Koncept elektromotorne sile u nastavi fizike

Sopina, Antonija

Master's thesis / Diplomski rad

2016

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:217:491653

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**



Repository / Repozitorij:

Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
FIZIČKI ODSJEK

Antonija Sopina

KONCEPT ELEKTROMOTORNE SILE U NASTAVI FIZIKE

Diplomski rad

Zagreb, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
FIZIČKI ODSJEK

SMJER: PROFESOR FIZIKE I TEHNIKE

Antonija Sopina

Diplomski rad

Koncept elektromotorne sile u nastavi fizike

Voditelj diplomskog rada: izv. prof. dr. sc. Davor Horvatić

Ocjena diplomskog rada: _____

Povjerenstvo: 1. _____

2. _____

3. _____

Datum polaganja: _____

Zagreb, 2016.

Od srca veliko hvala svima koji su bili uz mene tijekom akademskog obrazovanja. Hvala vam za svaku pomoć, vjeru u mene i što ste mi bili neizmjerna podrška.

Sažetak

Kod opisa strujnih krugova linijski integral sile po jediničnom naboju preko cijelog strujnog kruga naziva se elektromotorna sila. Pojam elektromotorne sile, iako pogrešan, ustalio se u upotrebi te se uz njega vežu brojne učeničke i edukatorske pogreške. Ideja rada je dati pregled svih detalja povezanih s opisom elektromotorne sile u strujnom krugu, opisati primjere iz svakodnevnog života te navesti i ukratko objasniti temeljne učeničke poteškoće vezane uz taj pojam. Također, rad je izrađen uz ideju da bude kao priručnik u kojem je sažeto sve što bi moglo koristiti studentima, nastavnicima i edukatorima u učenju i poučavanju koncepta elektromotorne sile.

Ključne riječi: elektromotorna sila, baterija, električni generator

The concept of the electromotive force in physics education

Abstract

Through time the term electromotive force, although wrong, became commonly used and is applied in teaching with many misconceptions made by both students and teachers. While describing electric circuits, the line integral of a force per unit charge around the circuit is called electromotive force. The idea behind this thesis is to provide an overview of all details associated with electromotive force in the electric circuit, also to describe everyday examples and explain basic difficulties connected to the given term. Moreover, this thesis was created as a manual that provides a survey of everything that could be useful, regarding electromotive force, for students, teachers and other science educators.

Keywords: electromotive force, battery, electric generator

Sadržaj

1. Uvod 1
2. Struja i električno polje u strujnom krugu 3
   2.1. Smjer električne struje 3
   2.2. Struja i električno polje u zatvorenom i otvorenom strujnom krugu 4
3. Elektromotorna sila 7
   3.1. Spajanje izvora elektromotorne sile 9
      3.1.1. Serijski spoj 9
      3.1.2. Paralelan spoj 10
   3.2. Elektromotorna sila u strujnom krugu 11
      3.2.1. Idealan izvor elektromotorne sile u zatvorenom strujnom krugu 11
      3.2.2. Realan izvor elektromotorne sile u zatvorenom strujnom krugu 12
      3.2.3. Izvor elektromotorne sile u otvorenom strujnom krugu 13
   3.3. Elektromotorna sila nije sila 14
4. Povijest elektromotorne sile 15
5. Vrste izvora elektromotorne sile 17
   5.1. Pretvorba mehaničke energije u električnu 18
      4.1.1. Van de Graaffov generator 18
      4.1.2. Piezoelektrični efekt 19
   5.2. Pretvorba svjetlosne energije u električnu 20
      5.2.1. Fotoelektrični efekt 20
   5.3. Pretvorba kemijske energije u električnu 20
      5.3.1. Baterija 21
   5.4. Pretvorba toplinske energije u električnu 24
      5.4.1. Termoelektrični efekt (Seebeckov efekt) 24
   5.5. Elektromagnetska indukcija 25
      5.5.1. Pokretačka elektromotorna sila 27
      5.5.2. Samoindukcija i međuindukcija 28
      5.5.3. Vrtložne struje 29
      5.5.4. Inducirano električno polje 32
6. Učeničke poteškoće vezane uz elektromotornu silu i strujne krugove 34
7. Zaključak 36
8. Literatura 37

1. Uvod

Električna privlačenja, magneti i pojave koji oni stvaraju poznate su više od dvije tisuće godina. Iako su te pojave dugo poznate i vrlo zanimljive, tek se početak 17. stoljeća smatra početkom znanosti o elektricitetu i magnetizmu. Tada su uvedeni nazivi: elektricitet, magnetski pol i električna sila.

Nakon dugotrajnih istraživanja i eksperimenata postalo je jasno da postoji temeljno svojstvo tvari – električni naboj koji u prostoru oko sebe stvara električno polje. Sve o nabojima koji su stacionarni, bez ubrzavanja, opisano je u elektrostatici, dok elektrodinamika obuhvaća naboje u gibanju, odnosno električnu struju, magnetska polja i pripadne pojave.

Međutim, elektricitet i magnetizam dugo su vremena smatrani potpuno odvojenim i neovisnim pojavama, sve do prije 150 godina, kada je James Clerk Maxwell objedinio sve do tada spoznato i opisao cijeli elektricitet i magnetizam u četiri jednadžbe, poznatije kao Maxwellove jednadžbe:

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \qquad (1)$$

Električni naboji su izvor ili ponor električnog polja. Jednadžba je poznata i kao Gaussov zakon.

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \qquad (2)$$

Ne postoje magnetski monopoli, to jest izvori ili ponori magnetskog polja.

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \qquad (3)$$

Vremenski promjenjivo magnetsko polje uzrokuje rotacijsko električno polje. Jednadžba je također poznata kao Faradayev zakon.

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \qquad (4)$$

Vodič kojim teče struja ili vremenski promjenjivo električno polje uzrokuje rotacijsko magnetsko polje. Jednadžba je poznata kao Amperov zakon s Maxwellovom popravkom.

Sva tadašnja otkrića i eksperimenti vezani za elektricitet i magnetizam danas su temelj brojnih električnih uređaja. Pretvorbe drugih oblika energije u električnu i sam protok električne struje zahtjeva izvore elektromotorne sile.

Osim što je pogrešnog naziva, pojam elektromotorne sile vrlo je nejasan današnjim učenicima na srednjoškolskoj razini, čak i studentima pri završetku studija. Stoga je cilj ovog rada detaljno opisati što je elektromotorna sila, njenu ulogu u strujnom krugu, izvore elektromotorne sile te način rada tih izvora uz primjere i pojave iz svakodnevnog života.

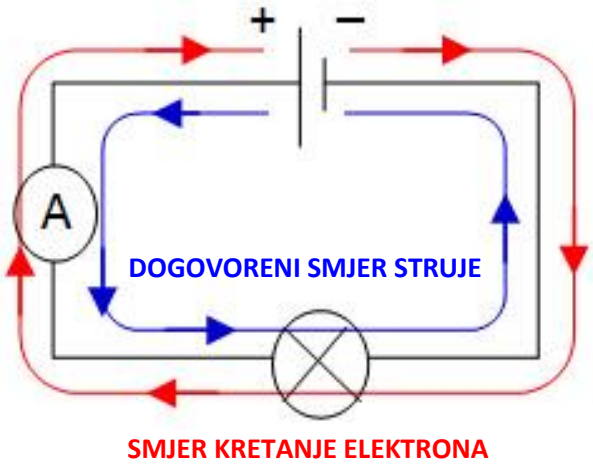
Također, ideja rada je dati nastavnicima, studentima – budućim nastavnicima i edukatorima uvid u temeljne poteškoće vezane uz elektromotornu silu te smjernice kako je uvesti u nastavu i objasniti učenicima na jednostavan i zanimljiv način.

2. Struja i električno polje u strujnom krugu

2.1. Smjer električne struje

Prema definiciji, električna struja u strujnom krugu ima smjer gibanja pozitivnih naboja. Pozitivni naboji se gibaju u smjeru jakosti električnog polja, stoga električna struja ima smjer jednak električnom polju. Odnosno, električna struja teče od mjesta višeg električnog potencijala prema mjestu nižeg električnog potencijala. Takav smjer struje je dogovoreni smjer, jer se prvotno mislilo da su pozitivni naboji nosioci električne struje. Kasnije se uočilo da su elektroni te pozitivni i negativni ioni nosioci električne struje koja, u stvarnosti, teče od mjesta nižeg prema mjestu višeg električnog potencijala.

U ovome radu koristit će se dogovoreni smjer kretanja pozitivnih naboja.



Slika 1. Stvarni i dogovorni smjer struje

2.2. Struja u zatvorenom i otvorenom strujnom krugu

Električna struja je posljedica gibanja slobodnih nosioca naboja. Slobodni nosioci naboja u metalima su elektroni, a u elektrolitima ioni, koji mogu biti pozitivni ili negativni. U posebnim uvjetima i u plinovima, nosioci naboja su i ioni i elektroni.

Nosioci naboja se gibaju pod utjecajem električnog polja. Električno polje pokreće električne naboje u smjeru polja i tako izaziva električnu struju. O tome kako će, ako će uopće, poteći struja u ovisnosti o fizičkim svojstvima sustava i sredstvu u kojem električno polje djeluje, govori Ohmov zakon (verzija na mikroskopskoj razini):

$$\vec{j} = \sigma \cdot \vec{E}. \quad (5)$$

Gustoća struje $\vec{j}$ razmjerna je električnom polju $\vec{E}$ na tom mjestu, a konstanta razmjernosti (električna vodljivost σ) ovisi isključivo o tvari, a ne o geometrijskim osobinama. [12]

S obzirom na to da je električna struja I jednaka umnošku gustoće struje $\vec{j}$ i normale na površinski presjek vodiča $\vec{A}$, električna struja će ovisiti o električnom polju $\vec{E}$ unutar vodiča.

$$I = \sigma \cdot \vec{E} \cdot \vec{A} \quad (6)$$

Za tok struje potreban je vodič i uspostava električnog polja, a za stalnu struju u vodiču potrebno je imati zatvoreni strujni krug i stalno razdvajanje naboja čime se održava stalan napon između krajeva vodiča. U vodiču duljine l, električne vodljivosti σ i napona na krajevima vodiča U, električno polje E unutar vodiča jednako je:

$$E = \frac{U}{l}. \quad (7)$$

S obzirom na to da na kretanje naboja u strujnom krugu utječu samo komponente električnog polja paralelne s normalom na površinski presjek vodiča, jednadžba (6) se može zapisati:

$$I = \sigma \cdot E \cdot A. \quad (8)$$

Ako se u jednadžbi (8) električno polje zamijeni izrazom iz jednadžbe (7), dobije se jednadžba:

$$I = \sigma \cdot \frac{U}{l} \cdot A\,, \quad (9)$$

koja se može svesti na izraz:

$$I = \frac{U}{R}\,, \quad (10)$$

gdje je R otpor koji je jednak:

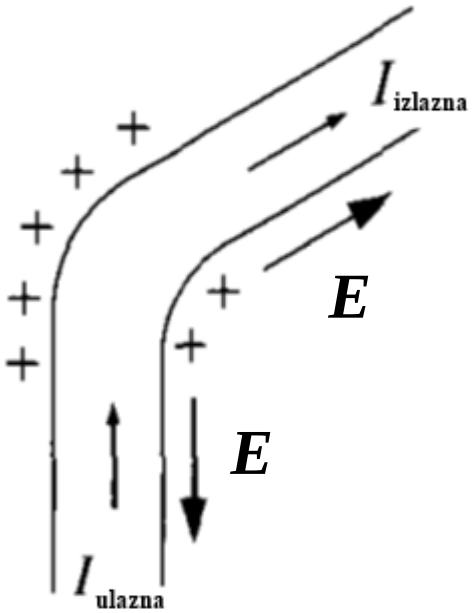
$$R = \rho \cdot \frac{1}{A} \cdot l\,. \quad (11)$$

U jednadžbi (11) ρ je električna otpornost i jednaka je recipročnoj vrijednosti električne vodljivosti:

$$\rho = \frac{1}{\sigma}\,. \quad (12)$$

Kao što se primjećuje iz jednadžbe (10), ukupna struja u strujnom krugu proporcionalna je naponu na krajevima vodiča. Odnosno, povećanjem razlike električnog potencijala (napona) između krajeva vodiča, povećat će se električno polje, a povećanjem električnog polja poveća se i gustoća struje, time i jakost struje.

U zatvorenom strujnom krugu, razdvajanje naboja konstantno se događa što uzrokuje stalan tok struje. Međutim, u početku kada se strujni krug zatvori i struja počne teći, ona nije jednaka u cijelom strujnom krugu - dolazi do gomilanja naboja na pojedinim dijelovima strujne petlje (na primjer u „zavojima“ vodiča). Električno polje nagomilanih naboja je u takvom smjeru da želi izjednačiti tok struje u dijelu prije gomilanja i dijelu poslije gomilanja. Ako je ulazna struja veća od izlazne struje mjesta gdje se naboji gomilaju, proizvest će se polje suprotno smjeru ulaska struje koje će usporavati ulaznu, a



Slika 2. Gomilanje naboja na zavoju vodiča u strujnom krugu

ubrzavati izlaznu struju sve dok ulazna i izlazna struja nisu jednake, a ravnoteža je uspostavljena. U stvarnosti, to se odvija toliko brzo da se može pretpostaviti da je struja ista kroz cijeli krug.

Ako se električno polje uspostavi unutar izoliranog vodiča koji nije dio zatvorenog strujnog kruga, poteći će struja u smjeru električnog polja koje ju je izazvalo. Kako je krug otvoren, električni naboji neće teći krugom, već dolazi do gomilanja pozitivnog naboja na jednom, a negativnog na drugom kraju vodiča. Gomilanje naboja proizvodi svoje električno polje $\vec{E}_2$ u suprotnom smjeru od izvornog polja $\vec{E}_1$, stoga se ukupno električno polje smanjuje, a samim time i električna struja. Nakon vrlo kratkog vremena dovoljno se naboja nagomila na krajevima vodiča tako da je ukupno električno polje nula:

$$\vec{E}_1 + \vec{E}_2 = 0 \quad (13)$$

Tada je i gustoća struje nula te struja potpuno prestane teći. Stoga je u izolatorima i otvorenim strujnim krugovima nemoguće imati stalno gibanje naboja. Postoji samo prelazna kratkotrajna struja i to traje dok se ne uspostavi ravnoteža. [15]

3. Elektromotorna sila

Stalan tok struje u strujnom krugu ne bi bio moguć da u krugu nema uređaja koji ima ulogu održavanja stalne razlike električnog potencijala i stvaranja električnog polja. Električno polje na naboje djeluje električnom (Coulombovom) silom koja ima smjer tog električnog polja, od višeg prema nižem električnom potencijalu. Kada naboji dođu s pola pozitivnog električnog potencijala do pola negativnog električnog potencijala, električna sila djeluje na njih tako da ih zadržava na negativnom polu. No, da bi se naboji vratili ponovo na početak i struja stalno tekla, potreban je uređaj koji djeluje na naboje silom suprotnog smjera od električne sile. Ta sila ima ulogu da naboje koji su na području nižeg električnog potencijala „podigne“ na područje višeg električnog potencijala i preda im energiju koju su „izgubili“ prolaskom kroz strujni krug. Takav uređaj naziva se *izvor*, a sila koju izvor proizvodi jednostavno se naziva *sila izvora*.

Sila izvora je obično ograničena na jedan dio strujnog kruga (baterija, nabijen kondenzator, generator itd.) i nije ista za sve izvore. U bateriji je to kemijska sila, u piezoelektričnom kristalu mehanički pritisak koji se pretvara u električni impuls, u fotoelektričnoj ćeliji je to svjetlo itd. Često se nazivaju neCoulombovim silama jer imaju djelovanje suprotno Coulombovoj sili.

Učinak izvora određen je linijskim integralom sile izvora kroz cijeli krug:

$$\mathcal{E} = \oint \vec{f_s} \cdot d\vec{l}, \quad (14)$$

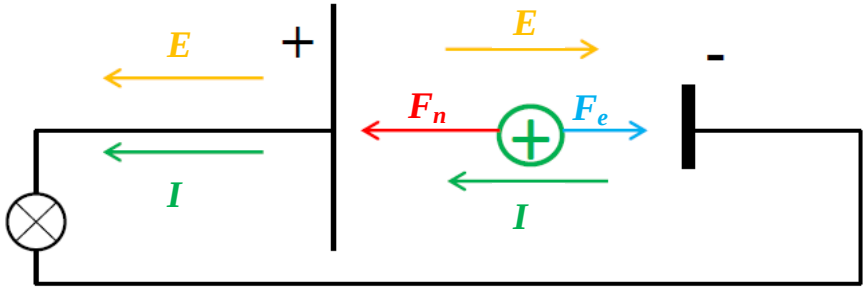
gdje je $\vec{f_s}$ sila izvora, odnosno sila na naboj, $d\vec{l}$ po zatvorenom putu je put koji obuhvaća cijeli strujni krug, a $\mathcal{E}$ se naziva *elektromotorna sila*. Kao što je vidljivo i iz integrala, elektromotorna sila nije sila, već je integral sile po jediničnom naboju po cijelom strujnom krugu, to jest elektromotorna sila je izvor električnog potencijala za strujni krug.

Integral kojim je opisana elektromotorna sila je zatvoren, jer su početna i konačna točka gledanja iste i integral obuhvaća cijeli strujni krug. Umnožak sile na naboj i puta je skalar, jer elektromotornoj sili doprinose samo paralelne komponente sile sa strujnom petljom. Linije električnog polja su u smjeru toka struje i okomito na petlju. No gibanju naboja doprinose samo komponente u smjeru žice (vodiča), okomite linije ne utječu na gibanje naboja u strujnom krugu. [5]

Elektromotorna sila se može definirati i kao rad koji vrši sila izvora jer pokreće razdvajanje naboja u izvoru, pri čemu sila koja vrši rad nije direktna posljedica električnog polja (neCoulombova sila F_n):

$$\mathcal{E} = \frac{dW}{dQ} \quad (15)$$

Pozitivnim nabojima prirodan je smjer kretanja u smjeru električnog polja, od područja višeg prema području nižeg električnog potencijala. Da bi se naboji dQ nastavili kretati u izvoru protivno sili električnog polja F_e, potrebno je izvršiti rad dW unutar izvora. Za vršenje rada potrebna je energija (električna). Energiju daju izvori električne energije tako što pretvaraju druge oblike energije (mehaničku, svjetlosnu, kemijsku) u električnu.



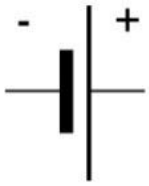
Slika 3. Smjer električnog polja i struje u unutarnjem i vanjskom dijelu strujnog kruga te sile koje djeluju na pozitivan naboj u unutarnjem dijelu kruga

Elektromotorna sila nije vektorska veličina, ali je korisno da joj se pridoda smjer. Stoga se, zbog dogovorenog smjera električne struje u vanjskom dijelu kruga, odredilo da je smjer elektromotorne sile od područja nižeg prema području višeg električnog potencijala, u unutarnjem dijelu kruga, odnosno unutar izvora.

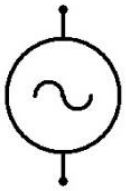
Elektromotorna sila, kraće se zapisuje *EMF* (eng. electromotive force), označava se s $\mathcal{E}$, mjerna jedinica je *volt* $[\frac{1\,\mathrm{J}}{1\,C} = 1\mathrm{V}]$, dok se uređaj koji opskrbljuje krug električnom energijom i proizvodi elektromotornu silu naziva izvor elektromotorne sile ili kraće *EMS* (eng. electromotive source).

Izvor elektromotorne sile pretvara kemijsku, mehaničku, svjetlosnu i druge oblike energije u električnu energiju. Uređaj za mjerenje elektromotorne sile je *voltmetar*.

Za izvor elektromotorne sile je karakteristično da iz njih izlaze barem dva vodiča A i B od kojih je svaki na drugom električnom potencijalu V_A i V_B, stoga se za elektromotornu silu koriste simboli:



Slika 4. Istosmjeran izvor elektromotorne sile



Slika 5. Izmjeničan izvor elektromotorne sile

Ako je $V_A > V_B$ tada je V_A pozitivan (+) pol, a V_B negativan (-) pol izvora.

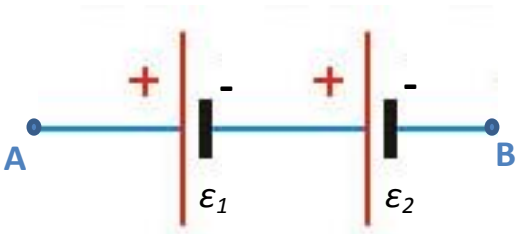
Izvor elektromotorne sile je izmjeničan ako se razlika električnog potencijala na polovima izvora sinusoidno mijenja u vremenu, a ako je razlika električnog potencijala na polovima nepromijenjena u vremenu, izvor elektromotorne sile je istosmjeran.

3.1. Spajanje izvora elektromotorne sile

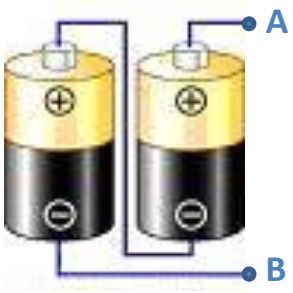
Izvori elektromotorne sile se mogu spajati na nekoliko različitih načina, no najučestalije se spajaju serijski ili paralelno [14].

3.1.1. Serijski spoj

Prikladnim međusobnim spajanjem izvora elektromotorne sile, može se povećati ukupna elektromotorna sila strujnog kruga. Ako se pozitivni pol jednog izvora vodljivo spoji na negativni pol drugog izvora, dobiva se opet izvor s dva slobodna pola. Spojeni polovi se nalaze na istom električnom potencijalu.



Slika 6. Shema serijskog spoja dva izvora elektromotorne sile



Slika 7. Serijski spoj dvije baterije

Elektromotorna sila serijski spojenih izvora jednaka je zbroju elektromotornih sila oba izvora:

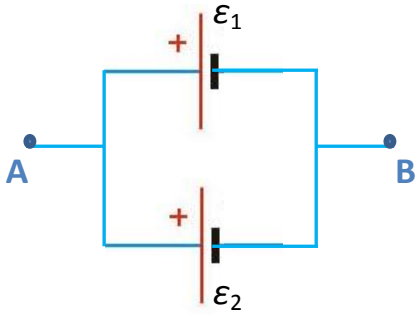
$$\mathcal{E}_{uk} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 \quad (16)$$

Za N jednakih izvora koji su spojeni serijski, ukupna elektromotorna sila će biti jednaka:

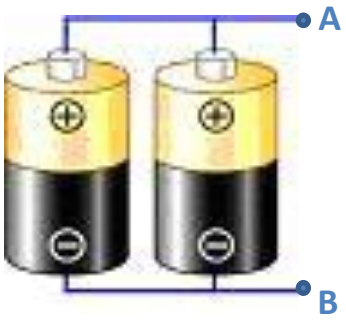
$$\mathcal{E}_{uk} = N \cdot \mathcal{E}_1 \quad (17)$$

3.1.2. Paralelan spoj

Kada se izvori elektromotorne sile spajaju u paralelu tada se vodljivo spajaju svi pozitivni polovi i svi negativni polovi izvora. U paralelu se spajaju samo izvori jednakih elektromotornih sila. Dva po dva izvora su spojena u protivnost. Kada elektromotorne sile ne bi bile međusobno jednake, izvorima bi beskorisno prolazili električni naboji.



Slika 8. Shema paralelnog spoja dva izvora elektromotorne sile



Slika 9. Paralelan spoj dvije baterije

Elektromotorna sila kombinacije izvora spojenih u paralelu jednaka je elektromotornoj sili jednog izvora.

$$\mathcal{E}_{uk} = \mathcal{E}_1 = \mathcal{E}_2 = \mathcal{E}_{3...} \quad (18)$$

Paralelan spoj izvora elektromotorne sile je koristan jer se njime povećava sveukupna raspoloživa energija za krug, stoga će tako spojeni izvori vremenski duže snabdijevati strujni krug električnom strujom. [10]

3.2. Elektromotorna sila u strujnom krugu

Izvore elektromotorne sile se može gledati kao idealne i kao realne. Idealni izvori se koriste u jednostavnijim primjerima i zadacima kako bi se lakše uvela elektromotorna sila kao novi pojam ili kao primjena u zadacima. Ponekad, potrebno je sagledati i realnu situaciju te koristiti primjere izvora elektromotorne sile koji su svakodnevni i koji nikad nisu idealni.

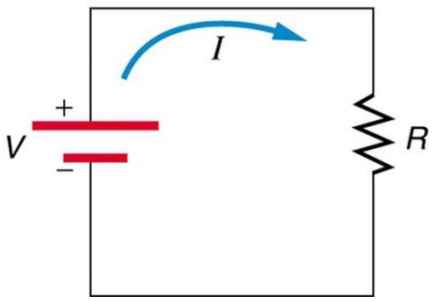
3.2.1. Idealan izvor elektromotorne sile u zatvorenom strujnom krugu

Idealan izvor elektromotorne sile je izvor bez unutarnjeg otpora, stoga su u idealnom izvoru elektromotorne sile, električna i neelektrična sila na naboje jednake iznosom, ali suprotnog smjera, pa je ukupan rad unutar izvora nula. U idealnom izvoru dolazi do povećanja električne potencijalne energije, ali nema promjene kinetičke energije naboja. Povećanje električne potencijalne energije jednako je radu neelektrične sile unutar izvora stoga za idealan izvor vrijedi:

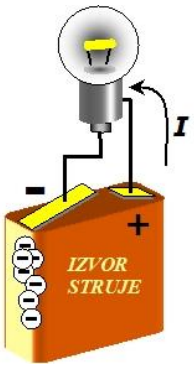
$$\mathcal{E} = V_{AB}. \quad (19)$$

U idealnom izvoru elektromotorna sila jednaka je naponu na krajevima izvora.

Kako bi se uspostavio zatvoreni strujni krug, potrebno je izvor elektromotorne sile spojiti vodičima s otpornikom otpora *R*.



Slika 10. Shema jednostavnog strujnog kruga s idealnim izvorom elektromotorne sile

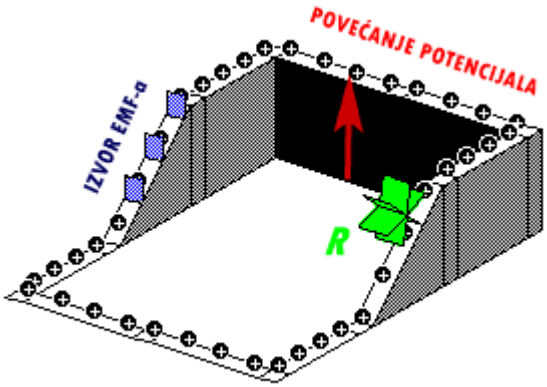


Slika 11. Jednostavni strujni krug

Za idealan izvor elektromotorne sile, struju jakosti *I* i otpor u krugu *R* vrijedi:

$$\mathcal{E} = V_{AB} = I \cdot R \quad (20)$$

Kada naboj Q prolazi kroz izvor, električna potencijalna energija mu se poveća na račun rada izvora. Prolaskom naboja kroz vanjski dio kruga, električna potencijalna energija se pretvara u toplinsku energiju otpornika (otpornik se zagrijava). Napon U na krajevima otpornika jednak je razlici električnog potencijala V_{AB}, odnosno elektromotornoj sili idealnog izvora $\mathcal{E}$. Ako su u strujnom krugu poznati otpor R i napon, odnosno elektromotorna sila idealnog izvora, tada se prema Ohmovom zakonu (20) može izračunati struja koja teče krugom.



Slika 12. Jednostavan prikaz prolaska naboja kroz strujni krug

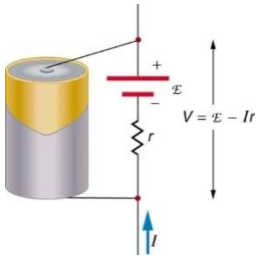
U strujnom krugu s idealnim izvorom elektromotorne sile za oznaku izvora elektromotorne sile koristi se i oznaka U_0.

3.2.2. Realan izvor elektromotorne sile u zatvorenom strujnom krugu

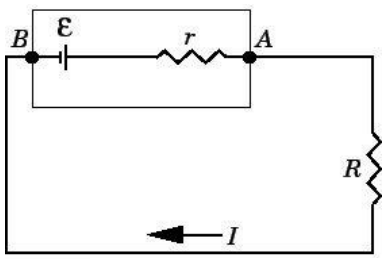
Često se u školama s učenicima rade zadaci i primjeri koji u strujnom krugu koriste idealan izvor elektromotorne sile, no u stvarnosti izvori elektromotorne sile se ne ponašaju idealno. U realnom izvoru strujnog kruga, razlika električnog potencijala nije jednaka elektromotornoj sili kao što je to u jednadžbi (19), to jest:

$$\mathcal{E} \neq V_{AB} \quad (21)$$

Razlog tome je što se naboj susreće s otporom, dok se giba kroz bilo koji realan izvor elektromotorne sile. Taj otpor na koji naboj nailazi prolaskom kroz unutarnji dio strujnog kruga naziva se unutarnji otpor izvora i označava se s r.



Slika 13. Realan izvor elektromotorne sile



Slika 14. Realan izvor elektromotorne sile u strujnom krugu

Ako se unutarnji otpor ponaša prema Ohmovom zakonu, r je konstanta neovisna o struji I. Prolaskom struje kroz unutarnji otpor r, dolazi do smanjenja potencijalne energije, odnosno smanjenja električnog potencijala:

$$Vr = I \cdot r \quad (22)$$

Kada struja teče unutarnjim dijelom strujnog kruga, odnosno od kraja nižeg prema kraju višeg električnog potencijala, razlika električnog potencijala između krajeva izvora je:

$$V_{AB} = \mathcal{E} - V_r \quad (23)$$

Razlika električnog potencijala V_{AB} je napon na krajevima izvora i on je iznosom manji nego elektromotorna sila $\mathcal{E}$, jer na unutarnjem otporu r dolazi do smanjenja električnog potencijala za V_r. Ukupan rast potencijalne energije naboja u realnom izvoru nije jednak rastu potencijalne energije u idealnom izvoru, jer dio potencijalne energije koji naboj dobije od elektromotorne sile se pretvori u drugi oblik energije prolaskom naboja kroz unutarnji otpor r.

Na primjer, baterija od 4,5 V ima elektromotornu silu od 4,5 V, ali napon na krajevima izvora V_{AB} baterije je jednak 4,5 V jedino kada struja ne teče kroz bateriju, to jest kada je struja jednaka nuli. Ako je baterija dio zatvorenog strujnog kruga kroz koji struja teče, tada je napon na krajevima izvora manji od 4,5 V.

3.2.3. Izvor elektromotorne sile u otvorenom strujnom krugu

U otvorenom strujnom krugu izvor kroz krug „pošalje“ kratkotrajnu struju zbog koje se uspostavi u krugu polje suprotno izvornom polju. Nakon kratkog vremena kroz krug ne teče struja jer je ukupno električno polje u krugu nula (13).

Stoga radilo se o idealnom ili realnom izvoru elektromotorne sile, u otvorenom strujnom krugu, razlika električnog potencijala i elektromotorne sile će uvijek biti jednaka jer kroz izvor ne prolazi struja (19).

3.3. Elektromotorna sila nije sila

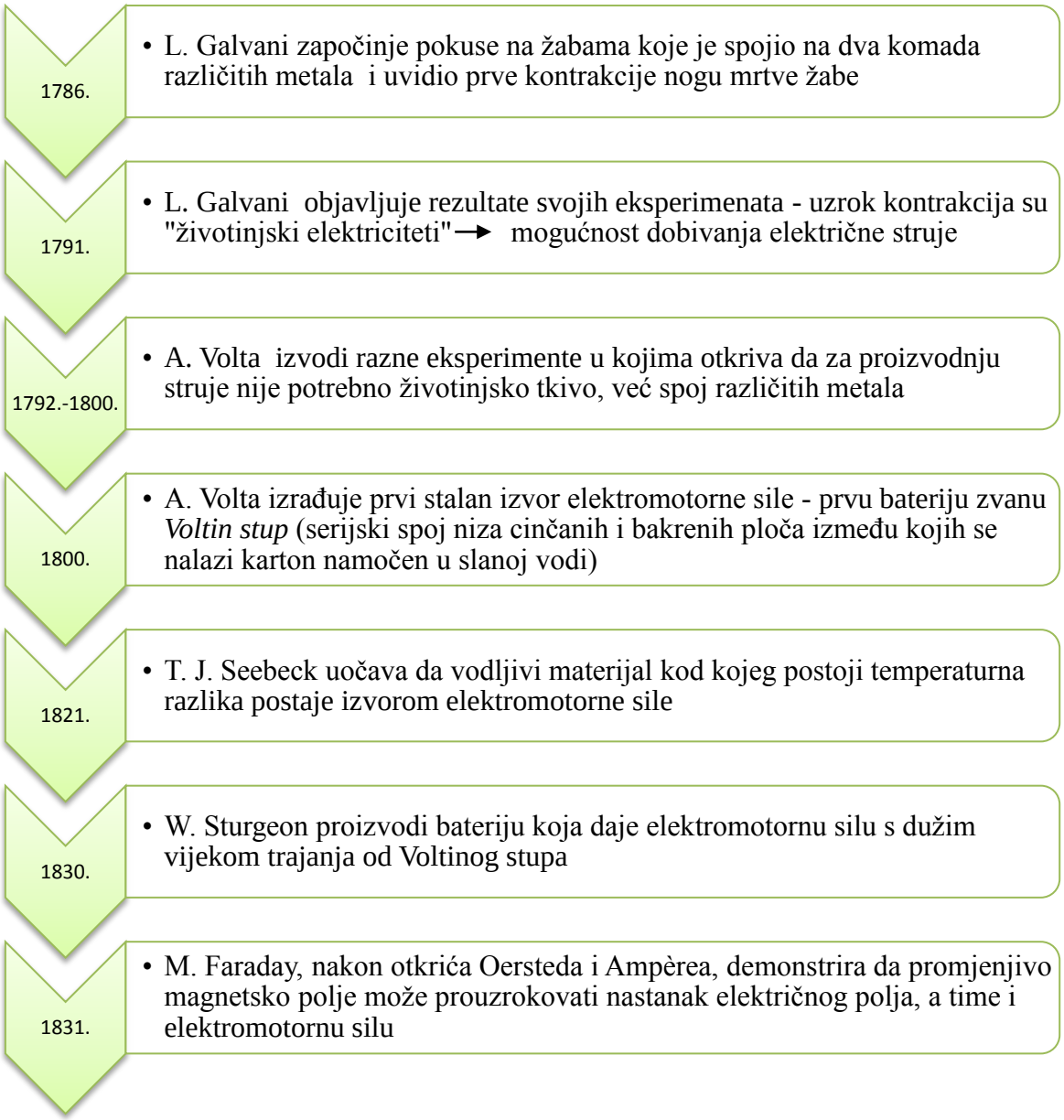
U početku, pri pokušajima razumijevanja što se događa u unutarnjem djelu strujnog kruga, govorilo se o nekoj sili unutar izvora koja mora vršiti rad kako bi prenijela naboje s područja nižeg prema području višeg električnog potencijala. Kako se tada stalno naglašavalo da se radi o sili unutar izvora, tako je elektromotorni napon dobio naziv elektromotorna sila što je ostalo prihvaćeno još i danas, iako se počelo raditi na tome da se naziv elektromotorne sila promijeni.

Nakon prihvaćanja da je elektromotorna sila ustvari – napon, došlo je do problema poistovjećivanja elektromotorne sile i napona na krajevima trošila u vanjskom dijelu strujnog kruga. Definicije elektromotorne sile i napona su vrlo slične, ali nisu isto. Napon je rad električne (Coulombove) sile pri kretanju naboja i rezultat je smanjenja energije u krugu, dok je elektromotorna sila definirana radom sile koja nije električna (neCoulombova) te je zaslužna za povećanja energije u krugu.

4. Povijest elektromotorne sile

Otkrivanje elektromotorne sile je započelo i prije Galvanijevih pokusa na žabama, no prvi pisani dokumenti koji spominju vezu s elektromotornom silom kreću tek oko 1786. sa Galvanijevim eksperimentima. Od tada do danas otkriveno je mnogo izvora elektromotorne sile i još će sigurno poneki biti otkriveni u budućnosti.

Kratki pregled povijesti elektromotorne sile:

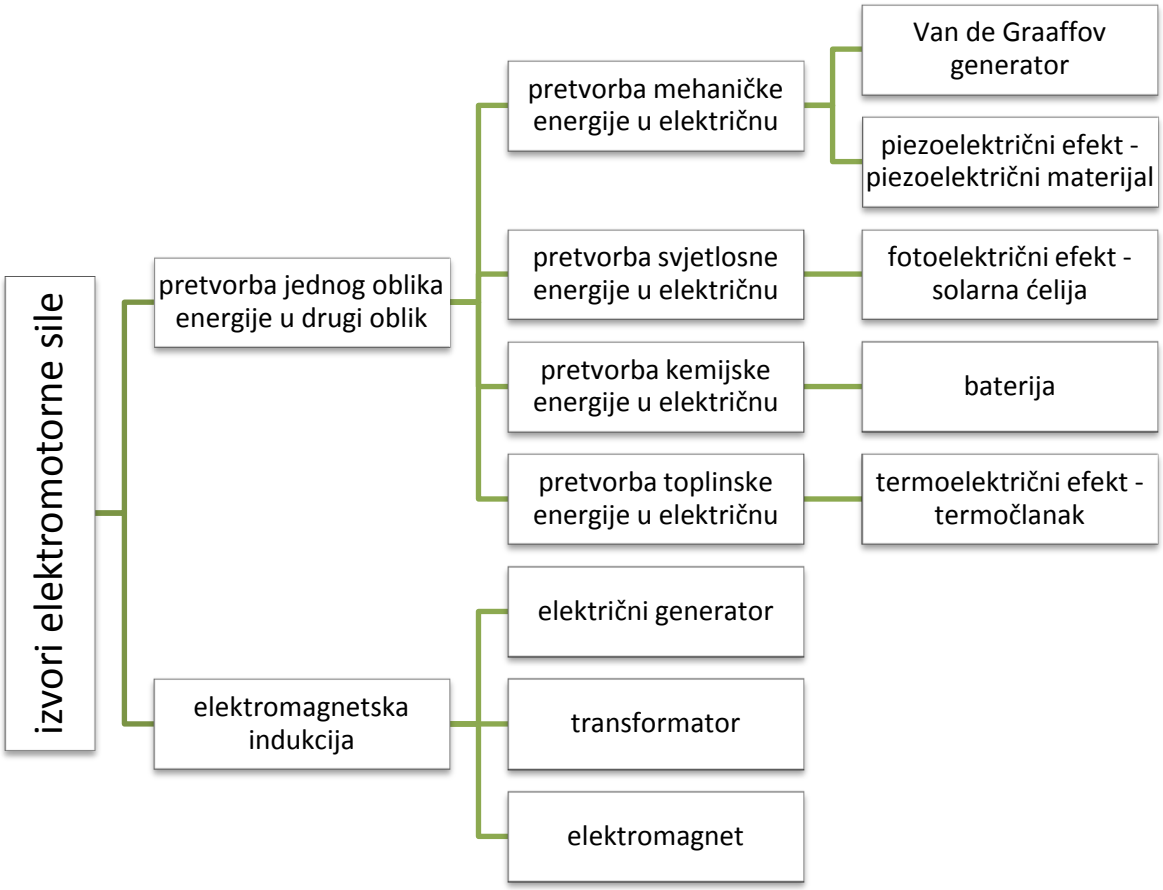


1834.	• H. Lenz uvodi pravilo pomoću kojeg se određuje smjer inducirane elektromotorne sile - Lenzovo pravilo
1836.	• J. Daniell proizvodi prvu bateriju koja daje stalan, pouzdan izvor elektromotorne sile tijekom dugog vremenskog razdoblja
1855.	• L. Foucault otkriva vrtložne struje
1864.	• J. C. Maxwell prihvaća Faradayeve ideje i, zajedno s ostalim prethodnim otkrićima, sintetizira ih u skup jednadžbi nazvanih Maxwellove jednadžbe
1880.	• otkriven piezoelektrični efekt
1881.	• mjerna jedinica za elektromotornu silu je nazvana volt u čast Alessandru Volti
1883.	• izrađena prva solarna ćelija
1899.	• W. Jungner izrađuje prvu punjivu bateriju
1929.	• R. J. Van de Graaff izrađuje Van de Graaffov generator
1929.-2016.	• unaprjeđuju se razni izvori elektromotorne sile kako bi dulje trajali i bili učinkovitiji

5. Vrste izvora elektromotorne sile

Postoji nekoliko izvora elektromotorne sile u krugu, no baterija je svakako najbliža svima. S baterijom se u nastavi učenici susreću već u samim počecima rada s električnom strujom u osnovnoj školi, što se nastavlja i dalje kroz srednjoškolsko obrazovanje. Koristi se u raznim uređajima i svatko je imao prilike držati u rukama ili koristiti neki uređaj koji koristi baterije. No, kada bi se većinu ljudi danas upitalo kako baterija radi, teško da bi se dobio odgovor ili da bi odgovor bio ispravan.

Osim baterije, izvori koji daju elektromotornu silu su Van de Graaffov generator, električni generatori, transformatori, elektrokemijske ćelije, termo uređaji, piezoelektrični materijali, solarne ćelije itd. Svi ovi uređaji rade na principu indukcije ili pretvorbe jednog oblika energije u električnu potencijalnu energiju.



Slika 15. Raspodjela izvora elektromotorne sile

5.1. Pretvorba mehaničke energije u električnu

U mehaničkim izvorima, elektromotorna sila nastaje kao posljedica pretvorbe mehaničke energije u električnu. Sila izvora je mehanička sila koja vrši rad jer pokreće naboje uslijed čega dolazi do stvaranja razlike električnog potencijala na krajevima izvora i uspostave električnog polja.

5.1.1. Van de Graaffov generator

Van de Graaffov generator je izvor elektromotorne sile u kojem mehanička (neelektrična) sila F_n pomiče remen generatora i time vrši rad kojim pokreće naboje.

Princip rada Van de Graaffovog generatora zasniva se na osnovnom pravilu elektrostatike prema kojem se električni naboj predan šupljem vodiču uvijek raspoređuje po površini vodiča. Gibanje naboja suprotno električnom polju/sili postiže se dodavanjem ili oduzimanjem elektrona s remena izolatora, koji je mehanički pokrenut, dok se višak naboja prenosi dalje remenom. Naboji su na remenu vezani, stoga se ne mogu kretati u smjeru električnog polja. Za okretanje trake i prijenos naboja suprotno električnom polju potrebna je energija koja se dobiva iz uloženog rada. Rad može vršiti električni motor, benzinski motor ili čovjek koji okreće ručicu povezanu s valjkom.

Generator se sastoji od:

A metalne sfere,

B metalnog češlja 1,

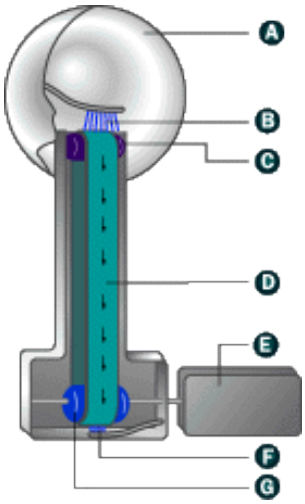
C metalnog valjka,

D gumenog remena,

E motora,

F metalnog češlja 2,

G teflonskog valjka.



Slika 16. Van de Graaffov generator

Teflonski valjak koji je u dodiru s remenom, pokretan je motorom. Zbog trenja koje se događa između valjka i gumenog remena elektroni s remena prelaze na valjak. Metalni češalj, koji se nalazi ispod teflonskog valjka, zbog djelovanja jakog električnog polja, privlači i uzemljuje elektrone s valjka ili ih prenosi na donje kućište koje je odvojeno

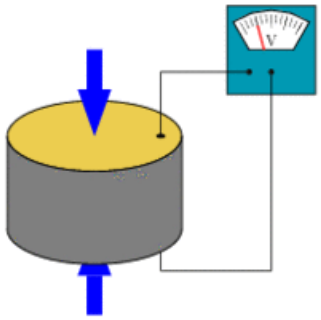
izolatorom od metalne sfere. Tako pozitivno nabijen remen dolazi do metalnog valjka. Metal je vodljive prirode i otpušta elektrone brže (lakše) nego što ih remen prihvaća tako da, nakon prolaska remena valjkom, njegova unutarnja strana će biti negativna, a vanjska neutralna ili negativna. Preko metalnog češlja, koji je u dodiru s pozitivnim remenom, elektroni s metalne sfere prelaze na remen. Kako sa sfere odlaze elektroni, sfera postaje pozitivno nabijena.

Odvajanje i prijenos naboja ne odvija se lako, jer se elektroni s remena i s teflonskog valjka odbijaju, dok ih protoni s metalnog valjka privlače. Elektroni se nastoje vratiti na pozitivan valjak, pa je potrebno uložiti rad kako bi se naboji kretali suprotno električnom polju koje djeluje na njih.

5.1.2. Piezoelektrični efekt

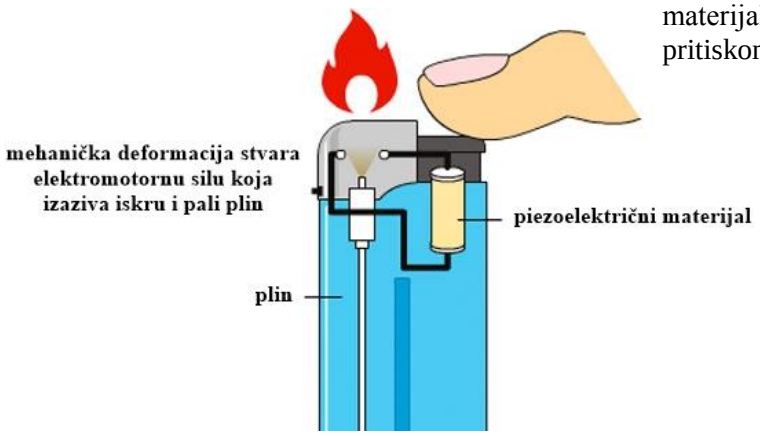
Jednostavno rečeno, piezoelektrični efekt je pojava stvaranja elektromotorne sile na površini nekih čvrstih tvari prilikom njihove mehaničke deformacije.

Mnoge tvari kao što su kvarc, topaz, kost, svila, drvo te umjetni materijali poput raznih vrsta keramike i plastike pokazuju ovo svojstvo. Danas je široko rasprostranjeno u mnogim uređajima poput tintnih pisača, transformatora, generatora, džepnih upaljača itd.



Slika 17. Dobivanje napona na krajevima piezoelektričnog materijala pod mehaničkim pritiskom

Džepni upaljač je najupotrebljivija naprava koja radi na principu piezoelektričnog efekta. Kada se upaljač pritisne, okidač s oprugom udara o komad piezoelektričnog kristala i uslijed njegove deformacije stvara se elektromotorna sila koja izaziva iskru i pali plin.



Slika 18. Piezoelektrični efekt u upaljaču

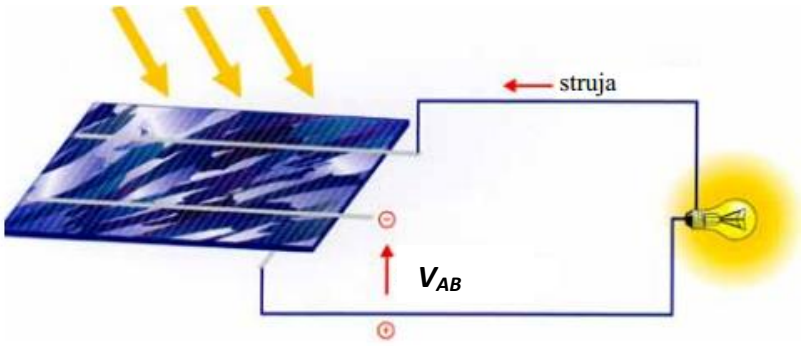
5.2. Pretvorba svjetlosne energije u električnu

U svjetlosnim izvorima, elektromotorna sila nastaje kao posljedica pretvorbe svjetlosne energije u električnu. Sila izvora je elektromagnetsko zračenje (svjetlost) koje vrši rad i tako pokreće naboje.

5.2.1. Fotoelektrični efekt

Fotoelektrični efekt je pojava kod koje djelovanjem elektromagnetskog zračenja određene valne duljine dolazi do izbijanja elektrona s površine metala. Solarna ćelija je po građi poluvodička dioda, takozvani PN-spoj. Kada se PN-spoj osvijetli, apsorbirani fotoni stvaraju parove elektron-šupljina. Ako apsorpcija nastane unutar ili blizu PN-spoja, unutarnje električno polje odvaja nastali elektron i šupljinu. Šupljina se giba prema P-strani koja postaje pozitivna, a elektron prema N-strani koja postaje negativna. Zbog skupljanja elektrona i šupljina na odgovarajućim stranama PN-spoja dolazi do pojave elektromotorne sile na krajevima solarne ćelije.

Ako su kontakti solarne ćelije spojeni s vanjskim trošilom, poteći će električna struja, a solarna ćelija postaje izvorom električne energije.



Slika 19. Fotoelektrični efekt u solarnoj ćeliji

5.3. Pretvorba kemijske energije u električnu

„Postoje u termodinamičkom smislu, višefazni elektrokemijski sistemi, koji nisu u ravnoteži i kojima se kemijska energija, koja se oslobađa dok sistem teži kemijskoj ravnoteži, može više ili manje potpuno pretvoriti u električnu energiju.“ [10]

Pretvorbom kemijske energije u električnu nastaje elektromotorna sila koja ovisi o prirodi elektroda, o ionskoj koncentraciji oko elektroda, odnosno elektrolitu, o temperaturi, ponekad i o tlaku.

Kemijski izvori koji daju elektromotornu silu mogu biti jednokratni ili višekratni. Kod jednokratnih kemijskih izvora, nakon mnogo upotreba u strujnim krugovima, elektromotorna sila opada na nižu vrijednost, jer se energija unutar izvora smanjuje, odnosno pretvori se u strujnom krugu u druge oblike energije. Osim toga, broj molekula koje sudjeluju u reakcijama je ograničen. Kemijske reakcije unutar izvora više nisu toliko učestale te izvor na polovima daje sve manju elektromotornu silu. Sa smanjenjem elektromotorne sile, unutarnji otpor izvora raste sve dok članak postane neupotrebljiv.

Kod višekratnih kemijskih izvora moguć je reverzibilan proces, u kojima se izvor može vratiti u prvobitno stanje.

5.3.1. Baterija

Sistemi u kojima se kemijska energija pretvara u električnu nazivaju se galvanski članci. Primjeri takvih članaka su: Daniellov članak, Westonov članak, suhi članak, itd. Skup od jednog ili više kemijskih članaka se naziva baterija.

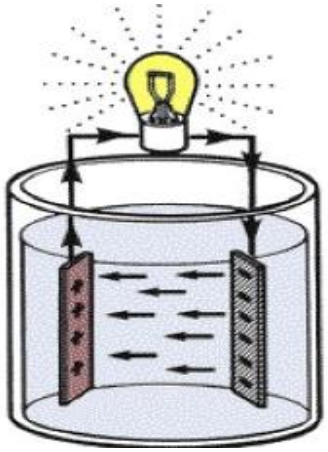
Baterije su izvor elektromotorne sile u kojima je neelektrična sila F_n povezana s procesom difuzije i različitim ionskim koncentracijama elektrolita proizašlih iz kemijskih reakcija. Kemijske reakcije koje se odvijaju na elektrodama oslobađaju ione koji se nakupljaju na elektrodama te stvaraju razliku električnog potencijala između polova (elektroda). Nastankom razlike električnog potencijala, u krugu se uspostavlja električno polje koje usmjerava slobodne nosioce naboja. Kada nosioci naboja dođu do izvora, pod utjecajem neelektrične sile prelaze s elektrode nižeg na elektrodu višeg električnog potencijala i pritom im se „povrati“ energija koju su izgubili u vanjskom krugu.

Zahvaljujući baterijama, danas postoji velik broj uređaja koji ne moraju biti vezani žicama za električnu mrežu. Na primjer prijenosna računala, ručni satovi, daljinski upravljači itd.

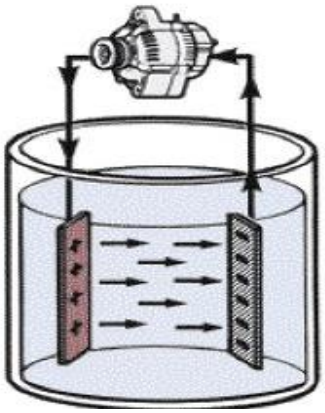
Vrlo su poznate baterije koje se ne mogu puniti - nakon što se istroše više se ne mogu vratiti u prvobitno stanje. Takve baterije se nazivaju primarne baterije. Primjer takve baterije je takozvani suhi članak, najjednostavnija i najjeftinija baterija, koja se danas

svakodnevno koristi u raznim malim prijenosnim uređajima, a i u nastavi pri spajanju strujnih krugova. No, postoje baterije koje imaju sposobnost ponovnog punjenja. Takve baterije se nazivaju sekundarne baterije i kod njih je povratna kemijska reakcija moguća. Kada se baterija istroši, obrnutim procesom pretvorbe električne energije u kemijsku, baterija se vraća u prvobitno stanje.

Takvu bateriju se može ponovo koristiti kao izvor elektromotorne sile. Međutim to ne znači da je vijek trajanja takvih baterija beskonačan. Primjeri takvih baterija su baterije koje se koriste za mobitele, baterije prijenosnih računala, akumulatori itd.



Slika 20. Pražnjenje baterije



Slika 21. Punjenje baterije

a) Westonov članak

Pozitivna elektroda je živa prekrivena živinim sulfatom, a negativna elektroda je kadmijev amalgam prekriven kadmijevim sulfatom. Elektrolit je vodena otopina kadmijeva sulfata, a spoj s elektrodama ostvaren je utaljenim platinskim žicama.

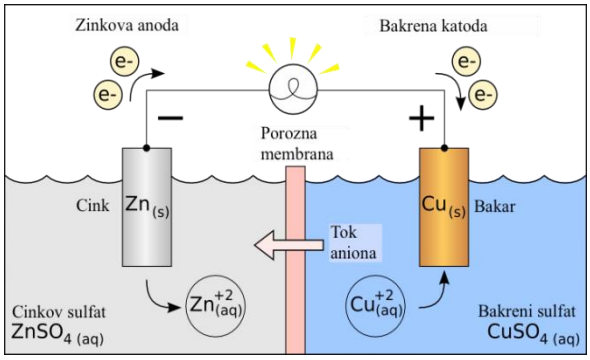
U Westonovom članku se odvijaju jednostavni kemijski procesi. Na određenoj temperaturi članak daje vrlo točnu i stalnu elektromotornu silu, stoga se koristi kao naponska norma (etalon) i naziva se još normalnim člankom.

Westonov članak sa zasićenim elektrolitom daje pri sobnoj temperaturi (20 °C) i malim strujama stalnu elektromotornu silu od 1,01865 V.

b) Daniellov članak

Članak se sastoji od komada cinka djelomično uronjenog u otopinu cinkovog sulfata koji čini negativnu elektrodu i komada bakra djelomično uronjenog u otopinu bakrovog sulfata koji čini pozitivnu elektrodu. Obje otopine se nalaze u istoj posudi razdvojene keramičkom poroznom membranom.

Ako se u ispravnim postocima upotrijebe otopine, između pločice cinka i pločice bakra javlja se elektromotorna sila koja se može mjeriti pomoću osjetljivog mjernog instrumenta. Elektromotorna sila Daniellovog članka iznosi 1,08 V.

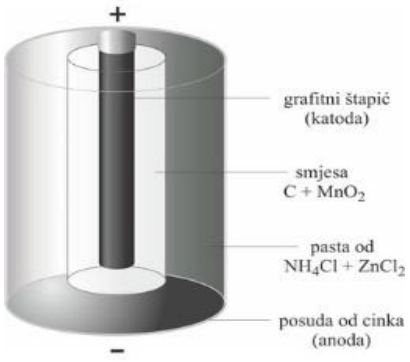


Slika 22. Daniellov članak, kemijske reakcije u članku i tok struje elektrona (stvaran)

c) Suhi članak

Članak koji se danas najviše upotrebljava kao mali prijenosni izvor električne energije i za upoznavanje učenika sa strujnim krugovima u školi je suhi članak. Članak se sastoji od pozitivnog pola koji čini elektroda od ugljika (grafit), negativnog pola od cinka i pastom koja sadrži cinkov i amonijev klorid. Pasta je zamijenila tekući elektrolit zato se i članak naziva suhi.

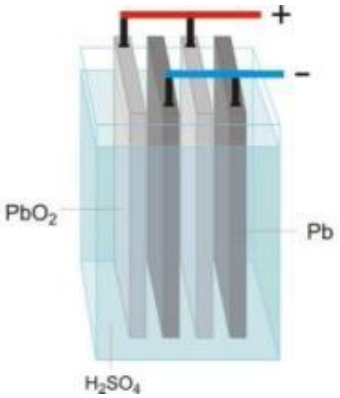
Elektromotorna sila novog suhog članka iznosi približno 1,5 V.



Slika 23. Dijelovi suhog članka

d) Olovni akumulator

Negativna elektroda akumulatora je olovna ploča pokrivena poroznim slojem olova, a pozitivna elektroda je olovna ploča pokrivena poroznim slojem olovnog (IV) oksida. Ploče su uronjene u vodenu otopinu sumporne kiseline.



Slika 24. Dijelovi olovnog akumulatora

Olovni akumulator ima vrlo značajnu ulogu kod automobila. Kemijske reakcije unutar akumulatora pretvaraju se u električnu energiju potrebnu za paljenje motora automobila, a tijekom rada motora razvija se energija kojom se natrag puni akumulator te se vraća u prvobitno stanje.

Elektromotorna sila koju daje jedan članak akumulatora iznosi oko 2 V. Akumulator ima ukupno šest serijski spojenih članaka koji daju ukupnu elektromotornu silu od 12 V.

5.4. Pretvorba toplinske energije u električnu

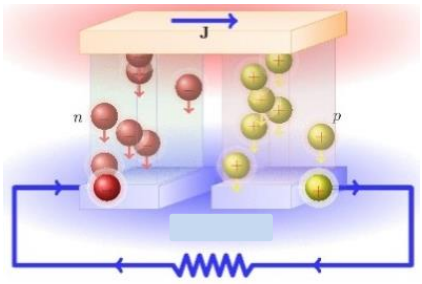
U toplinskim izvorima, elektromotorna sila nastaje kao posljedica pretvorbe toplinske energije u električnu. Sila izvora koja nastaje kao posljedica različitih temperatura na krajevima izvora vrši rad i tako pokreće naboje.

5.4.1. Termoelektrični efekt (Seebeckov efekt)

U zatvorenoj petlji sastavljenoj od dva materijala čiji se spojevi nalaze na različitim temperaturama, javlja se električna struja. Ta struja je posljedica razlike električnog potencijala, koja se još naziva i termo elektromotorna sila. Zbog razlike u temperaturi unutar petlje dolazi do toka energije (i struje) od toplijeg prema hladnijem kraju vodiča. Nosioci naboja u toplijem dijelu imaju veće brzine od onih u hladnijem dijelu pa dolazi do termo difuzije. Termo difuzija uzrokuje nakupljanje naboja na krajevima svakog materijala, odnosno nastanak termo elektromotorne sile i uspostavu električnog polja.

Termo elektromotorna sila ovisi o kombinaciji materijala u termočlanku i o temperaturi materijala.

Instrument koji se temelji na principu termo elektromotorne sile naziva se termo element.



Slika 25. Termoelement u strujnom krugu



Slika 26. Seebeckov efekt

5.5. Elektromagnetska indukcija

Elektromagnetska indukcija je pojava da se u vodiču inducira elektromotorna sila uslijed promjene magnetskog toka u kojem se vodič nalazi. Vodičem može postati bilo što izrađeno od vodljivog materijala: prsten, vodljivi štap, zavojnica itd.

Elektromagnetska indukcija je jedan od najučestalijih izvora električne energije danas. Odvija se na principu Faradayevog zakona indukcije:

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (24)$$

Inducirana elektromotorna sila $\mathcal{E}$ u zatvorenoj petlji jednaka je negativnoj brzini promjene magnetskog toka Φ kroz petlju.

Ako se u strujnom krugu umjesto petlje nalazi zavojnica s N identičnih namotaja i tok se mijenja istom brzinom kroz svaki namotaj, ukupna brzina promjene magnetskog toka kroz sve namotaje je N puta veća nego za pojedinačni namotaj. Ako je Φ tok kroz pojedinačni namotaj, tada je ukupna elektromotorna sila u zavojnici s N namotaja:

$$\mathcal{E} = -N \cdot \frac{d\Phi}{dt} \quad (25)$$

Magnetski tok Φ ovisi o magnetskom polju $\vec{B}$, površini koja se nalazi u magnetskom polju $\vec{A}$ i kutu između polja i površine:

$$\Phi = \vec{B} \cdot \vec{A} \quad (26)$$

Stoga, do promjene magnetskog toka i induciranja elektromotorne sile može doći na različite načine:

- Promjenom magnetskog polja u stacionarnom krugu (nema promjene kuta ni površine)
- Promjenom površine petlje u homogenom magnetskom polju bez promjene kuta između vektora polja i vektora površine
- Promjenom kuta između vektora površine i homogenog magnetskog polja

Moguće je odrediti smjer inducirane elektromotorne sile, a time i smjer inducirane struje koristeći jednadžbu (24) zajedno sa nekoliko jednostavnih pravila (pravilo desne ruke), no puno je jednostavnije koristiti *Lenzovo pravilo*.

Lenzovo pravilo je metoda za određivanje smjera inducirane elektromotorne sile i smjera inducirane struje u strujnom krugu. Nije nezavisan princip određivanja, već se izvodi iz Faradayevog zakona. Daje uvijek isti smjer i predznak kao i Faradayev zakon. Lenzovo pravilo kaže da je smjer elektromagnetske indukcije takav da se suprotstavi uzroku promjene zbog koje je došlo do indukcije (minus u jednadžbama).

Priroda ne podnosi promjenu toka. Pri smanjenju magnetskog toka, struja će se inducirati u smjeru poništavanja te promjene, dakle u smjeru koji bi povećao tok. A kada se magnetski tok povećava, struja će se inducirati u smjeru smanjenja toka. Elektromagnetska indukcija je fenomen koji želi održavati stalan tok kroz sebe.

Iako se inducirana elektromotorna sila $\mathcal{E}$, odnosno inducirana struja *I*, suprotstavlja bilo kojoj promjeni magnetskog toka, kroz krug ne dolazi do potpunog poništenja promjene toka.

Lenzovo pravilo samo daje smjer inducirane struje, a iznos struje ovisi o otporu *R* unutar kruga:

$$I = \mathcal{E} \cdot \frac{1}{R} \qquad (27)$$

Što je veći otpor unutar kruga, manja je inducirana struja koja se suprotstavlja promjeni toka i tada promjena toka ima veći efekt.

Zbog otpora u strujnom krugu, struja će teći krugom sve dok postoji promjena magnetskog toka. Kada promjene toka više nema, ne dolazi do induciranja elektromotorne sile koja tjera naboje kroz krug i daje im energiju. Naboji predaju svoju energiju otporu i nakon kratkog vremena struja opada na nulu.

Poseban slučaj se javlja kada je otpor u strujnom krugu nula (supravodiči). Tada će inducirana struja teći čak i kada inducirana elektromotorna sila nestane, odnosno kada ne dolazi više do promjene magnetskog toka.

5.5.1. Pokretačka elektromotorna sila

Jedan od najučestalijih izvora elektromotorne sile koji radi na principu elektromagnetske indukcije je električni generator. Vremenski promjenjivo magnetsko polje unutar generatora inducira elektromotornu silu.

Razdvajanje naboja se odvija unutar generatora, uz tok nosioca naboja od jednog kraja prema drugom ako je strujni krug zatvoren. U slučaju otvorenog strujnog kruga, toka nosioca naboja će biti sve dok se ne stvori „toliko polja“ u smjeru suprotnom električnom (Coulombovom) polju kako bi dodatno razdvajanje naboja bilo nemoguće, odnosno kako bi ukupno polje u krugu bilo nula (13).

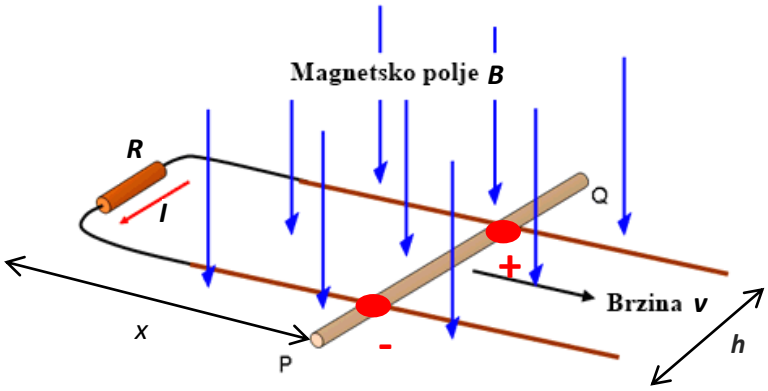
Postoje različite vrste električnih generatora. Na primjer zavojnica koja miruje u vremenski promjenjivom magnetskom polju, jednostavan alternator (generator izmjenične struje) koji radi na principu rotiranja vodljive petlje oko osi u konstantnom magnetskom polju, generator istosmjerne struje koji također radi na principu promjene kuta θ, vodljivi štap koji se kreće po vodljivim tračnicama itd.

Vodljivi štap koji se kreće po vodljivim tračnicama je najjednostavniji oblik električnog generatora. Radi na principu takozvane pokretačke elektromotorne sile. Do induciranja elektromotorne sile $\mathcal{E}$ u štapu i induciranja struje u petlji dolazi zbog promjene površine petlje ΔA u homogenom magnetskom polju B, pri nepromijenjenom kutu θ između vektora površine i vektora polja. Površina se mijenja zbog povlačenja vodljivog štapa stalnom brzinom v, te se pritom mijenja duljina petlje za Δx, dok širina petlje h ostaje nepromijenjena. Stoga inducirana elektromotorna sila će biti jednaka:

$$\mathcal{E} = - v \cdot B \cdot h \quad (28)$$

Inducirana elektromotorna sila će u štapu stvoriti razliku električnog potencijala, a time i električno polje koje će usmjeravati naboje na kretanje te će nastati inducirana struja. Inducirana struja će biti takvog smjera da će pokušati poništiti promjenu toka zbog koje je došlo do induciranja struje, kao što je već opisano u poglavlju 5.5. Štap će se u tom slučaju ponašati kao baterija, jer će se na njemu pojaviti kraj višeg (+) i nižeg (-) električnog potencijala, a unutar štapa će se pod djelovanjem neelektrične sile događati obavljanje rada

kako bi se pokrenuli naboji i prenijeli s kraja nižeg prema kraju višeg električnog potencijala.



Slika 27. Vodljivi štap kao izvor elektromotorne sile

Da bi došlo do razdvajanja naboja u štapu, potrebno je izvršiti rad kojim se pokrenu naboji. Iako u magnetskom polju djeluje magnetska sila na naboje te je odgovorna za uspostavu elektromotorne sile, ona ne vrši nikakav rad. S obzirom na to da je za uspostavu elektromotorne sile potrebna sila koja vrši rad, u krugu treba postojati takva sila koja će obavljenim radom „stvoriti“ energiju potrebnu za razdvajanje naboja. Osoba ili uređaj koji povlači vodljivi štap stalnom brzinom i pritom obavlja rad je zaslužna za energiju u krugu. [3][8]

5.5.2. Samoindukcija i međuindukcija

Induciranje elektromotorne sile u vodljivoj petlji ili zavojnici može se javiti i prilikom prolaska promjenjive struje kroz njih. Promjenjiva struja uzrokovat će promjenu magnetskog polja, a time i magnetskog toka. Ta promjena uzrokuje pojavu inducirane struje po Lenzovom pravilu. Budući da tu indukciju uzrokuje vlastito promjenjivo polje vodljive petlje ili zavojnice, ona se naziva *samoindukcija*. U vodljivoj petlji inducirat će se elektromotorna sila:

$$\mathcal{E} = - L \cdot \frac{dI}{dt} \quad (29),$$

gdje je L induktivitet vodljivog prstena ili zavojnice, a $\frac{dI}{dt}$ je promjena struje u vremenu.

Međuindukcija je pojava kod koje se zbog promjene jakosti struje, a time i magnetskog toka, u jednom strujnom krugu – primaru, inducira elektromotorna sila u drugom strujnom krugu – sekundaru i njime poteče inducirana struja.

Ako kroz primar teče struja I_1 koja stvara tok Φ_{12}, inducirana elektromotorna sila $\mathcal{E}_2$ u sekundaru će biti:

$$\mathcal{E}_2 = -N_2 \cdot \frac{d\Phi_{12}}{dt} = M_{12} \cdot \frac{dI_1}{dt} \quad (32),$$

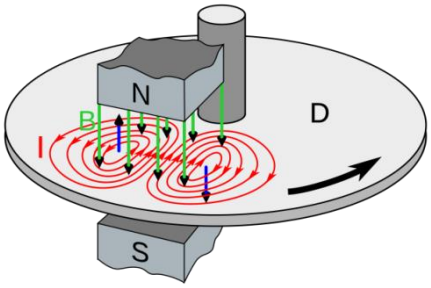
gdje je M_{12} koeficijent međuindukcije, a ovisi o geometriji prostora i materijalu zavojnice.

Na principu međuindukcije radi transformator. Kod idealnog transformatora, odnosi elektromotornih sila primara $\mathcal{E}_P$ i sekundara $\mathcal{E}_S$ su proporcionalni omjeru broja navoja N:

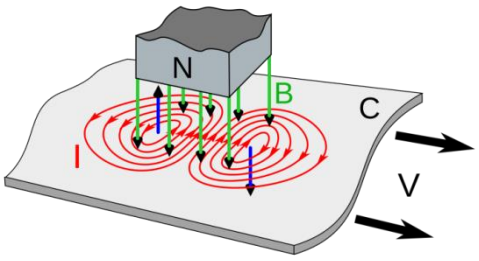
$$\mathcal{E}_P \cdot N_S = \mathcal{E}_S \cdot N_P \quad (33)$$

5.5.3. Vrtložne struje

Svima su poznati slučajevi dobro definiranih, ograničenih struja na strujne krugove, no puno električne opreme sadrži mase metala koje se kreću u magnetskom polju ili se nalaze u promjenjivom magnetskom polju. U takvim situacijama dolazi do induciranja elektromotornih sila, a time i induciranih struja koje cirkuliraju kroz volumen vodljivog materijala i nisu ograničene na neko usko i maleno područje. Zbog izgleda tih induciranih struja, koje nalikuju na vrtloge, takve struje se nazivaju vrtložne struje. Često se još nazivaju i Foucaultove struje, po fizičaru Léon Foucaultu koji ih je otkrio.



Slika 30. Vrtložne struje u dijelu metalnog diska koji prolazi kroz magnetskoo polje



Slika 31. Vrtložne struje u dijelu metalne ploče koja prolazi kroz magnetsko polje

Vrtložne struje su električne struje velike jakosti, koje nastaju u unutrašnjosti metalnih vodiča podvrgnutih djelovanju magnetskog polja. Nepoželjne su u električnim strojevima poput električnih generatora i transformatora jer zagrijavaju metalnu armaturu dovodeći do gubitaka energije i povišenja radne temperature stroja. Osim nepoželjnih učinaka, mogu se i korisno upotrijebiti, a primjer za to su indukcijske peći, elektrodinamički prigušivači, elektromagnetske kočnice na vozilima itd.

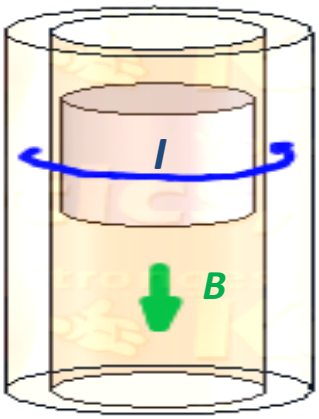
Smjer inducirane elektromotorne sile, odnosno induciranih vrtložnih struja, može se također odrediti pomoću Lenzovog pravila.

Vrtložne struje su izrazito teške za računanje, ali lagane i zanimljive za demonstrirati. Postoje zanimljivi pokusi s vrtložnim strujama koji se mogu provesti u školi s učenicima kao što su na primjer metalno njihalo koje prolazi kroz magnetsko polje ili magnet koji se ubaci u usku metalnu cijev.

- *Pokus 1. Magnet koji se ubaci u usku metalnu cijev*:

U uski šuplji valjak od nekog vodljivog materijala ubaci se komadić metala. Metal pada kroz valjak gotovo slobodnim padom, jedino ga usporava otpor zraka. No ako se pusti da pada jaki magnet, magnet će padati vrlo sporo.

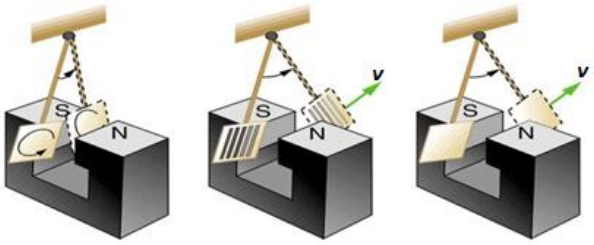
U valjku će se zbog promjenjivog magnetskog polja inducirati elektromotorna sila to jest vrtložne struje koje žele poništiti promjenu koja ih je izazvala, stoga će magnet jako usporavati.



Slika 32. Smjer vrtložnih struja i magnetsko polja u tubi kroz koju pada magnet

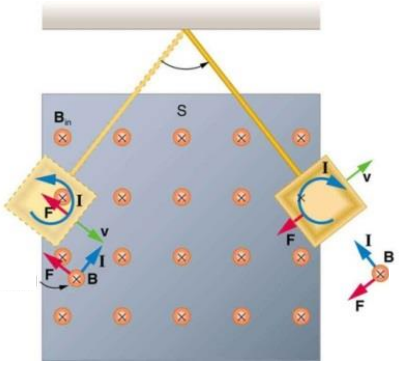
- *Pokus 2. Njihalo koje prolazi kroz magnetsko polje:*

Ako je njihalo koje prolazi kroz magnetsko polje metalno, zbog nastanka jakih vrtložnih struja, doći će do naglog usporavanja njihala u trenutku kada njihalo uđe u područje magnetskog polja (Slika 33. (a)). Međutim, ako se u metalu njihala načine prorezi (Slika 33. (b)) doći će do smanjenja vrtložnih struja, a time i smanjenja gušenja, odnosno usporavanja njihala. Ako je njihalo izrađeno od izolatora (Slika 33. (c)), elektromotorna sila će se inducirati, no neće doći do pojave vrtložnih struja jer je za tok struje potreban vodljivi materijal.

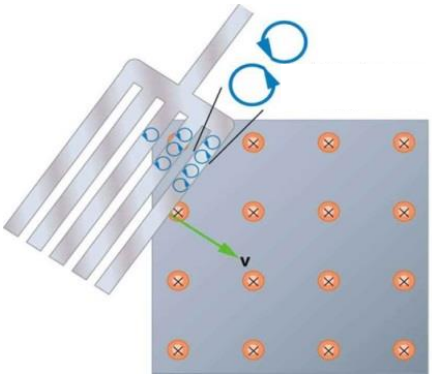


Slika: 33. Prolaz vodljive ploče bez proreza (a), vodljive ploče s prorezima (b) i izolatora (c) u magnetskom polju

Kada metal s prorezima ulazi u magnetsko polje, elektromotorna sila se inducira zbog povećanja magnetskog toka. Inducirana elektromotorna sila je manje učinkovita jer prorezi smanjuju veličinu petlje, time i jakost induciranih vrtložnih struja. Također susjedne strujne petlje imaju suprotne smjerove kretanja i njihov se učinak poništava.

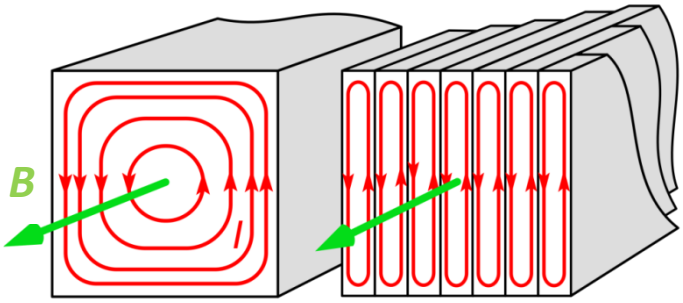


Slika 34. Smjer sile i smjer inducirane vrtložne struje kada vodljiva ploča bez proreza prolazi kroz magnetsko polje



Slika 35. Smjer induciranih vrtložnih struja kada vodljiva ploča s prorezima prolazi kroz magnetsko polje

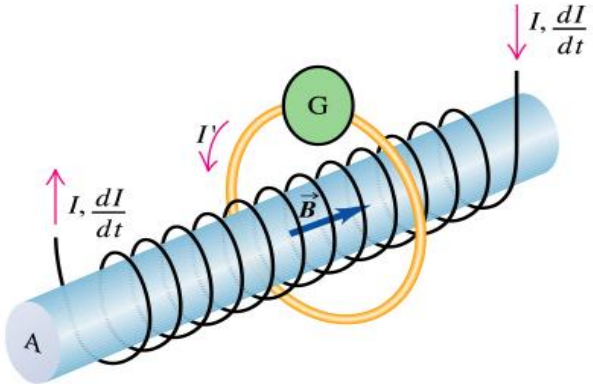
Kako bi se smanjile ili oslabile vrtložne struje u vodljivim materijalima, potrebno je napraviti proreze po materijalu ili izraditi metalne dijelove električnih strojeva od tankih slojeva vodljivog materijala međusobno odvojenih izolacijskim pločama.



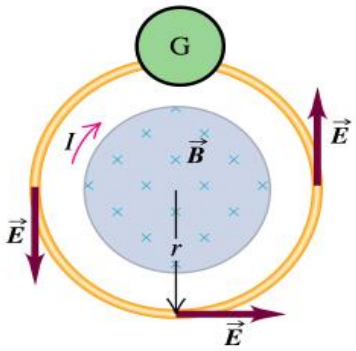
Slika 36. Vrtložne struje u metalu bez izolacijskih slojeva (lijevo) i sa izolacijskim pločama (desno)

5.5.4. Inducirano električno polje

Ako se vodljivim prstenom okruži elektromagnet kroz koji teče struja koja se mijenja u vremenu, tada se mijenja i magnetski tok kroz petlju te se u vodljivoj petlji inducira elektromotorna sila. U petlji se javlja inducirano električno polje prouzrokovano promjenjivim magnetskim tokom koje se naziva neelektrostatsko (rotacijsko) polje.



Slika 28. Kružna vodljiva petlja u promjenjivom magnetskom polju elektromagneta



Slika 29. Smjer inducirane struje i neelektrostatskog električnog polja u kružnoj petlji

Faradyev zakon je valjan za dvije različite situacije. U jednoj je elektromotorna sila inducirana djelovanjem magnetske sile na naboje kada se vodič kreće kroz magnetsko polje. U drugoj situaciji, vremenski promjenjivo magnetsko polje inducira električno polje u stacionarnom vodiču i zbog toga se inducira elektromotorna sila. Električno polje će se inducirati čak i ako nema vodiča.

Neelektrostatsko električno polje se razlikuje od elektrostatskog polja. Neelektrostatsko polje nije konzervativno, linijski integral električnog polja po zatvorenom putu je različit od nule. Kada se naboj kreće kroz zatvoreni strujni krug, polje vrši rad različit od nule i tako inducira elektromotornu silu:

$$\varepsilon = \oint \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (30)$$

Za takvo polje koncept električnog potencijala nema smisla.

Također, ovako inducirano električno polje nema izvor niti ponor kao što ima električno polje proizvedeno od naboja, već je to polje tangencijalno na svaku točku petlje.

U slučaju kružne petlje, polje je kružno, a inducirana struja u petlji teče u smjeru induciranog električnog polja.

Elektrostatsko polje je uvijek konzervativno i vezano uz funkciju električnog potencijala. Unatoč razlikama elektrostatskog i neelektrostatskog polja, fundamentalni efekt bilo kojeg električnog polja je vršenje sile iznosa:

$$\vec{F} = Q \cdot \vec{E} \quad (31)$$

Ova relacija je valjana kad god je električno polje konzervativno polje proizvedeno od distribucije naboja ili nekonzervativno polje uzrokovano promjenjivim magnetskim tokom.

Dakle, postoje dvije vrste električnog polja koja nastaju na dva različita načina, baš kao što i predviđaju (1) i (3) Maxwellova jednadžba.

6. Učeničke poteškoće vezane uz elektromotornu silu i strujne krugove

S pojmom elektromotorne sile učenici se prvi put susreću u srednjim školama.

U općim gimnazijama se elektromotorna sila obrađuje kao izborni sadržaj, a u prirodoslovnim gimnazijama i strukovnim školama tehničkog usmjerenja je obavezan sadržaj. Elektromagnetska indukcija je obavezna u osnovnim školama, u gimnazijama i u tehničkim školama.

S obzirom na to da je elektrodinamika jedno od težih gradiva za učenike, uz njega se vežu brojne alternativne koncepcije i pogrešni zaključci. Neki od njih će pobliže biti objašnjeni u nastavku:

a) Struja se „troši“ u strujnom krugu

Česta je učenička miskoncepcija da, u zatvorenom strujnom krugu, struja krene u krugu s pozitivnog kraja izvora i dođe na negativan kraj trošeći se u vremenu. Također učenici često misle da trošila troše struju, tj. da struja nije jednake jakosti prije i poslije trošila.

Naravno, struja je ista u svakoj točki jednostavnog strujnog kruga, čak i ako su debljine vodiča različite u različitim dijelovima kruga ili ako se u strujnom krugu nalaze trošila.

b) Baterija je izvor struje

Još jedna učenička miskoncepcija vezana za elektromotornu silu i strujne krugove je da baterija ili drugi izvori elektromotorne sile uvijek daju istu struju u zatvorenom strujnom krugu bez obzira što je sve spojeno u krugu. Izvor elektromotorne sile u danom krugu uvijek daje jednak napon na priključnicama, a struja ovisi o otporima u vanjskom i unutarnjem krugu.

c) Vezanje inducirane elektromotorne sile s tokom

Već je spomenut problem koji se javlja pri nerazumijevanju promjene magnetskog toka, kao i općenito značenje Δ, a posebno u elektromagnetizmu, gdje direktno učenici i studenti vežu induciranu elektromotornu silu s magnetskim tokom, a ne s promjenom toka.

Ukoliko je magnetski tok konstantna vrijednost, bilo pozitivna, negativna ili nula, neće doći do induciranja elektromotorne sile. Do indukcije dolazi samo ako postoji promjena magnetskog toka.

d) Vezanje inducirane elektromotorne sile sa strujom

Slično, prethodnoj poteškoći, tako se opet javlja problem vezanja inducirane elektromotorne sile direktno s jakosti struje, a ne s brzinom promjene struje. Do induciranja elektromotorne sile će doći jedino ako postoji promjena struje u vremenu.

Stalna struja u jednoj zavojnici, koliko god jaka bila, ne može inducirati elektromotornu silu, a ni struju u obližnjoj zavojnici.

e) Elektromotorna sila i napon su isto

Velik problem nerazumijevanja elektromotorne sile javlja se ne samo kod učenika već i njihovih predavača. Elektromotornu silu izjednačavaju s mehaničkom silom (zbog naziva), ali i električnim naponom (zbog nerazumijevanja rada u vanjskom i unutarnjem dijelu strujnog kruga).

Kao što je već rečeno u poglavlju *3.3.*, elektromotorna sila nije sila (koja se mjeri u njutnima), niti su elektromotorna sila i napon jednaki. Mogu biti jedino jednaki iznosom i to u slučaju kada je strujni krug otvoren ili ako je u strujnom krugu spojen idealan izvor elektromotorne sile.

7. Zaključak

Elektromotorna sila je linijski integral sile izvora po jediničnom naboju preko cijelog strujnog kruga. Može se definirati i kao rad obavljen od sile izvora kako bi se jedinični naboj gibao od mjesta nižeg prema mjestu višeg električnog potencijala unutar izvora. Da bi rad unutar izvora bio moguć, u izvorima elektromotorne sile dolazi do pretvorbe jednoga oblika energije (kemijske, mehaničke, svjetlosne, itd.) u električnu energiju.

Elektromotorna sila je temelj brojnih električnih uređaja. Unatoč tome, mnogi ne znaju kako radi baterija – najviše korišten izvor elektromotorne sile. Problem nerazumijevanja elektromotorne sile široko je rasprostranjen, a time i neshvaćanje principa rada raznih izvora elektromotorne sile.

Problem nerazumijevanja kreće već u prošlosti kada se mislilo da je elektromotorna sila mehanička sila (koja se mjeri u njutnima). Zbog tog je mišljenja elektromotornoj sili, koja u pravilu nije sila već napon, nadjenut taj naziv koji se koristi i danas iako je pogrešan. Osim naziva, uz elektromotornu silu vežu se i drugi problemi poput izjednačavanja elektromotorne sile s električnim naponom u vanjskom dijelu strujnog kruga, mišljenja da se u strujnom krugu struja „troši“, da su izvori elektromotorne sile izvori koji uvijek daju istu struju, vezanja inducirane elektromotorne sile s magnetskim tokom, a ne promjenom toka itd.

Svi ovi problemi su bili motivacija za izradu rada. Stoga je u radu detaljno objašnjeno što je elektromotorna sila, opisani su izvori elektromotorne sile, navedeni primjeri iz svakodnevnog života te su razjašnjene temeljne učeničke poteškoće vezane uz strujne krugove i elektromotornu silu.

S obzirom na to da se učenici tijekom obrazovanja susreću s elektromotornom silom u nastavi fizike, rad se može iskoristiti kao dodatna literatura u srednjim školama (za učenike koji žele znati više), ali i kao literatura nastavnicima i edukatorima za pripremu nastave.

8. Literatura

[1] Battery Facts, http://www.batteryfacts.co.uk/index.html, listopad, 2016.

[2] Brković, N.; Pećina, P. Fizika u 24 lekcije, 3. Izdanje, Zagreb: Element, 2013.

[3] Griffiths, D. J. Introduction to electrodynamics. 3rd ed. New Jersey: Prentice Hall, 1999.

[4] Guisasola, J.; Garzón, I.; De Cock, M. The concept of electromotive force in the context of direct-current circuits. Student`s difficulties and guidelines for teaching., http://www.univ-reims.fr/site/evenement/girep-icpe-mptl-2010-reims-international-conference/gallery_files/site/1/90/4401/22908/29321/29506.pdf, listopad, 2016.

[5] Jacobs, R.; De Salazar, A.; Nassar, A. New experimental method of visualizing electric field due to surface charges on circuit elements. // American Journal of Physics. Vol. 78, 12 (2010), str. 1432 – 1433

[6] Kokanović, I. Seebeckov efekt, http://www.phy.pmf.unizg.hr/~kivan/Seebecoveffect.htm, listopad 2016.

[7] Majdandžić, Lj. Fotonaponski sustavi, http://www.solarni-paneli.hr/pdf/01_handbook_fotonapon.pdf, listopad 2016.

[8] Mosca, E. P. Magnetic force doing work? // American Journal of Physics. Vol. 42 (1973), str. 295 – 297

[9] Paar, V., Šips V. Fizika 2, udžbenik za drugi razred gimnazije. Zagreb: Školska knjiga, 2007.

[10] Paić, M. Osnove fizike III, elektricitet i magnetizam. Zagreb: Sveučilišna naklada Liber, 1989.

[11] Pinter, V. Osnove elektrotehnike, knjiga prva. Zagreb: Tehnička knjiga, 1970.

[12] Purcell, E. M. Elektricitet i magnetizam. Svezak 2. Zagreb: Tehnička knjiga, 1988.

[13] Roberts, D. How batteries work: A gravitional analog. // American Journal of Physics. Vol. 51, 9 (1983), str. 829 – 831

[14] Sears, F. W. Elektricitet i magnetizam. Beograd: Naučna knjiga, 1963.

[15] Young, H. D.; Freedman, R. A. Sears and Zemansky`s university physics with modern physics. 12th ed. San Francisco: Pearson Addisson – Wesley, 2008.

[16] Zbirka fizičkog zavoda, http://www.phy.pmf.unizg.hr/zbirka/myweb10/scaned/Van_de_Graff.pdf, listopad 2016.