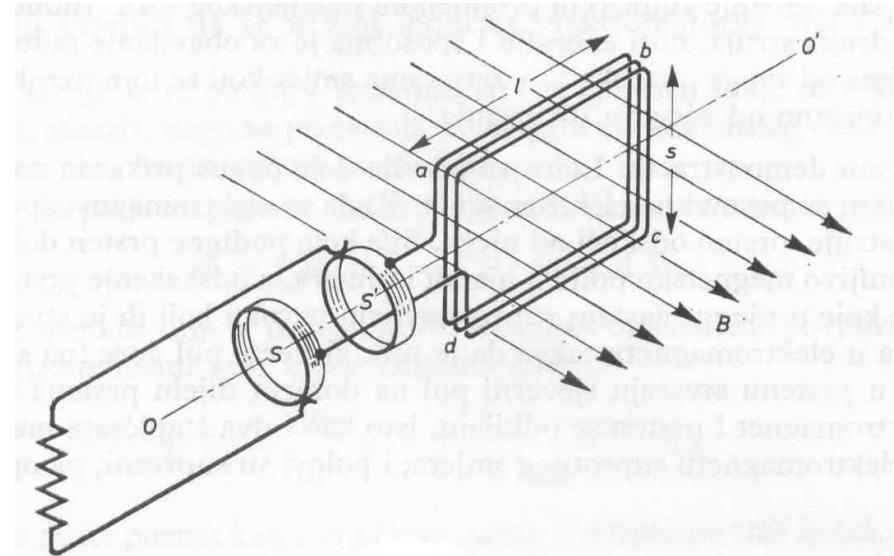


Generator izmjeničnog napona

Uredaj koji mehaničku energiju (rotacija) pretvara u električnu.

Princip rada:

Gusto namotani četvrtasti namotaj (**abcd**) (sastoji se od **N** zavoja), okreće se oko osi **OO'**, okomitoj na homogeno mag. polje indukcije **B**.



Krajevi namotaja su povezani na prstene **S** i **S'** (okreću se zajedno s namotajima, ali su međusobno izolirani).

Četkice – spajaju vanjski krug s namotajima.

Rotacija namotaja → Promjena magnetskog toka kroz namotaje → Inducirana struja.

Uredaj koji mehaničku energiju (rotacija) pretvara u električnu.

Rotacija namotaja \rightarrow Promjena magnetskog toka kroz namotaje \rightarrow Inducirana struja.

Kolika je inducirana EMS?

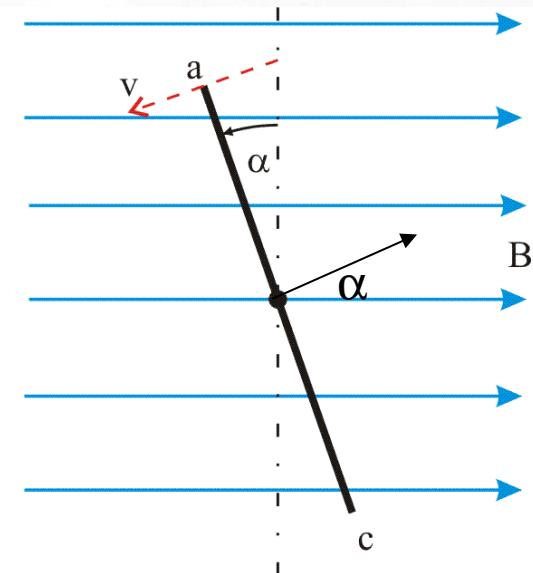
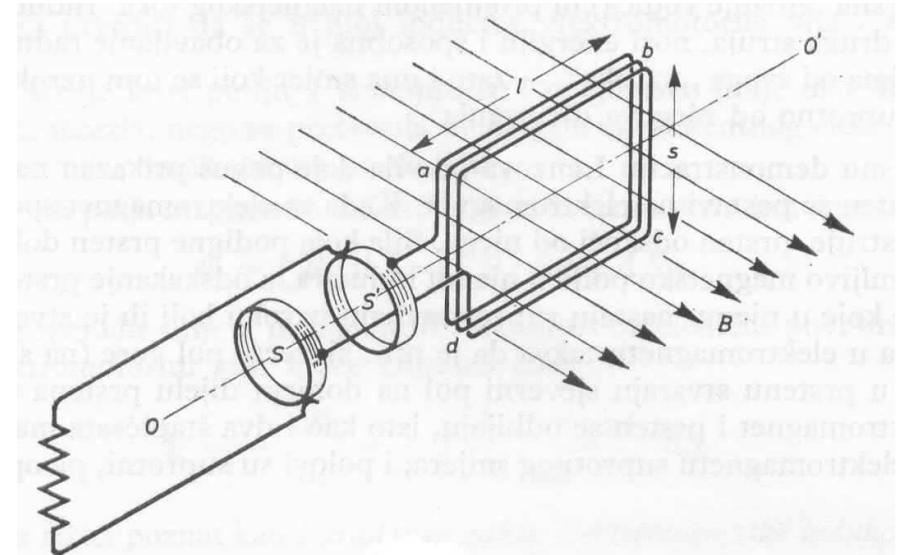
U nekom trenutku t \rightarrow Ravnina namotaja zatvara kut α s okomicom na smjer indukcije B .

Mag. tok kroz namotaje \rightarrow $\Phi = NSB \cdot \cos \alpha$

S = Površina svakog od N namotaja.

Brzina promjene mag. toka kroz namotaje \rightarrow

$$\frac{d\Phi}{dt} = -NSB \cdot \sin \alpha \cdot \frac{d\alpha}{dt}$$



$$\frac{d\Phi}{dt} = -NSB \cdot \sin \alpha \cdot \frac{d\alpha}{dt}$$

$$\omega = \frac{d\alpha}{dt} \quad \textcolor{blue}{\omega} - \text{kutna brzina rotacije}$$

➡ $\mathcal{E} = -\frac{d\Phi}{dt} = NSB\omega \cdot \sin \alpha$ Kada je EMS najveća?

Onda kada je $\sin \alpha = 1$, tj $\alpha = \pi/2, 3\pi/2, \dots$

\mathcal{E}_{\max} = Najveća vrijednost EMS. $\rightarrow \mathcal{E}_{\max} = NSB\omega \rightarrow \mathcal{E} = \mathcal{E}_{\max} \cdot \sin \alpha$

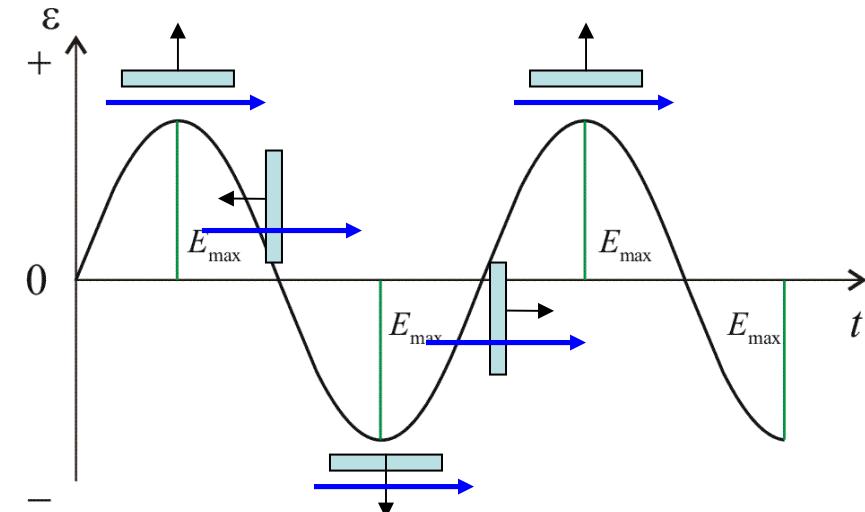
Ako namotaji rotiraju jednoliko $\rightarrow \alpha = \omega t = 2\pi vt \rightarrow$

$$\mathcal{E}(t) = \mathcal{E}_{\max} \cdot \sin 2\pi vt$$

Inducirana elekromotorna sila se mijenja po zakonu sinusa.

Tko okreće namotaje?

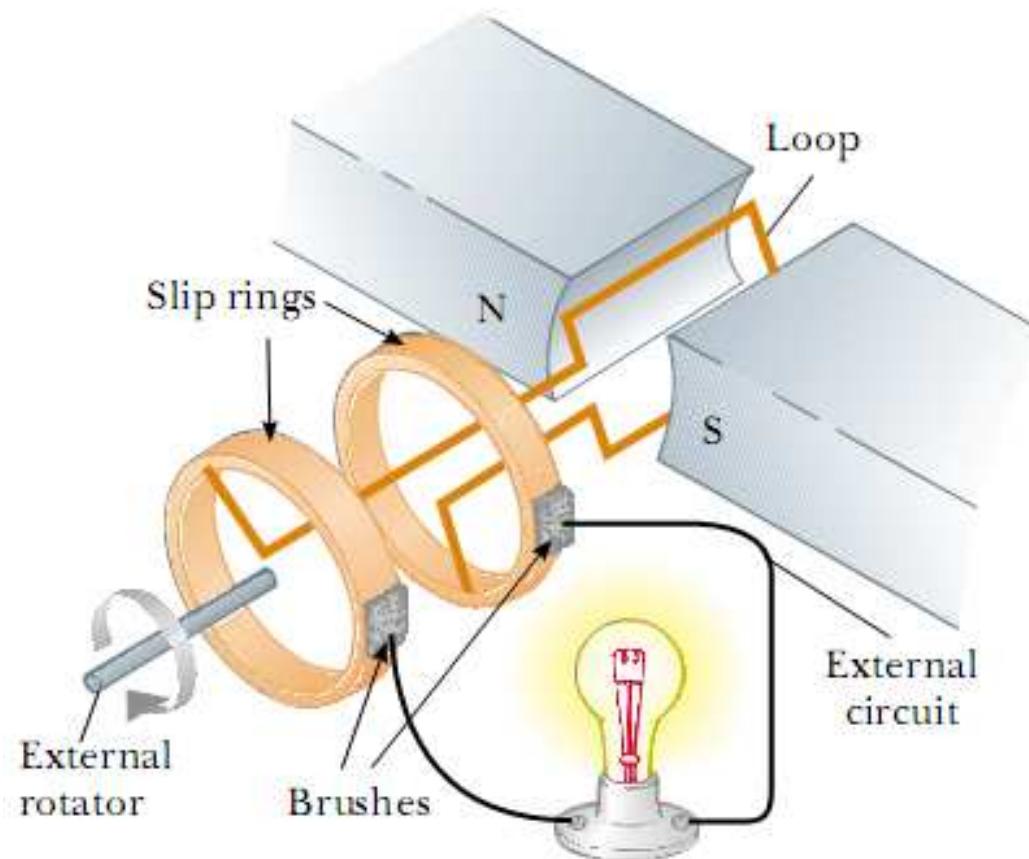
Npr. voda pada na lopatice generatora.



Pitanje:

U AC generatoru zavojnica s N zavoja vrti se u magnetskom polju. U kojem slučaju se neće povećati inducirana ems?

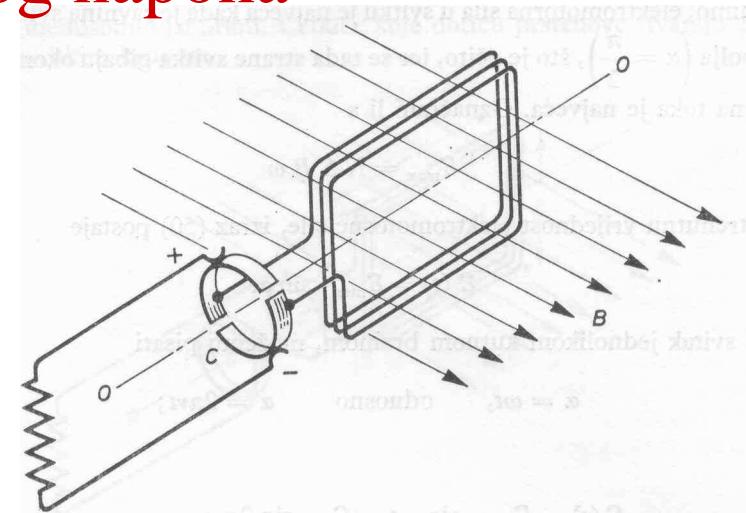
- a) ako se žica zavojnice zamijeni sa žicom manjeg otpora,
- b) ako se zavojnica brže vrti
- c) ako se mag.polje poveća
- d) ako se poveća broj zavoja u zavojnici



Generator istosmjernog napona

Građa – slično kao generator izmjeničnog napona (dodan komutator)

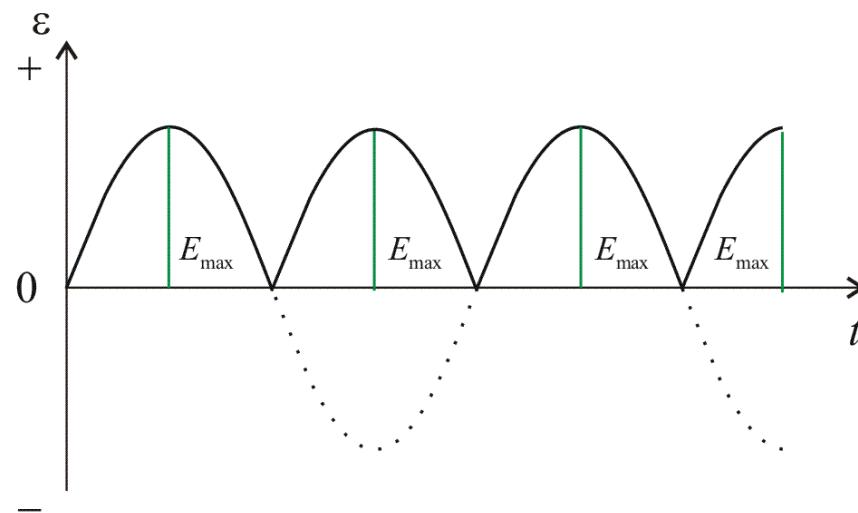
Gusto namotani četvrtasti namotaj (**abcd**) (sastoji se od **N** zavoja), okreće se oko osi **OO'**, okomitoj na homogeno mag. polje indukcije **B**.



Krajevi namotaja su povezani na komutator (prsten razrezan na pola).

Četkice – spajaju vanjski krug s namotajima.

Komutator (konstrukcijom) pretvara negativnu poluperiodu u pozitivnu.



-nema promjene polariteta zavojnice

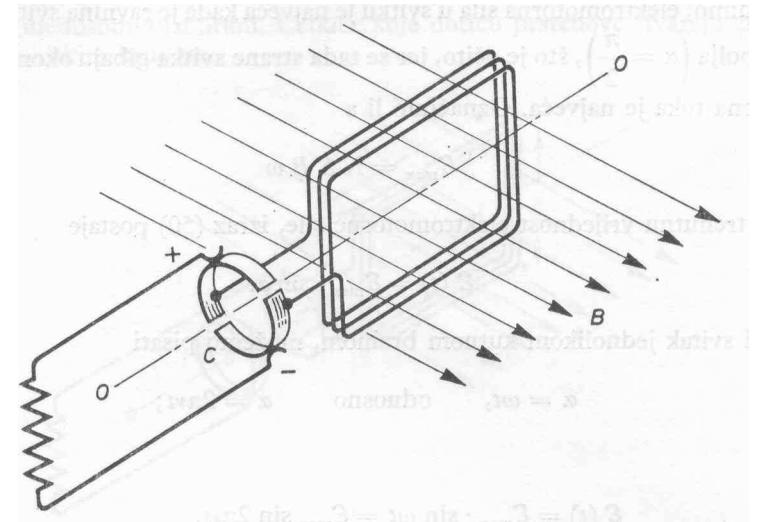
Elektromotori - općenito

Uredaj koji električnu energiju pretvara u mehaničku (rotacija).

Princip rada:

U praksi:

- ROTOR - namotaji omotani oko željeznog valjka
- STATOR – ne miče se (daje mag. polje)



Dovedemo el. struju (izvana). → Struja prolazi namotajima. → Vodič kojim teče struja u mag. polju. → Sila koja zakreće namotaje.

Zakretni moment zbog djelovanja polja na zavojnicu. → $M = NISB \cdot \sin \alpha$

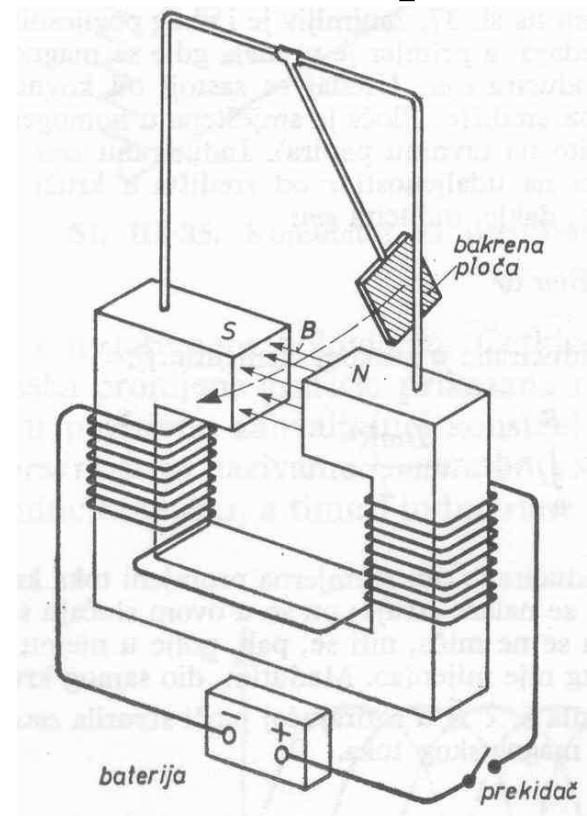
Komutator → Mijenja smjer struje → Rotacija namotaja.

Vrtložne struje

Do sada smo promatrali samo krugove od metalnih žica u kojima se inducirala el. struja

Što se događa ako umjesto žice stavljamo velike metalne mase (ploče)?

Pokus: Bakrena ploča obješena na metalnu šipku tako da se može slobodno njihati između polova elektromagneta.



Nema mag. polja. → Njihalo se njiše.

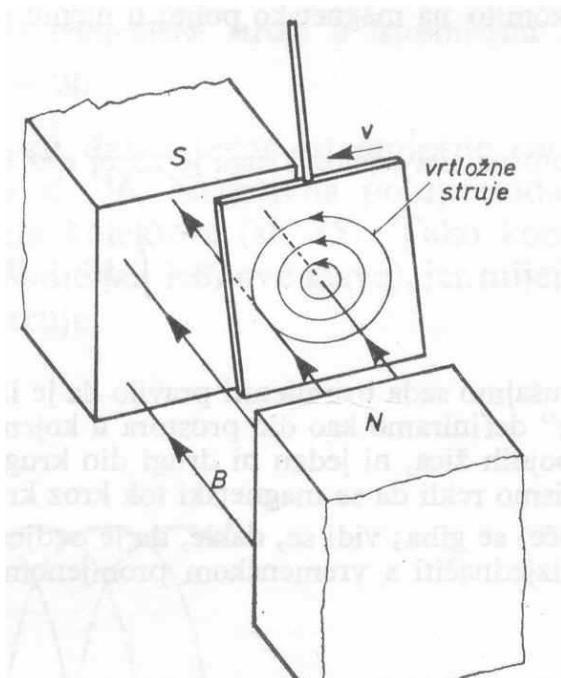
Uključimo mag. polje → Njihalo se uspori i zaustavi.

Zašto?

Uključimo mag. polje → Njihalo se uspori i zaustavi. Zašto?

Slično kao kod petlji, i u masi (ploči) se induciraju kružne struje koje zovemo **VRTLOŽNE ili Foucaultove struje**.

Leon Foucault (1819 – 1868), francuski fizičar. Dokazao rotaciju Zemlje (1851), izumio žiroskop i polarizator. Ovisnost brzine svjetlosti o indeksu loma. Otkrio vrtložne struje.

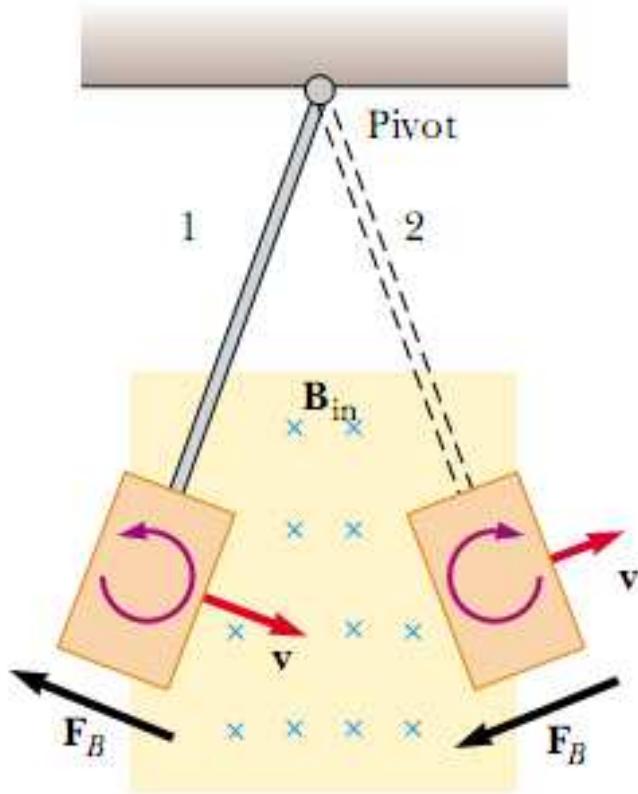


vrtložne struje – Nastoje spriječiti promjenu mag. toka kroz vodič.

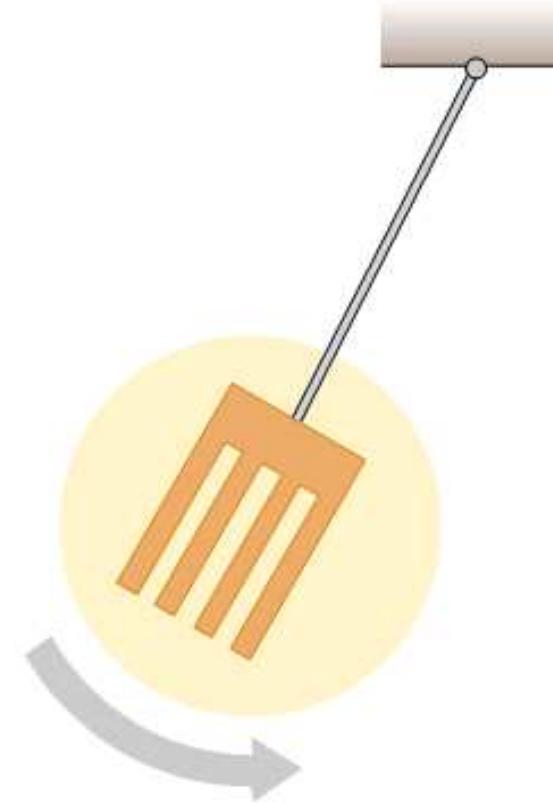
vrtložne struje – Stvaraju mag. polje smjera suprotnog promjeni toka između polova elektromagneta.

Da je ploča savršen vodič struje bi tekle stalno.

Realnost – Zbog el. otpora vrtložne struje u ploči slabe. → Prigušeno titranje.



-vrtložne struje brzo usporavaju i zaustave njihalo



-vrtložne struje su smanjene i usporavljanje njihala je sporije

Primjena:

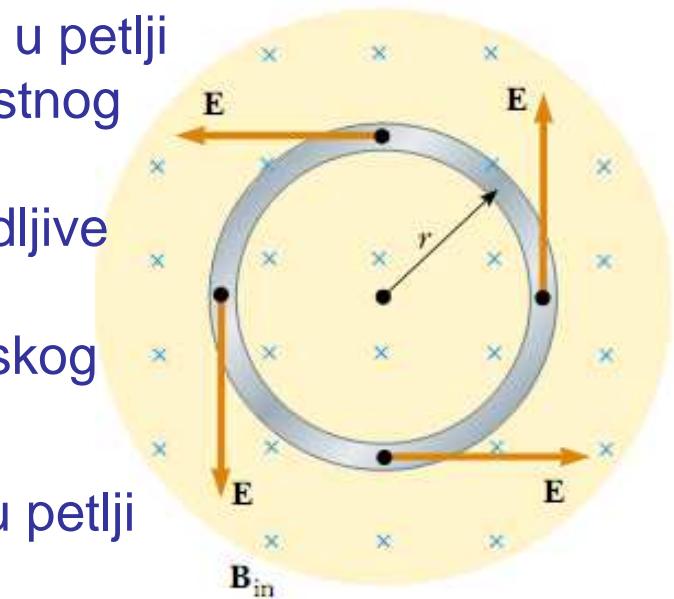
- kočnice na vlakovima (vrtložne struje usporavaju gibanje vlaka/tramvaja – glatko kočenje, bez trzanja)
- nepoželjne - jer pretvaraju električnu energiju u toplinu
 - kod transformatora se koriste tanki limovi međusobno izolirani, radi smanjenja vrtložnih struja

Inducirana ems i električno polje

- promjena mag.toka kroz petlju inducira ems i struju u petlji
- postojanje E u prostoru neovisno je o postojanju testnog naboja
- dakle, čak i u praznom prostoru (bez postojanja vodljive petlje), promjena B stvorit će E
- ovo E je nekonzervativno (za razliku od elektrostatskog polja koje stvaraju naboji u mirovanju)

-promjena B uzrokovat će inducirane ems u petlji

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



-struja u petlji implicira postojanje E koje je tangencijalno usmjereno i djeluje silom na naboje uzrokujući njihovo gibanje (struju)

-rad E pri gibanju naboja po krugu = $q\mathcal{E}$

-rad E zbog sile qE pri gibanju naboja po krugu = $qE(2\pi r)$

-izjednačiti radove: $q\mathcal{E} = qE(2\pi r)$

$$E = \frac{\mathcal{E}}{2\pi r} \quad \text{uz} \quad \mathcal{E} = - d\Phi_B / dt$$

$$\Phi_B = BA = \pi r^2 B$$

$$E = -\frac{1}{2\pi r} \frac{d\Phi_B}{dt} = -\frac{r}{2} \frac{dB}{dt}$$

-inducirano električno polje
(nekonzervativno) nastaje zbog vremenske
promjene magnetskog polja

Vrijedi: $\mathcal{E} = \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s}$

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

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

-opći oblik Faradayevog zakona

Maxwellove jednadžbe - uvod

J. C. Maxwell (1831. – 1879.)

-u prostoru bez dielektrika ili magnetskih materijala

I.

$$\oint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = \frac{q}{\epsilon_0}$$

Gaussov zakon u elektrostatici

II.

$$\oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0$$

Gaussov zakon u magnetizmu

III.

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

Faradayev zakon

IV.

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = \mu_0 I + \epsilon_0 \mu_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$$

Ampere-Maxwellov zakon

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E} + q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

Lorentzova sila