

# Fizikalne karakteristike elektromagnetskog onečišćenja

---

Šegota, Iva

Undergraduate thesis / Završni rad

2015

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Karlovac University of Applied Sciences / Veleučilište u Karlovcu**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:519693>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-30**



**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**  
Karlovac University of Applied Sciences

Repository / Repozitorij:

[Repository of Karlovac University of Applied Sciences - Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJ

**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**  
**ODJEL SIGURNOSTI I ZAŠTITE NA RADU**  
**STUDIJ SIGURNOSTI I ZAŠTITE**

**IVA ŠEGOTA**

**FIZIKALNE KARAKTERISTIKE ELEKTROMAGNETSKOG  
ONEČIŠĆENJA**

**ZAVRŠNI RAD**

**Mentor:**

**Slaven Lulić, dipl. ing.**

**KARLOVAC, 2015.**

## **SAŽETAK**

Ovaj rad će opisati nastanak magnetskog polja i njegovo djelovanje na električnu struju. Također rad opisuje elektromagnetsku indukciju (njezin nastanak i djelovanje) koja je povezana sa samom temom rada a to je elektromagnetsko onečišćenje. U svrhu ovog rada pokušati će se objasniti pojam elektromagnetskog onečišćenja i njegovo djelovanje na čovjeka.

## **KLJUČNE RIJEČI**

Magnetsko polje, magnetizam, električna struja, elektromagnetska indukcija, elektromagnetsko onečišćenje

## **ABSTRACT**

This paper will describe the formation of the magnetic field and its effect on electricity. Also work describes electromagnetic induction (its origin and effect) which is connected to the theme of work and it is electromagnetic pollution. The purpose of this study will try to explain the concept of electromagnetic field and its effect on humans.

## **KEY WORDS**

Magnetic field, magnetism, electricity, electromagnetic induction, electromagnetic pollution

## SADRŽAJ:

1. UVOD .....	1
2. MAGNETSKO POLJE I NJEGOVO DJELOVANJE NA ELEKTRIČNU STRUJU .	2
2.1. POVIJESNI OSVRT .....	2
2.2. MAGNETSKO POLJE I MAGNETSKA INDUKCIJA .....	4
2.3. SILA NA NABOJ U GIBANJU .....	7
2.4. SILA NA VODIČ KOJIM TEČE STRUJA.....	9
3. MAGNETSKO POLJE NABOJA U GIBANJU I ELEKTRIČNE STRUJE.....	12
3.1. MAGNETSKO POLJE ELEMENTA STRUJE. BIOT – AMPEREOV ZAKON .....	12
3.2. POLJE RAVNOG VODIČA.....	16
3.3. SILA IZMEĐU DVA VODIČA KOJIMA TEČE STRUJA. AMPER.....	18
4. ELEKTROMAGNETSKA INDUKCIJA .....	20
4.1. UVOD .....	20
4.2. ELEKTROMAGNETSKA INDUKCIJA U VODIČU KOJI SE GIBA U MAGNETSKOM POLJU .....	21
4.3. PRAVILO DESNE RUKE.....	24
5. ELEKTROMAGNETSKO ZRAČENJE .....	25
5.1. PODJELA UČINAKA ZRAČENJA NA ZDRAVLJE.....	27
5.2. ELEKTROMAGNETSKO ONEČIŠĆENJE .....	28
6. ZAKLJUČAK.....	29
LITERATURA.....	30

## Popis slika:

Slika br. 2.1 Na iglu kompasa (a) i na zavojnicu kojom teče struja (b) djeluje struja koja teče obližnjim vodičem.....	5
Slika br. 2.2 Sila na naboj koji se giba u homogenom magnetskom polju.....	7
Slika br. 2.3 Pravilo lijeve ruke za određivanje smjera djelovanja sile na naboj u gibanju.....	8
Slika br. 2.4 Sila na ravni vodič dužine $l$ koji se nalazi u magnetskom polju indukcije $B$ .....	9
Slika br. 3.1 Magnetsko polje elementa struje.....	13
Slika 3.2 Magnetsko polje oko ravnog vodiča.....	16
Slika br. 3.3 Sila između dva duga usporedna vodiča; uz definiciju ampera.....	18
Slika br. 4.1 Gibanje vodiča u homogenom magnetskom polju.....	21
Slika br. 4.2 Pravilo desne ruke za smjer inducirane struje.....	24
Slika br. 5.1. Elektromagnetski valovi.....	26



## 1. UVOD

Cilj ovog rada je objasniti utjecaj elektromagnetskog zračenja na čovjeka i njegovu okolinu. Predmet ovog rada je elektromagnetsko onečišćenje koje se javlja kao posljedica elektromagnetskog zračenja.

Rad je podijeljen u pet poglavlja. U prvom poglavlju se daje povijesni osvrt o otkrivanju pojedinih pojava i pojmova vezanih za magnetizam, elektricitet, magnetsko polje i elektromagnetsku indukciju. Navode se imena i otkrića znanstvenika koji su svojim istraživanjima i eksperimentima doprinijeli tim otkrićima bez kojih je današnji život ljudi nezamisliv.

U drugom poglavlju se govori općenito o magnetskom polju i njegovom djelovanju na električnu struju. Opisuju se pojmovi magnetskog polja i magnetske indukcije, te sile koje djeluju na naboj u gibanju i vodič kojim teče struja.

U trećem poglavlju se govori o magnetskom polju naboja u gibanju i električne struje. Objašnjava se Biot – Ampereov zakon.

U četvrtom poglavlju se objašnjava elektromagnetska indukcija – elektromagnetska indukcija u vodiču koji se giba u magnetskom polju i pravilo desne ruke.

U posljednjem petom poglavlju se općenito opisuje elektromagnetsko zračenje te se navode učinci elektromagnetskog zračenja na zdravlje čovjeka. Govori se o povezanosti elektromagnetskog zračenja sa elektromagnetskim onečišćenjem.

## **2. MAGNETSKO POLJE I NJEGOVO DJELOVANJE NA ELEKTRIČNU STRUJU**

### **2.1. POVIJESNI OSVRT**

Iako su magnetske pojave bile poznate još u starom svijetu, prvi detaljni opis magnetskih pojava potječe iz 1600. godine, a nalazimo ga u djelu Williama Gilberta „De magnete“.

Stari Grci su još prije Nove ere uočili pojavu da neke željezne rude privlače željezo. Kako su se te rude kopale u blizini antičkog grada Magnezija, nazvane su magnetima. Također postoji i priča o pastiru Magnesu, koji je imao obuću potkovanu željeznim čavlima. Ti su se čavli hvatali za tlo dok je hodao, i tako je, prema legendi, otkriven magnetizam. Na drugom kraju svijeta, u Kini, jedan zapis iz 121. god.pr.n.e. kaže da željezni štapovi, kada ih se dovede u blizinu ruda koje se danas nazivaju magnetskim, počinju ponašati poput tih ruda, odnosno i sami privlače komade željeza. Također se navodi da takav željezni štap obješen o vertikalnu nit postavlja sam sebe u smjeru sjever – jug. Međutim, uporaba magnetu u navigaciji počinje tek od 11. stoljeća.

Veza između magnetizma i elektriciteta nije uočena sve do 19. stoljeća. Tu je vezu gotovo slučajno 1819. godine otkrio danski fizičar Hans Christian Ørsted.

U zimi 1819 – 1820. Ørsted je predavao na Sveučilištu u Kopenhagenu o elektricitetu, galvanizmu i magnetizmu. Elektricitet je u to doba značio elektrostatiku, galvanizam se odnosio na djelovanje struja koje su malo prije toga otkrili i proučavali fizičari Luigi Galvani i Alessandro Volta dok je magnetizam sadržavao pokuse sa prirodnim magnetima. Dok se u to doba veza između elektriciteta i galvanizma već pomalo naslućivala – ako ni zbog čega drugoga onda zbog toga što su oba mogla uzrokovati električne udare – o vezi između elektriciteta i magnetizma nije se znalo ništa. Ørsted je ipak smatrao da ta veza mora postojati. Priča se da je jednom prigodom, nakon što je uzaludno pokušao studentima pokazati djelovanje galvanske struje na magnetnu iglu postavljenu okomito prema vodiču kojim je tekla struja, postavio iglu paralelno vodiču. Igla se odmah zanjihala, a kada je Ørsted promijenio smjer struje, igla se zanjihala u suprotnom smjeru.

U povijesti znanosti gotovo nema otkrića koje bi po svojim posljedicama bilo jednako Ørstedovom otkriću. Znanstveni svijet tog doba bio je njime duboko impresioniran, te su se najveći suvremenici bacili na proučavanje novih elektromagnetskih pojava. Genijalno otkriće



elektromagnetske indukcije Michaela Faradaya došlo je svega desetak godina kasnije (1832), a u međuvremenu su André-Marie Ampère, sam Faraday i drugi razvili prve teorije o magnetskom djelovanju električne struje. Tijekom druge polovice 19. stoljeća se iz tih radova razvila elektromagnetska teorija, kojoj je savršeni matematički oblik dao škotski fizičar James Clerk Maxwell, a eksperimentalnu potvrdu njemački fizičar Heinrich Rudolf Hertz.

I specijalna teorija relativnosti koju je 1905. godine objavio Albert Einstein ima svoje korijene u elektromagnetizmu. Proučavajući elektrodinamiku naboja u gibanju, Lorentz je prije Einsteina došao do formulacije teorije koja je bila vrlo bliska Einsteinovoj. Između ostalog, Einsteinov znameniti članak iz 1905. godine nije nosio naslov „O teoriji relativnosti“, nego „O elektrodinamici naboja u gibanju“. Danas pod teorijom relativnosti podrazumijevamo fizikalnu teoriju koja obuhvaća ne samo zakone elektrodinamike, nego i svaki drugi skup fizikalnih zakona za koji se zahtijeva da mora biti relativistički invarijantan, odnosno mora zadržavati isti oblik u svim inercijalnim referentnim sustavima. Međutim, pažljivi povjesničar znanosti brzo će uočiti kako je relativnost potekla upravo iz Ørstedovih pokusa o elektromagnetizmu.

Danas je u znanosti opće prihvaćeno da tzv. magnetske pojave dolaze od sila koje se javljaju između električnih naboja u gibanju. Drugim riječima, naboji u gibanju djeluju međusobno ne samo čistim „elektrostatičkim“ silama koje su opisane Coulombovim zakonom, nego i „magnetskim“ silama. Prema tome ćemo i naše poglavlje o elektromagnetima početi razmatranjem sila između naboja u gibanju, odstupajući tako od pristupa koji bi počinjao razmatranjem međudjelovanja dvaju tzv. magnetskih „polova“.

## 2.2. MAGNETSKO POLJE I MAGNETSKA INDUKCIJA

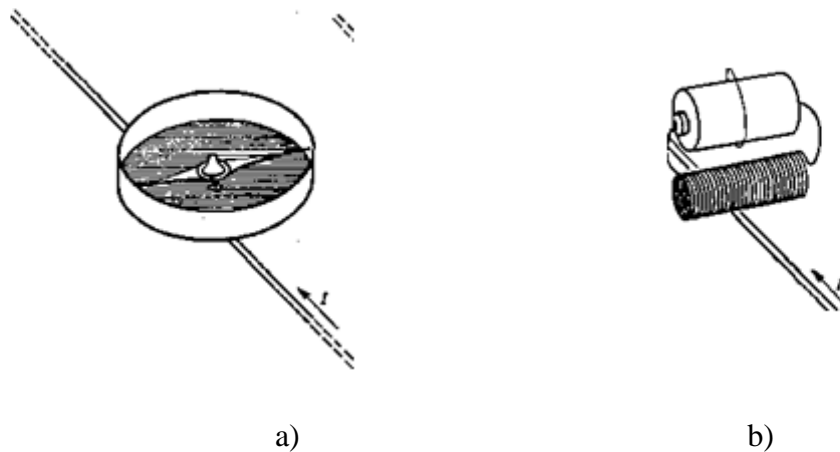
Eksperimentalna je činjenica da se dva paralelna vodiča, kojima električna struja teče u istom smjeru, međusobno privlače. Ako se promjeni smjer struje u jednom vodiču, privlačenje se pretvara u međusobno odbijanje. Može se reći da postoji „djelovanje na daljinu“ između dva vodiča kojima teče struja. To djelovanje nije posljedica statičkog naboja na vodičima, jer bi on bio isti u oba slučaja. Međutim, stavi li se kovni (ali ne željezni) list između vodiča, međudjelovanje se ne mijenja. Iz toga se može zaključiti da je to međudjelovanje povezano samo s gibanjem naboja. Rezultat je naime isti ako se umjesto dvaju vodiča promatraju slobodni naboji u gibanju.

Sile kojima naboji u gibanju djeluju na druge električne naboje, zovu se magnetskim silama. No, umjesto da se govori o silama kojima naboji u relativnom gibanju djeluju jedan na drugi, kaže se da naboj u gibanju stvara oko sebe magnetsko polje.

Kaže se da magnetsko polje postoji u danoj točki prostora ako sile (uz elektrostatičku) djeluju na naboj u gibanju koji prolazi tom točkom.

Spomenuta definicija magnetskog polja nije, međutim, potpuna. U prvom redu, mora se definirati iznos i smjer magnetskog polja u danoj točki prostora ako su poznati podaci o naboju u gibanju (brzina). Nadalje, treba odrediti iznos i smjer sile koja djeluje na električni naboj koji se giba u tom polju. Kreće se od ovog drugog problema; određivanje sile na naboj u gibanju će ujedno poslužiti za definiciju magnetskog polja.

Premda se magnetsko i električno polje po svojoj prirodi međusobno sasvim razlikuju i odnose se na veoma različiti skup pojava, između njih postoji niz formalnih sličnosti. Slično kao i električno polje, i magnetsko polje je vektor. Nadalje, kao što su se za opis električnog polja uvela dva vektora  $\vec{E}$  i  $\vec{D}$ , biti će korisno uvesti dva vektora za opisivanje magnetskog polja,  $\vec{B}$  i  $\vec{A}$ . U ovom će se dijelu uvesti vektor magnetske indukcije  $\vec{B}$ .



Slika br. 2.1 Na iglu kompasa (a) i na zavojnicu kojom teče struja (b) djeluje struja koja teče obližnjim vodičem

Magnetska indukcija  $\vec{B}$  prikazuje se silnicama magnetske indukcije, crtama čije tangente u nekoj točki pokazuju smjer djelovanja vektora  $\vec{B}$ . Konvencijom se povezuje gustoću silnica s jakošću magnetske indukcije i kaže se da je broj silnica koje sijeku jediničnu površinu, okomitu na njihov smjer, jednak jakosti magnetske indukcije  $\vec{B}$ . Prema tome, magnetska indukcija može se izraziti brojem silnica po jedinici površine („gustoćom“ silnica).

Ukupni broj silnica indukcije koji prolazi danom površinom nazivamo magnetski tok  $\Phi$ :

$$\Phi = \int_{površina} \vec{B} \cdot d\vec{S} = \int_{površina} B \cos \theta \cdot dS$$

Za posebni slučaj da je polje indukcije  $B$  homogeno i okomito na danu površinu  $S$  vrijedi:

$$\Phi = BS$$

SI-jedinicama se magnetski tok od jedne silnice naziva jedan weber (Wb). Kako je magnetska indukcija zapravo gustoća magnetskog toka, SI-jedinica za nju je weber/m<sup>2</sup>. U čast našeg velikog izumitelja Nikole Tesle ta se jedinica naziva tesla (T).

$$\text{weber/m}^2 = \text{tesla}$$

Odgovarajuće jedinice elektromagnetskog sustava su maksvel za tok i gaus za magnetsku indukciju. Vrijedi:

$$\text{weber/m}^2 = 10^4 \text{ maksvel/cm}^2 = 10^4 \text{ gaus} = \text{tesla}$$

$$\text{veber} = 10^8 \text{ maksvela}$$

Vrijednosti magnetske indukcije koje se susreću u praksi su reda veličine do nekoliko tesla; tzv. supravodljivim zavojnicama mogu se proizvesti i veće vrijednosti magnetske indukcije. Za usporedbu, magnetska indukcija Zemljinog magnetskog polja iznosi nekoliko stotisućinki ( $10^{-5}$ ) tesla.

### 2.3. SILA NA NABOJ U GIBANJU

U ovom će se dijelu kvantitativno definirati vektor magnetske indukcije  $\vec{B}$ . To će se učiniti pomoću sile na naboj u gibanju, koja se naziva Lorentzova sila.

Već je poznato da na naboj koji se giba u polju magnetske indukcije  $\vec{B}$  djeluje sila  $\vec{F}$  koja ovisi o veličini toga naboja  $Q$ , njegovoj brzini  $\vec{v}$  i relativnom smjeru te brzini prema smjeru magnetske indukcije  $\vec{B}$ . Stoga je postavljeno:

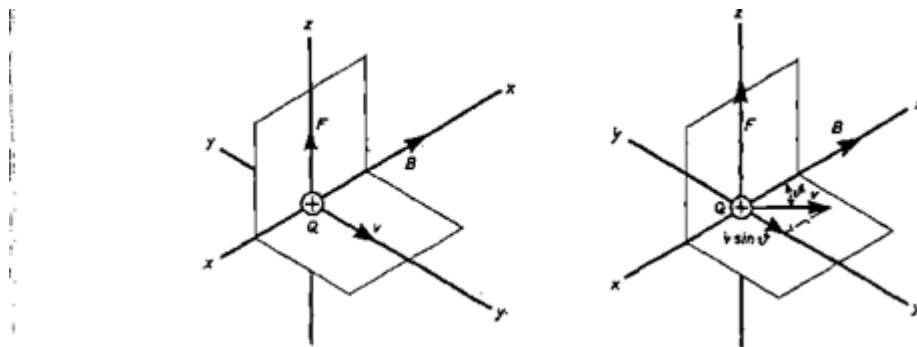
$$\vec{F} = Q\vec{E} + Q\vec{v} \times \vec{B}$$

gdje je  $\vec{E}$  električno polje.  $\vec{E}$  i  $\vec{B}$  su vektori neovisno o brzini  $\vec{v}$ . Prema tome je sila kojom magnetsko polje indukcije  $\vec{B}$  djeluje na naboj u gibanju:

$$\vec{F}_M = Q\vec{v} \times \vec{B}$$

Izraz  $\vec{F}_M = Q\vec{v} \times \vec{B}$  je definicijska jednadžba za vektor magnetske indukcije  $\vec{B}$ , slično kao što je izraz  $\vec{F}_K = Q\vec{E}$  definicijska jednadžba za vektor električnog polja  $\vec{E}$ .

Slika 2.2 ilustrira te jednadžbe. Pretpostavi li se da su linije (silnice) magnetske indukcije u danom dijelu prostora ravne, međusobno paralelne i jednoliko raspoređene (homogeno polje). Pozitivni naboj  $Q$  giba se brzinom  $v$ , okomito na smjer magnetske indukcije  $B$ .



Slika br. 2.2 Sila na naboj koji se giba u homogenom magnetskom polju; (a) brzina  $v$  i indukcija  $B$  su međusobno okomite, (b) brzina  $v$  i indukcija  $B$  nisu međusobno okomite

Postavi li se koordinatnu os  $X$  u smjeru magnetske indukcije, a os  $Y$  u smjeru brzine  $v$  tada sila djeluje u smjeru osi  $Z$ , tj. okomito na ravninu  $XY$ . U tom slučaju je sila:

$$F = Q v B$$

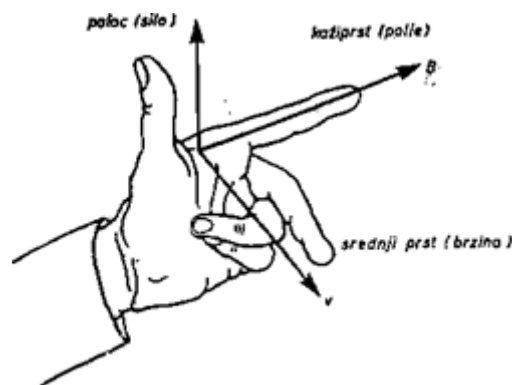
U SI-jedinicama  $F$  je u njutnima ako je  $Q$  u kulonima,  $v$  u m/s, a  $B$  u WB/m<sup>2</sup>.

Ako magnetska indukcija  $B$  i brzina  $v$  nisu međusobno okomite, nego zatvaraju kut  $\varphi$  (sl. 2.2b), sila je razmjerna komponenti brzine  $v$  u smjeru okomice na magnetsku indukciju,  $v \cdot \sin \varphi$ ,

$$F = Q v B \sin \theta$$

Sila na naboj je uvijek okomita na ravninu koju zatvaraju vektori  $\vec{v}$  i  $\vec{B}$ . Iz gornje jednadžbe je očito da je ta sila najveća ako su  $\vec{v}$  i  $\vec{B}$  međusobno okomiti, a jednaka nuli ako su  $\vec{v}$  i  $\vec{B}$  paralelni.

Jednostavno mnemotehničko pravilo omogućuje da se, poznavajući smjer gibanja i smjer magnetske indukcije, odredi smjer djelovanja sile na naboj u gibanju. Vektori  $\vec{B}$ ,  $\vec{v}$  i  $\vec{F}$  su naime međusobno okomiti; njihovi odnosi u prostoru mogu se opisati tzv. pravilom lijeve ruke (sl. 2.3): stavi li se kažiprst lijeve ruke u smjeru djelovanja indukcije  $B$ , a srednji prst u smjeru gibanja naboja ( $v$ ), tada će magnetska sila  $F$  djelovati u smjeru ispruženog palca.



Slika br. 2.3 Pravilo lijeve ruke za određivanje smjera djelovanja sile na naboj u gibanju

Za usporedbu, gravitacijska sila na elektron (teža) iznosi

$$F = m \cdot g \approx 9 \cdot 10^{-31} \cdot 9,8 \approx 10^{-29} \text{ njutna.}$$

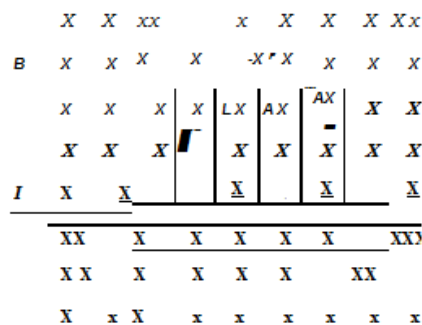
U svim izračunima elektromagnetskog djelovanja može se zanemariti gravitacijsko djelovanje na elektron (težinu elektrona).

## 2.4. SILA NA VODIČ KOJIM TEČE STRUJA

Poznato je da na vodič koji se nalazi u magnetskom polju i kojim teče električna struja djeluju magnetske sile. Prema tome, jasno je da će magnetsko polje djelovati na elektrone u gibanju, te da će se ta sila ili moment sile prenijeti na čitav materijal vodiča. Razni električni mjerni instrumenti i električni motori s kojima se čovjek susreće u svakodnevnom životu najbolja su ilustracija primjene ove fizikalne pojave.

Djelovanje magnetskog polja indukcije  $B$  na ravni vodič prikazano je na slici 2.4. Vodičem dužine  $l$  i presjeka  $S$  neka teče struja  $I$ ; magnetska indukcija neka je okomita na smjer vodiča (i smjer struje) te neka djeluje okomito na ravninu slike, od čitatelja prema dolje. Kako je sila na vodič rezultanta sila koje djeluju na svaki naboj u gibanju, izraziti će se pomoću tih veličina. Neka se u jediničnom volumenu vodiča nalazi  $n$  električnih naboja  $Q$  koji se gibaju srednjom brzinom  $v$ . Sila na svaki pojedini naboj iznosi

$$f = QvB.$$



Slika br. 2.4 Sila na ravni vodič dužine  $l$  koji se nalazi u magnetskom polju indukcije  $B$ .

Vektor  $\vec{B}$  je usmjeren u ravninu slike, od čitatelja prema dolje.

Broj naboja u vodiču je:

$$N = n l S$$

Pa je rezultanta sila

$$F = Nf = n l S Q Bv.$$

Otprije je poznato da se jakost struje  $I$  u vodiču može izraziti pomoću gibanja elementarnih naboja izrazom

$$I = n Q v S,$$

pa izraz za silu na vodič kojim teče struja postaje

$$F = I B l.$$

Ako magnetsko polje nije okomito na ravni vodič nego s njime zatvara kut  $\varphi$ , izraz za silu postaje

$$F = I B l \sin \theta.$$

Općenito, međutim, vodiči nisu ravni, a isto se tako i vrijednost indukcije  $B$  mijenja. Zato se mora promatrati silu  $dF$  koja djeluje na ravni element vodiča dužine  $dl$ . Analogno izrazu  $F = I B l \sin \theta$  ta je sila

$$dF = I B dl \cdot \sin \theta,$$

gdje je  $\varphi$  kut između elemenata vodiča  $dl$  i magnetske indukcije  $B$ .

Niz veličina u izrazu  $dF = I B dl \cdot \sin \theta$  vektorske je prirode, a između njih postoje određeni odnosi smjerova. Izrazi  $F = I B l \sin \theta$  i  $dF = I B dl \cdot \sin \theta$  čine skalarnu redukciju izraza za silu na vodič. Da bi se izračunao i smjer sile, ti izrazi se moraju napisati u vektorskom obliku. Poznato je da je smjer sile  $d\vec{F}$  okomit na ravninu koju određuju vektor  $\vec{B}$  i element vodiča  $dl$  (koji je ujedno i element struje). Smjer sile  $d\vec{F}$  može se odrediti pravilom lijeve ruke, gdje srednji prst, umjesto smjera gibanja naboja, pokazuje konvencionalni smjer struje u vodiču (od pozitivnog prema negativnom polu izvora napona). Naime, iz vektorskog izraza sile na naboj u gibanju

$$\vec{f} = Q \vec{v} \times \vec{B}, \text{ odnosno } \vec{F} = N \vec{f} = n l S \vec{f}$$

slijedi za silu na element vodiča

$$d\vec{F} = I dl \times \vec{B},$$

gdje vektor  $dl$  ima smjer struje u vodiču.

Izraz  $d\vec{F} = I dl \times \vec{B}$  izveden je s pojednostavljenom pretpostavkom da se svi naboji u vodiču gibaju jednoliko i u istom smjeru. Međutim, znamo, da to nije tako. Zato veličina  $v$ , koja se pojavljuje u spomenutim izrazima ima fizikalno značenje srednje brzine gibanja naboja, tj. komponente brzine u smjeru djelovanja električnih sila. U tom smislu uvodi se vektor jakosti struje definicijom



$$\vec{I} = I \cdot \frac{d\vec{l}}{dl} = I \cdot \vec{l}_0,$$

gdje  $d\vec{l}/dl = \vec{l}_0$  označava jedinični vektor u smjeru protjecanja električne struje, tj. u smjeru srednje brzine gibanja pozitivnog naboja. Koristeći se izrazom  $\vec{I} = I \cdot \frac{d\vec{l}}{dl} = I \cdot \vec{l}_0$  može se za silu na element vodiča kojim teče struja pisati

$$d\vec{F} = dl(\vec{I} \times \vec{B}),$$

odnosno za ravni vodič dužine  $l$  kojim teče stalna struja  $I$

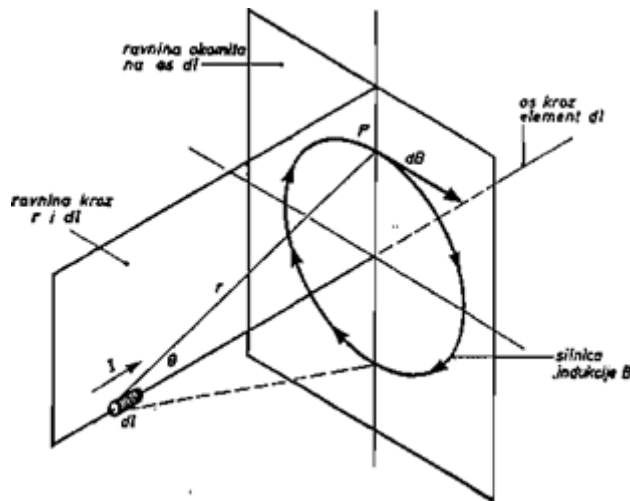
$$F = l(\vec{I} \times \vec{B}).$$

### 3. MAGNETSKO POLJE NABOJA U GIBANJU I ELEKTRIČNE STRUJE

#### 3.1. MAGNETSKO POLJE ELEMENTA STRUJE. BIOT – AMPEREOV ZAKON

Magnetsko polje djeluje na naboj u gibanju elektromagnetskom silom. Što je stvorilo to magnetsko polje? U pravilu to polje je i samo nastalo kao rezultat gibanja električnog naboja, odnosno djelovanja električne truje. Sada će se detaljnije proučiti ovisnost jakosti i smjera indukcije magnetskog polja o brzini i smjeru gibanja električnog naboja koji ga stvara. Najčešće se magnetsko djelovanje naboja u gibanju susreće kao djelovanje električne struje u vodiču, pa će se proučavanje započeti računom magnetskog polja što ga oko sebe stvara mali dio – element – vodiča; ukupno polje koje stvara cijeli vodič dobiti će se vektorskom superpozicijom polja što ih stvaraju svi elementi vodiča.

Promotri li se dakle element vodiča  $dI$  kojim teče struja jakosti  $I$  (slika 3.1); često (i ne sasvim ispravno) takav element se naziva elementom struje  $dI$ . Naboji koji se gibaju u elementu stvaraju u nekoj proizvoljnoj točki  $P$  prostora magnetsko polje indukcije  $d\vec{B}$ . Eksperiment pokazuje da je za kratki element vodiča vektor  $d\vec{B}$  položen u ravnini okomitoj na os elementa  $dI$ , i to okomito na ravninu koju određuju element  $dI$  i spojnica  $r$  točke  $P$  i elementa  $dI$ . Prema tome, linije magnetske indukcije  $B$  (vektor  $d\vec{B}$  je na njih tangencijalan!) su kružnice u ravnini okomitoj na os elementa struje. Smjer silnica se podudara sa smjerom okretanja desnog vijka koji napreduje u smjeru struje (smjer kazaljke na satu na sl. 3.1). Ovo pravilo se naziva i pravilom desnog vijka: smjer silnica kružnog magnetskog polja oko elementa vodiča je u smjeru vrtnje desnog vijka koji napreduje u smjeru struje u vodiču.



Slika br. 3.1 Magnetsko polje elementa struje

Smjer silnica može se odrediti još jednim mnemotehničkim pravilom pod imenom pravila palca desne ruke: uhvati li se element struje u desnu šaku tako da se palac usmjeri u pravcu struje u elementu, magnetsko polje okružuje vodič kao prsti šake.

Izraz za jakost magnetske indukcije  $dB$  u točki  $P$  postavlja se u obliku

$$dB = konst. \frac{I dl \sin \theta}{r^2}$$

gdje je  $r$  udaljenost između elementa  $dl$  i točke  $P$  a  $\theta$  kut između osi elementa i spojnice od  $dl$  do  $P$ . Izraz  $dB = konst. \frac{I dl \sin \theta}{r^2}$  se naziva Ampereov zakon, premda ga je Biot predložio nekoliko godina prije (oko 1820.).

Iznos konstante u Biot – Ampereovom zakonu određuje mjerni sustav; slično kao što je to bilo i kod Coulombova zakona. Ako se unaprijed odrede jedinice magnetske indukcije  $B$ , duljine  $l$  i jakosti struje  $I$ , onda se iznos konstante određuje eksperimentom. U praksi se, međutim, postupa drukčije, tj. odrede se jedinice za dvije od tri spomenute fizikalne veličine; tada iznos konstante u  $dB = konst. \frac{I dl \sin \theta}{r^2}$  određuje jedinicu treće veličine. U mjernom sustavu SI, vrijednost konstante postavlja se

$$konstanta = 10^{-7} \text{ weber/amper} \cdot \text{metar}$$

pa izraz  $dB = konst. \frac{I dl \sin \theta}{r^2}$ , odnosno jedan drugi izraz koji će se iz njega izvesti, služi za definiciju jedinice jakosti struje, ampera. U elektromagnetskom sustavu mjernih jedinica, koji

se često koristio prije, postavlja se *konstanta* = 1, čime se definira abamper (apsolutni amper), jedinica za struju u elektromagnetskom mjernom sustavu.

Kako će se kasnije vidjeti, prikladno je umjesto konstante definirane izrazom *konstanta* =  $10^{-7}$  weber/amper · metar uvesti konstantu  $\mu_0$ , koja je za  $4\pi$  puta veća; na taj će se način izbjeći pojava faktora  $4\pi$  u nizu izraza za fizikalne zakone. Uvodi se, dakle,

$$\frac{\mu_0}{4\pi} = \textit{konstanta}, \mu_0 = 4\pi \cdot \textit{konstanta}$$

Biot-Ampereov zakon tada postaje:

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I dl \sin \theta}{r^2}$$

gdje je smjer vektora  $dB$  dan pravilom desnog vijka. U vektorskom obliku izraz  $dB =$

$\frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I dl \sin \theta}{r^2}$  može se pisati:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} I \frac{d\vec{l} \times \vec{r}}{r^3}$$

gdje je  $\vec{r}$  radij-vektor od elementa  $d\vec{l}$  do točke  $P$  u kojoj se mjeri magnetska indukcija  $d\vec{B}$ , a  $r$  modul tog vektora.

Rezultirajuće magnetsko polje što ga u danoj točki prostora  $P$  stvara vodič konačne duljine kojim teče struja dobiti će se superpozicijom djelovanja svih elemenata struje, što u praksi znači linijskim integralom preko čitavog vodiča.

$$B = \int dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{\substack{p_0 \\ \text{vodiču}}} \frac{I dl \sin \varphi}{r^2}$$

Integral u izrazu  $B = \int dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{\substack{p_0 \\ \text{vodiču}}} \frac{I dl \sin \varphi}{r^2}$  je vektorski integral, što znači da će u pravilu trebati izraz pod integralom rastaviti u komponente po koordinatnim osima, te komponente integrirati i rezultat vektorski zbrojiti.

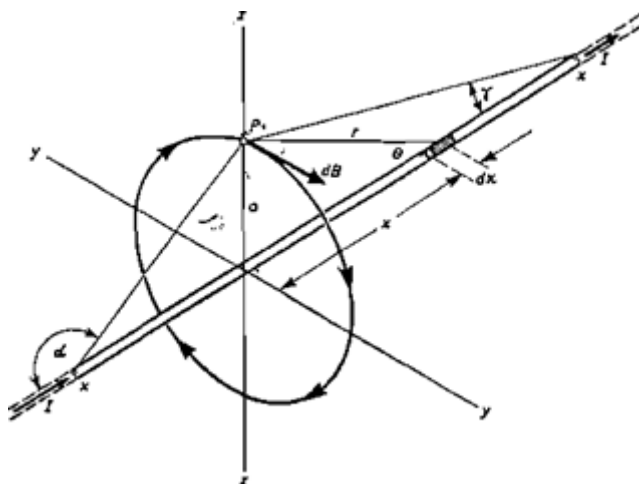
Biot-Ampereov zakon dan u diferencijalnom obliku  $dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I dl \sin \theta}{r^2}$  ili  $d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} I \frac{d\vec{l} \times \vec{r}}{r^3}$  ne može se eksperimentalno provjeriti, jer nije moguće napraviti izolirani element struje, tj. nije moguće promatrati djelovanje izoliranog elementa vodiča kojim teče struja. Zato je taj zakon

matematička postavka čija se opravdanost vidi tek iz integralnog oblika  $d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} I \frac{d\vec{l} \times \vec{r}}{r^3}$ , gdje se rezultat za magnetsko polje cijelog jednog kruga može usporediti s eksperimentom. Rezultat je u svakom promatranom slučaju u skladu s mjerenjima.

Također je važno da Biot-Ampereov zakon u obliku  $dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I dl \sin \theta}{r^2}$  ili  $d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} I \frac{d\vec{l} \times \vec{r}}{r^3}$  strogo vrijedi samo u vakuumu, tj. u prostoru u kojem nema materije. Kako će se kasnije vidjeti, prisustvo npr. željeza i nekih materijala modificira iznos i smjer magnetske indukcije  $B$ . Međutim, izraz  $B = \int dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{\text{vodiču}} \frac{I dl \sin \varphi}{r^2}$  može se ipak primijeniti u velikoj većini slučajeva u praksi, npr. za vodiče u zraku ili u blizini bilo kojeg materijala osim željeza i njemu sličnih (tzv. feromagnetskih) materijala.

### 3.2. POLJE RAVNOG VODIČA

Pomoću integralnog oblika Biot-Ampereova zakona izračunati će se magnetska indukcija  $B$  u nekoj točki  $P$  izvan tankog ravnog vodiča kojim teče struja  $I$ . Na slici 3.2 provučena je koordinatna os  $X$  kroz os vodiča, a os  $Z$



Slika 3.2 Magnetsko polje oko ravnog vodiča

Neka je okomica na vodič kroz točku  $P$ . Element vodiča dužine  $dx$  stvara u točki  $P$  magnetsku indukciju  $d\vec{B}$ , čiji se smjer djelovanja, prema  $d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} I \frac{d\vec{l} \times \vec{r}}{r^3}$ , nalazi u ravnini  $YZ$ , i to okomito na ravninu  $XZ$ , jer se spojnica  $r$  i element  $dx$  nalaze u toj ( $XZ$ ) ravnini. Vidi se da svi elementi vodiča daju doprinos indukciji u točki  $P$  u istom smjeru, pa je ukupna vrijednost indukcije  $B$  jednaka aritmetičkom (ne vektorskom!) zbroju doprinosa pojedinih elemenata vodiča. Prema tome je

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{I dx \sin \varphi}{r^2}$$

gdje će se integraciju provesti po čitavoj dužini vodiča. Kako je prema slici  $r = \frac{a}{\sin \theta}$ ,

$x = a \cdot \cot \theta$ ,  $dx = a d(\cot \theta) = \frac{-a d\theta}{\sin^2 \theta}$ , to je

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi a} \int_a^y \sin \theta d\theta = \frac{\mu_0 I}{4\pi a} (\cos \gamma - \cos \rho)$$

Magnetska indukcija u točki  $P$  koja se nalazi u blizini veoma dugog vodiča (dužina vodiča neka je znatno veća od udaljenosti  $a$  od vodiča točke  $P$ , tj.  $\gamma \approx 0$  i  $\alpha \approx \pi$ ) iznosi

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi a}$$

Taj izraz su Biot i Savart postavili na temelju eksperimenta još prije postavljanja diferencijalnog oblika zakona  $dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I dl \sin \theta}{r^2}$ ; u fizici je poznat pod imenom Biot-Savartova zakona.

Na temelju izraza izvedenih u ovom i prošlom dijelu može se povući određene analogije između električnog i magnetskog polja te uočiti određene razlike. Vratimo se prvo izrazu za

$$\text{magnetsku indukciju } B = \int dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{\text{vodiču}} \frac{I dl \sin \theta}{r^2}$$

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{I dl \sin \theta}{r^2} \text{ (vektorski zbroj)}$$

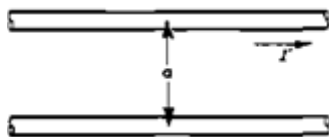
Uočava se formalna analogija s izrazom za jakost električnog polja razmazanog naboja

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{dQ}{r^2} \text{ (vektorski zbroj).}$$

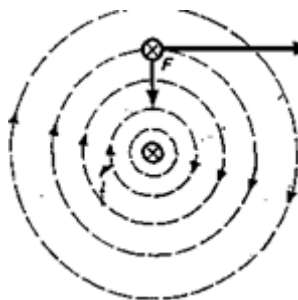
Bitna je razlika u tome što je električni naboj fizikalna stvarnost; ništa analogno, međutim, ne postoji za magnetizam. I Biot-Savartov zakon  $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi a}$  pokazuje analogiju sa zakonima za električno polje: i kod Biot-Savartova zakona iznos magnetske indukcije je obrnuto razmjern udaljenosti od vodiča kojim teče struja, isto kao što je i jakost električnog polja oko dugog nabijenog vodiča (žice) obrnuto razmjerna okomitoj udaljenosti između vodiča i točke u kojoj se mjeri polje. Međutim, električno polje oko dugog nabijenog vodiča je radijalno, a silnice magnetske indukcije oko ravnog vodiča kojim teče struja su koncentrične kružnice koje leže u ravninama okomitim na taj vodič; točke na vodiču su središta kružnica. Osim toga, silnice električnog polja oko takvog vodiča su otvorene linije, dok su silnice magnetske indukcije zatvorene linije. Vidjeti će se da su ova svojstva silnica električnog i magnetskog polja zajednička za svaki raspored naboja, odnosno svaki oblik vodiča.

### 3.3. SILA IZMEĐU DVA VODIČA KOJIMA TEČE STRUJA. AMPER

Promotrite li se dva duga usporedna ravna vodiča čija je međusobna udaljenost  $a$ . Vodičima teče struja  $I$  odnosno  $I'$  (slika 3.3).



a)



b)

Slika br. 3.3 Sila između dva duga usporedna vodiča; uz definiciju ampera

Svaki se vodič nalazi u magnetskom polju drugog vodiča, pa će to polje djelovati silom na naboj koji se po njemu giba. Vodiči dakle djeluju jedan na drugoga silom koja će sada biti izračunata. Prema slici 3.3.b, silnice oko donjeg vodiča obuhvaćaju i gornji vodič. Magnetska indukcija u prostoru gdje se nalazi gornji vodič iznosi:

$$B = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I}{a}$$

Pravilo lijeve ruke (slika 2.3) pokazuje da sila na gornji vodič djeluje prema dolje; prema izrazu  $F = I B l$  iz poglavlja (2.4), sila na jediničnu duljinu gornjeg vodiča iznosi

$$F = I' B = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I \cdot I'}{a}$$

Iz simetrije izraza  $F = I' B = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I \cdot I'}{a}$  vidi se da i gornji vodič djeluje na donji jednakom silom. Ako su struje  $I$  i  $I'$  istog smjera, sila kojom gornji vodič djeluje na donji suprotnog je smjera od one kojom donji vodič djeluje na gornji (tj. usmjerena je prema gore); vodiči se dakle međusobno privlače. Ako pak vodičima teku struje suprotnog smjera, vodiči će se međusobno odbijati.



Sila između dva duga ravna vodiča kojima teče struja koristi se za definiciju ampera, SI-jedinice za jakost struje. Amper je definiran na slijedeći način:

Amper (1A) je jakost stalne električne struje koja prolazeći dvama usporednim, ravnim, beskonačno dugim vodičima zanemarivo malena kružna presjeka, razmaknutim 1 metar u vakuumu, uzrokuje među njima silu od  $2 \cdot 10^{-7}$  njutna po metru duljine.

Vidi se, naime, iz izraza  $B = \int dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{\text{vodiču}} p_0 \frac{I dl \sin \varphi}{r^2}$  da za jediničnu jakost struje u vodičima ( $I = I' = A$ ), te uz  $a = 1m$  i  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{Wb/Am}$ , sila na jediničnu duljinu vodiča iznosi

$$F = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \cdot \frac{1 \cdot 1}{1} = 2 \cdot 10^{-7} \text{N/m}$$

Premda je već prije ova definicija uvedena, ovdje se ponavlja jer sada postaje jasna njezina fizikalna osnova. Osim toga, ponavlja se i zbog njene važnosti.

Iz te se definicije vidi da vrijednost konstante  $\mu_0$  u SI-jedinicama iznosi točno

$$\mu_0 = 12,57 \cdot 10^{-7} \text{Wb/Am}$$

SI - jedinica električnog naboja, kulon, definirana je pomoću ampera ( $1 \text{ C} = 1\text{As}$ ), tj. jedinica naboja definirana je pomoću sile na naboj u gibanju, za razliku od elektrostatičkog sustava, gdje je definirana pomoću sile na naboj u mirovanju (Coulombove sile).

## 4. ELEKTROMAGNETSKA INDUKCIJA

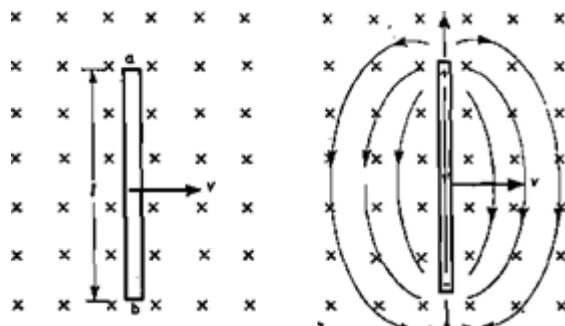
### 4.1. UVOD

Poslije Ørstedova otkrića 1820. godine, koje je pokazalo da električnu struju uvijek prati magnetsko polje, mnogo je znanstvenika pokušalo odgovoriti na pitanje da li se magnetom može proizvesti električna struja. Istraživanja su započeta pokusima, koji su se sastojali od toga da su se oko stalnih magneta ovili zavoji bakrene žice i osjetljivim instrumentima se pokušala u njima detektirati električna struja. No takvi su pokusi dali negativan rezultat. Umjesto magneta pokušalo se i sa zavojnicama kroz koje je tekla stalna električna struja; za te se zavojnice znalo da djeluju kao magneti, jer su npr. i one skretale smjer magnetske igle. No i ti su pokusi dali negativne rezultate. Znanstveni svijet bio je iznenađen: kako to da električna struja stvara magnetsko polje, a magnetsko polje ne stvara električnu struju?

Bitan korak naprijed napravio je Faraday 1840. godine jer je uočio onaj dio eksperimenta koji je do tada nedostajao: električni efekti će se pojaviti samo ako dolazi do promjene u magnetskom polju, tj. ako se magnet giba ili ako se struja koja teče zavojnicom mijenja. Danas se može rekonstruirati misaoni tok koji je ovog genijalnog istraživača mogao dovesti do otkrića čije su posljedice bile u to doba nezamislive. Znajući naime da magnetsko polje djeluje silama na naboj samo ako se on nalazi u gibanju, može se zaključiti da, želi li se proizvesti struju, tj. gibanje naboja u vodiču, taj vodič se mora pomicati kroz magnetsko polje. Međutim, da li je Faraday do svog otkrića došao vođen baš ovim razmatranjem ili svojom intuicijom genijalnog eksperimentatora, danas je zapravo akademsko pitanje. Najpravilnije je reći da su mu njegova intuicija i upornost omogućile da poveže podatke o atomističkoj strukturi struje i djelovanja magnetskog polja na naboj s rezultatima svojih eksperimenata i da iz njih izvede pravilan zaključak da se struja u vodiču može proizvesti samo ako dolazi do promjena u magnetskom polju. Faradayeva otkrića su omogućila jednom drugom genijalnom znanstveniku, Maxwellu, da električne i magnetske pojave poveže u jedinstvenu teoriju, kojoj po intelektualnoj ljepoti i dalekosežnosti jedva da i danas ima ravne. Ta su otkrića bila i jedna od onih koja su temeljito izmijenila svijet u kojem ljudi žive. Otkriće inducirane električne struje omogućilo je razvitak elektrotehnike, tehničke grane koja je u proteklih sto godina sasvim promijenila život u industrijski razvijenim zemljama i čije blagodati čovjek neprestano osjeća. Mogućnost pretvaranja električne energije u mehaničku i mehaničke u električnu ide preko Faradayevih otkrića u elektromagnetizmu; taj način korištenja energije još uvijek je nezamjenjiv u svakom pogledu.

## 4.2. ELEKTROMAGNETSKA INDUKCIJA U VODIČU KOJI SE GIBA U MAGNETSKOM POLJU

Na slici 4.1 prikazan je vodič duljine  $l$  u homogenom magnetskom polju okomitom na ravninu papira i usmjerenom od čitatelja. Pomakne li se vodič udesno brzinom  $v$ , čiji je smjer okomit i na vodič i na smjer djelovanja magnetskog polja tada će na svaki naboj u vodiču djelovati sila  $F = Q B v$  usmjerena uzduž vodiča (pravilo lijeve ruke). Smjer djelovanja te sile na negativne naboje je od  $a$  prema  $b$ , a na pozitivne naboje od  $b$  prema  $a$ . Na naboje u vodiču, dakle, djeluju iste sile koje bi djelovale da se vodič nalazi u homogenom magnetskom polju jakosti  $Bv$  usmjerenom od  $b$  prema  $a$ . Prema tome će se slobodni elektroni u vodiču gibati u smjeru od  $a$  prema  $b$  sve dotle dok nagomilavanjem na jednom kraju odbojna sila ne kompenzira djelovanje vanjskog polja. U ovom slučaju će gornji dio vodiča postati pozitivno, a donji dio negativno nabijen. Da se takvo razdvajanje naboja stvarno događa u vodiču, pokazao je Barnet kada je pokusima, koji su bili ekvivalentni rezanju vodiča u gibanju, dokazao da se jedna polovina vodiča nabila pozitivnim, a druga negativnim nabojem.



Slika br. 4.1 Gibanje vodiča u homogenom magnetskom polju

Neka se sad vodič  $ab$  giba duž kovne žice koja ima oblik zatvorenog slova U. Magnetsko polje ne djeluje na naboje u žici, nego samo na naboje u dijelu  $ab$  koji se giba. Sila kojom to polje djeluje na naboje – ekvivalentna po svom djelovanju elektrostatskom polju u smjeru vodiča  $ab$  – tjera višak slobodnih elektrona u donji dio vodiča, odakle oni same odlaze u žicu. Na taj se način uspostavlja električna struja, čiji je konvencionalni smjer (smjer gibanja pozitivnog naboja) prikazan strelicama. Struja će teći sve dotle dok se vodič giba u magnetskom polju; gibanje vodiča je ekvivalentno, dakle, postojanju izvora elektromotorne sile. Ta elektromotorna sila naziva se induciranom elektromotornom silom, a struja koja teče vodičem induciranom strujom. Otprije je poznato da je elektromotorna sila jednaka omjeru rada koji vanjske sile izvrše da pomaknu električni naboj i količine naboja koji prođe danom

točkom vodiča. Označi li se s  $I$  struju u krugu prikazanom na slici; tada na dio vodiča koji se giba djeluje sila  $F = BIl$  (djelovanje magnetskog polja na vodič kojim teče struja), za koju se iz smjera struje  $I$  te smjera magnetskog polja lako vidi da djeluje ulijevo, tj. suprotno smjeru gibanja vodiča  $ab$ . Vanjske sile moraju, dakle, utrošiti radnju za gibanje vodiča  $ab$ . Taj je rad izvor inducirane elektromotorne sile. Uređaj za induciranu električnu struju je pretvarač mehaničke energije u električnu. U nastavku će se taj rad izračunati.

Sila na vodič u gibanju iznosi

$$F = BIl$$

a put koji vodič prijeđe je

$$ds = v dt$$

Prema tome je izvršena radnja

$$dW = F ds = Bl v l dt$$

Za vrijeme  $dt$  pomaknut je naboj  $dQ = I dt$ . Dakle je

$$dW = Blv dQ$$

Prema tome, elektromotorna sila  $\frac{dW}{dQ}$  jednaka je

$$\varepsilon = B l v$$

Ako je magnetska indukcija izražena u  $\frac{Wb}{m^2}$ , duljina vodiča u metrima, a njegova brzina u m/s, elektromotorna sila izražena je u voltima.

Do tog se izraza može doći i iz alternativne definicije *ems*

$$\varepsilon = \oint E \cos \varphi dl,$$

Gdje  $E$  u podintegralnom izrazu označava ukupnu silu na jedinični naboj, što u ovom slučaju iznosi

$$\frac{F}{Q} = \frac{(F_m + F_{mg})}{Q} = \frac{(E'Q + BQv \sin \varphi)}{Q} = E' + Bv$$

(jer je  $\sin \varphi = 1$ ). Uoči li se da u gornjim izrazima  $B$  označava magnetsku indukciju, a  $E'$  električno polje koje dolazi od pomaka naboja u vodiču. Integral po zatvorenoj krivulji daje

$$\varepsilon = \oint (E' + Bv) \cos \theta \, dl = \oint E' \cos \theta \, dl + \oint Bv \cos \theta \, dl$$

Od ranije je poznato da je integral električnog polja  $E'$  po zatvorenoj krivulji jednak nuli; drugi integral će se pojednostaviti konstatacijom da je produkt  $Bv \cos \theta$  različit od nule samo duž vodiča  $ab$  (preostali dio strujnog kruga se ne miče, pa je  $v = 0$ ). Osim toga je duž vodiča  $\theta = 0$ ,  $\cos \theta = 1$ , pa je

$$\oint Bv \cos \theta \, dl = Bv \int_{ab} dl = Bvl,$$

tj.

$$\varepsilon = Bvl$$

rezultat identičan prethodnome.

### 4.3. PRAVILO DESNE RUKE

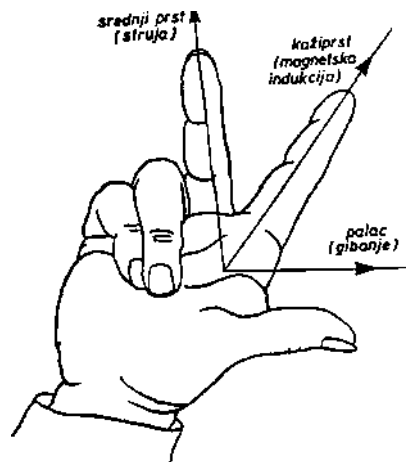
Smjerovi djelovanja magnetske indukcije, gibanja vodiča i inducirane  $ems$  povezani su pravilom desne ruke. Usmjeri li se palac desne ruke u smjeru gibanja vodiča a kažiprst u smjeru magnetske indukcije, tada srednji prst pokazuje smjer inducirane  $ems$ , odnosno inducirane struje (konvencionalni smjer struje). To pravilo posljedica je činjenice da je opći izraz za induciranu  $ems$  određen relacijom

$$d\varepsilon = (\vec{B} \times dl) \cdot \vec{v}$$

odnosno

$$d\varepsilon = Bv dl \sin \theta \cdot \cos \varphi,$$

Gdje je  $dl$  element vodiča koji se giba brzinom  $v$  u polju magnetske indukcije  $B$ ,  $\theta$  je kut između  $B$  i  $dl$ , a  $\varphi$  kut između  $v$  i okomice na ravninu određenu s  $B$  i  $dl$ . U posebnom slučaju danom izrazom  $\varepsilon = B l v$ , vodič je bio ravan i postavljen okomito na homogeno magnetsko polje ( $\theta = \frac{\pi}{2}$ ,  $\sin \theta = 1$ ); gibanje vodiča je bilo okomito na smjer magnetskog polja ( $\varphi = 0$ ,  $\cos \varphi = 1$ ). Inegracijom izraza  $d\varepsilon = Bv dl \sin \theta \cdot \cos \varphi$  lako se dobije izraz  $\varepsilon = B l v$ .



Slika br. 4.2 Pravilo desne ruke za smjer inducirane struje

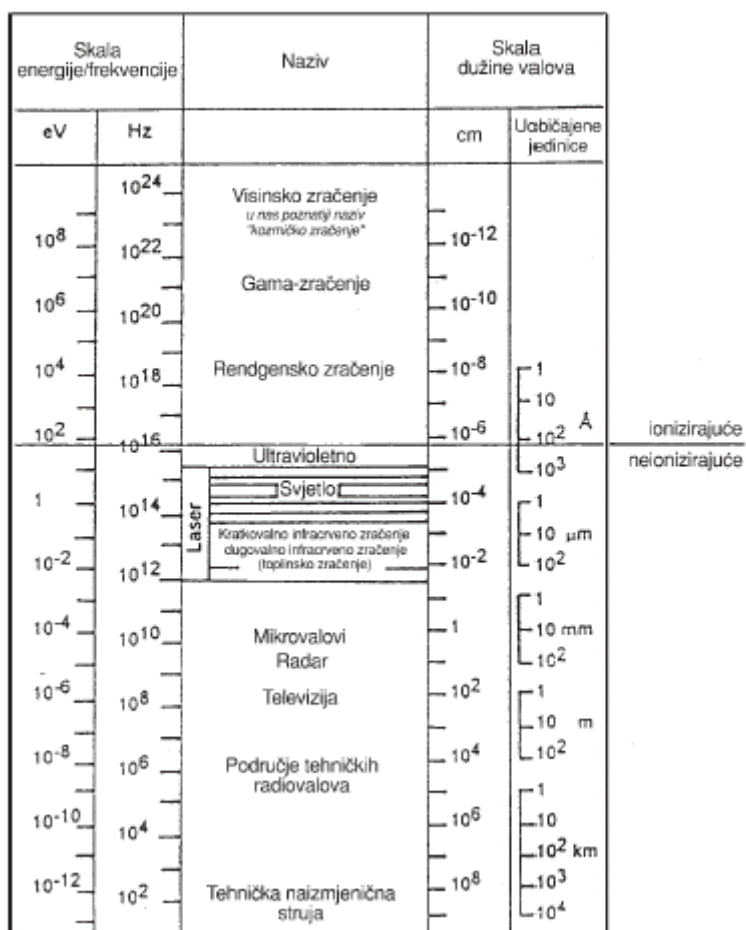
Vektorski oblik zakona indukcije  $d\varepsilon = (\vec{B} \times dl) \cdot \vec{v}$ , odnosno njegov skalarni razvoj  $d\varepsilon = Bv dl \sin \theta \cdot \cos \varphi$  upućuje na jednu važnu činjenicu. Struja se u vodiču koji se giba kroz magnetsko polje može inducirati samo ako vodič sječe silnice magnetskog polja. Vodič, dakle, ne smije biti postavljen paralelno silnicama magnetskog polja (kut  $\theta$  mora biti različit od nule), a gibanje vodiča ne smije se odvijati u ravnini koju određuju silnice magnetskog polja i uzdužna dimenzija vodiča (tj. Kut  $\varphi$  mora biti različit od  $\pi/2$ ).

## 5. ELEKTROMAGNETSKO ZRAČENJE

Elektromagnetsko zračenje je fizikalna pojava širenja električnih i magnetskih valova, odnosno ultrasitnih čestica zvanih fotoni. Fotoni su čestice bez mase koje se gibaju brzinom svjetlosti (300000 km/s) i sadrže određenu količinu energije. Elektromagnetski valovi svrstani su u elektromagnetski spektar koji se proteže od valova najmanje frekvencije i najveće valne duljine (tehnička izmjenična struja) do valova najveće frekvencije i najmanje valne duljine (visinske kozmičke zrake). Energija valova, odnosno fotona, veća je što je veća frekvencija titraja valova i što je kraća valna duljina.

Elektromagnetski spektar dijeli se na dva dijela: neionizirajuće i ionizirajuće zračenje. Valovi, zrake velike energije, mogu iz ljuske atoma izbaciti elektrone i time ionizirati atom, zato se zovu ionizirajuće zrake. Ionizirajuće zrake u koje ubrajamo rendgenske (X-zrake), gama zrake i kozmičke zrake, mogu štetno djelovati na ljudske stanice. Zrake manje energije: radiovalovi, mikrovalovi, vidljiva svjetlost, infracrvene i ultraljubičaste zrake nemaju te jačine da ioniziraju i zato se zovu neionizirajuće zrake. Njihovo djelovanje na organska tkiva, zbog slabe energije, može biti štetno pri dugom izlaganju, ali mnogo manje štetno od ionizirajućih zračenja.

## ELEKTROMAGNETSKI VALOVI



Slika br. 5.1. Elektromagnetski valovi



## **5.1. PODJELA UČINAKA ZRAČENJA NA ZDRAVLJE**

Učinci zračenja na zdravlje podijeljeni su u dvije kategorije: granični i negranični učinci. Granični učinci se pojavljuju kad je dostignuta određena količina izloženosti zračenju i dovoljno stanica je oštećeno da učinak bude vidljiv. Negranični učinci se pojavljuju pri nižim dozama izloženosti zračenju. Granični učinci se pojavljuju kad je količina izloženosti zračenju na desetke, stotine ili tisuće puta veća od pozadinskog zračenja, a trajanje izloženosti nekoliko minuta. U slijedećoj tablici prikazani su neki granični učinci i doze pri kojima se javljaju.

Negranični učinci mogu se pojaviti pri bilo kojoj količini izloženosti zračenju, ali se rizik od štetnih učinaka na zdravlje općenito povećava s porastom apsorbirane količine zračenja.

Negranični učinak koji se najviše proučava je karcinom. To proučavanje je zakomplicirano činjenicama da svaki karcinom nije uzrokovan zračenjem, da izloženost određenoj količini zračenja može uzrokovati karcinom kod jedne osobe ali ne i kod svake i da se karcinom često pojavljuje mnogo godina nakon izloženosti zračenju. U ovom trenutku je nemoguće odrediti koji karcinom je uzrokovan zračenjem, a koji ostalim kancerogenim tvarima u prirodi.

Skлонost karcinomu izazvanom zračenjem ovisi o nekoliko faktora kao što su dio tijela koji je ozračen, spol i dob. Dijelovi tijela u kojima stanice brzo rastu i brzo se množe te u kojima se koncentriraju radioaktivni materijali skloniji su pojavi karcinoma.

## **5.2. ELEKTROMAGNETSKO ONEČIŠĆENJE**

Danas možda najveću prijetnju ljudima i prirodi predstavlja elektromagnetsko onečišćenje koje se javlja kao posljedica ubrzanog tehnološkog razvoja. Najveća opasnost koja dolazi od ove vrste onečišćenja je ta što ga ne možemo osjetiti, a negativne posljedice na zdravlje se mogu vidjeti tek nakon dužeg vremena, te se obično ne povezuju sa samim elektromagnetskim onečišćenjem nego sa nekim drugim čimbenicima (stres, loša prehrana).

Iako medicina i organizacije koje se brinu o zdravlju ljudi, kao npr. Svjetska zdravstvena organizacija (WHO), opovrgavaju ili umanjuju opasnost od raznih elektronskih uređaja koji su postali neizbježni dio čovjekove svakodnevice, neosporna je činjenica da se paralelno s rastom broja mobitela i ostalih elektronskih uređaja, povećava i broj sve težih oboljenja kao što su tumori i to kod sve mlađe populacije, pa čak i djece.

## 6. ZAKLJUČAK

Ovim je radom dan sažeti pregled fizikalnih karakteristika elektromagnetskog onečišćenja. Elektromagnetsko onečišćenje je pojava s kojom se čovjek susreće u svakodnevnom životu a da toga nije ni svjestan. Upravo zbog te činjenice elektromagnetsko onečišćenje je okarakterizirano kao vrlo opasno za zdravlje čovjeka.

Sve veći broj znanstvenih istraživanja pokazao je veliku povezanost između elektromagnetskog zračenja i zdravlja čovjeka. Elektromagnetsko zračenje predstavlja podmukao, sveprisutan i nevidljiv oblik onečišćenja. Mnogi zdravstveni problemi, kao na primjer razni oblici raka (posebno rak mozga, uha i oka), spontani pobačaji, urođeni defekti, sindrom kroničnog umora, glavobolje, kronični stres, mučnina i srčani problemi, autizam, poteškoće sa učenjem i nesanica povezuju se sa izloženošću elektromagnetskom zračenju.

Ubrzani razvoj tehnologije vodi ka sve većoj opasnosti za zdravlje čovjeka. Mobilni uređaji, odašiljači, električni uređaji, dalekovodi i električni vodovi samo su neki od proizvođača elektromagnetskog zračenja koji se nalaze svugdje oko nas.

Sve više možemo svjedočiti ljudskoj razdražljivosti i zbunjenosti, a matematičke vještine kod većine stanovništva su smanjene. Koncentracija populacije mlađe od 40 godina nerazumno je u opadanju. Logičko zaključivanje i sposobnost razumijevanja su na vrlo niskom nivou, osobito u zemljama gdje su mobilni odašiljači sveprisutni.

Premda je većina ljudi svjesna štetnog utjecaja elektromagnetskog zračenja to nema nikakvog utjecaja na njihov način života. Visoka tehnologija je i dalje prisutna u svakodnevnom životu ljudi. Velike svjetske korporacije ubrzano razvijaju nove tehnologije koje su dostupne svima.

Čovjek mora biti svjestan mogućih posljedica koje izaziva prekomjerno korištenje električnih uređaja i u skladu s time se pobrinuti za svoje zdravlje i zdravlje budućih generacija. Naravno da je većini život u 21. stoljeću nezamisliv bez uređaja visoke tehnologije, ali sve ima svoje granice pa tako i u tom aspektu života neka ograničenja treba postaviti.

## **LITERATURA:**

1. CINDRO, N. (1988): Elektromagnetizam, str. 179 – 225. Fizika 2, Elektricitet i magnetizam, 2. izdanje, Školska knjiga, Zagreb.
2. ANONYMOUS (2013): Elektromagnetsko zagađenje  
<http://www.mandrilo.com/index.php/elektromagnetsko-zagadjenje> 30.07.2013.
3. VELIMIR, G. (2011): Elektromagnetsko zagađenje <http://2012-transformacijasvijesti.com/alternativna-medicina/elektromagnetsko-zagadjenje> 19.02.2011.
4. LIBRENJAK, H. (2003/2004): Elektromagnetsko zračenje  
[http://web.zpr.fer.hr/ergonomija/2004/librenjak/uvod\\_em.htm](http://web.zpr.fer.hr/ergonomija/2004/librenjak/uvod_em.htm)
5. LIBRENJAK, H. (2003/2004): Podjela učinaka na zdravlje  
<http://web.zpr.fer.hr/ergonomija/2004/librenjak/podjela.htm>
6. ANONYMOUS (2014): Najnovija istraživanja potvrđuju: elektromagnetsko zagađenje razara ljudsko zdravlje  
<http://alternativa-za-vas.com/index.php/clanak/article/odasiljaci-mobilne-telefonije-prze-ljudski-mozak>
7. OKREŠA, I. (2015): Elektromagnetsko zračenje, zdravlje i djeca  
<http://matrixworldhr.com/2015/02/17/elektromagnetsko-zracenje-zdravlje-i-djeca/>  
17.02.2015.