1 Zakon očuvanja elektriciteta

Naelektrisane čestice su realne čestice koje pored svog naelektrisanja imaju i svoju masu. Kada na te čestice djelujemo spoljašnjom silom, a to je najčešće električna sila, onda se te materijalne čestice pomjeraju u prostoru noseći pri tom i svoje naelektrisanje. Otuda logičnim izgleda zaključak da do promjene količine naelektrisanja u nekom dijelu prostora dolazi isključivo kao posledica **premještanja** naelektrisanja, kretanja naelektrisanih čestica, tj kao posledica pojave struje.
Ako unutar nekog konačnog domena, koga ograničava površina S postoji nelektrisanje q, do njegove promjene doći će isključivo ako kroz S imamo strujanje elektriciteta u ma kom pravcu (jedne čestice odlaze iz domena, a druge ulaze u domen). Pri tome, smjerom strujanja uzimamo smjer kretanja pozitivnog naelektrisanja!
U opštem slučaju, za pozitivan smjer strujanja naelektrisanja u domenu V (ograničenom sa S) možemo napisati da je struja u domenu data (kao i uvijek) količnikom dq/dt , ili matematički:

$$i = \oint_S \vec{J} d\vec{S} = -\frac{dq}{dt} \quad . \qquad (1)$$

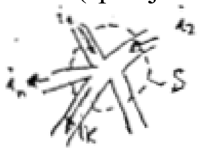
Znak minus dolazi otuda što pozitivnom izlaznom fluksu odgovara negativan priraštaj količine elektriciteta u domenu. (Drugim riječima, više je isteklo pozitivnog naelektrisanja nego što je ušlo u domen, tako da se smanjila količina pozitivnog naelektrisanja; dakle, promjena naelektrisanja unutar domena je negativna!)
Gornja relacija, koja je proizašla iz čisto logičkog rasuđivanja, zove se Zakon o održanju naelektrisanja, ili prosto, Jednačina kontinuiteta.
Za slučaj stacionarnog strujanja, kada iz domena istekne ista onolika količina naelektrisanja kolika je i ušla, imamo:

$$i = \oint_S \vec{J} d\vec{S} = 0 \qquad (2)$$

Ako se strujanje vrši u nekom konačnom broju "kanala", tada se jednačina kontinuiteta javlja u obliku:

$$\sum_{k=1}^{N} i_k = 0 \qquad (3)$$

I ovo je jedno od onih mjesta za koja nadalje koristimo Teoriju kola kao posebnu(specijalnu) disciplinu.



„+“ – struje koje izviru iz S
„-“ - struje koje uviru u S

2 Veza između intenziteta električne struje i magnetskog polja. Amperov zakon.

A)Magnetno polje, kao fizički fenomen, odavno je poznat. Sve do 1821. godine smatralo se da magnetsko polje postoji samo u okolini stalnih magneta.
Međutim, 1821. godine Ersted je utvrdio da magnetna igla skreće u blizini strujnih provodnika. Neočekivanoj činjenici, razumljivo, nije moglo biti nikakvog drugog objašnjenja do zaključka da i struja (dakle kretanje elektriciteta) dovodi do stvaranja magnetnog polja kao i kod stalnih magneta.
Erstedov zaključak se može i ovako interpretirati: budući da je, najčešće, usmjereno strujanje elektriciteta izazvano električnim poljem proizilazi, po prvi put u istoriji ove nauke, da se može naslutiti duboka veza između električnog i magnetnog polja. Naime, električno polje stvara struju, a struja stvara magnetno polje!
No, odmah da napomenemo, još uvijek se ne može tvrditi da je ta veza opšteg karaktera! Jer strujanje elektriciteta (usmjereno) ne mora biti izazvano samo električnim poljem. I mehaničko prenošenje elektriciteta (konvekciona struja) takođe izaziva magnetno polje.
Magnetno polje se karakteriše vektorom $\vec{B}$ koji se zove **vektor magnetne indukcije**. Analogno električnom polju i ovo polje se vizuelno predstavlja svojim linijama koje se sada zovu linije magnetnog polja. (One svojom gustinom određuju intenzitet vektora $\vec{B}$, a pravcem i smjerom pravac i smjer magnetnog polja.) U svakoj tački ovog polja vektor $\vec{B}$ je tangenta na linije polja. (On je istovremeno i pravac po kojem će se postaviti elementarni magneti)
Za vektor $\vec{B}$ važi relacija:

$$\oint_L \vec{B}d\vec{l} = \mu_0 \mathrm{I}_{ob} \tag{4}$$

ovo je matematički iskaz Amperovog zakona, koji važi samo za vakuum! On nam pokazuje da je cirkulacija vektora $\vec{B}$ po ma kojoj zatvorenoj liniji (konturi) L srazmjerna struji koju ta linija obuhvata. (Ponovo naglašavamo da se strujni provodnici nalaze u vakuumu!)
Konstanta μ_0 se zove magnetna permeabilnost vakuuma i izražava njegovu magnetsku karakteristiku. Ova konstanta iznosi:

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{H}{m} \tag{5}$$

Ako u prostoru (vakuumu) imamo konačan broj žičanih provodnika Amperov zakon poprima ovakav oblik:

$$\oint_L \vec{B}d\vec{l} = \mu_0 \sum_{k=1}^{N} I_k \tag{6}$$

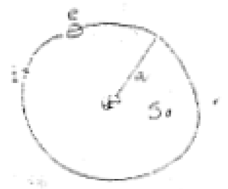
U najopštijem slučaju, kada imamo ma kakav strujni tok, Amperov zakon poprima oblik:

$$\oint_L \vec{B}d\vec{l} = \mu_0 \int_{S_L} \vec{J}d\vec{S} \tag{7}$$

Umjesno je postaviti pitanje:
Kakav bi bio oblik Amperovog zakona za slučaj ma kakve materijalne supstance? Da bismo odgovorili na ovo pitanje moramo prethodno uvesti dva nova pojma: pojam magnetnog momenta neke strujne konture i pojam vektora magnetizacije.
Posmatrajmo kretanje nekog elektrona oko njegovog jezgra, po nekoj orbiti. To kretanje je ekvivalentno jednoj strujnoj konturi i to elementarnoj strujnoj konturi! (zato se i kretanje elektrona po orbitama tretiraju kao elementrane struje ili Amperove struje.)
Svaku strujnu konturu u magnetskom pogledu možemo okarakteristai sa njenim magnetskim momentom:

$$\vec{m} = i \cdot \vec{S}_0 \tag{8}$$

gdje je: i - struja orbite, $\vec{S}_0$ - vektor površine orbite, $\vec{m}$ - magnetni moment konture.



Rolandov stav: U pogledu stvaranja magnetnog polja, strujni element $i \cdot dl$ ekvivalentan je sa $dq \cdot v$:

$$dq \cdot \upsilon = i \cdot dl \tag{9}$$

Za slučaj elektrona vodonikovog atoma može se izračunati red veličine te elementarne struje:

$$e\upsilon = i2\pi a \tag{10}$$

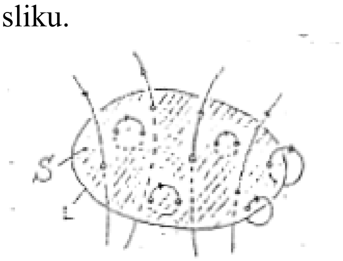
$$i = \frac{e\upsilon}{2\pi a} = \frac{e\omega a}{2\pi a} = \frac{e2\pi f}{2\pi} = ef \tag{11}$$

Ako dalje uzmemo da je frekvencija rotacije elektrona oko jezgra $f = 10^{15} Hz$, a njegovo naelektrisanje $e = -1,6 \cdot 10^{-19} C$, tada dobijamo da je red veličine ove elementarne struje $i = 10^{-4} A$.
Svaku supstancu u magnetnom pogledu možemo ekvivalentirati sa sistemom elementarnih strujnih kontura! U slučaju odsustva spoljašnjeg magnetnog polja magnetni momenti ovih elementarnih strujnih kontura haotično su raspoređeni u svim pravcima, pa je ukupni njihov magnetni moment jednak nuli. Kažemo da je supstanca nenamagnetisana. (Često se kaže i ovako: supstanca je nenamagnetisana zato što su magnetni momenti svih njenih elementarnih strujnih kontura, statistički gledano, ravnomjerno raspoređeni u svim pravcima!)

Kada pobudimo magnetno polje u toj supstanci doći će, razumljivo, do usmjeravanja magnetnih orbita u pravcu polja, ili pak u pravcu bliskom pravcu polja, tako da suma svih magnetnih momenata strujih orbita u pravcu polja više nije jednaka nuli! Tada kažemo da se supstanca namagnetisala. Dakle, ukupno magnetno polje posledica je postojanja kako makro struja (kroz provodnike) tako i mikro struja (Amperovih struja).
Ako se sada vratimo na Amperov zakon za vakuum, na desnoj strani znaka jednakosti imaćemo ($I_{ob}+I_a$), gdje I_a označava Amperove (mikro) struje, pa će izraz za Amperov zakon glasiti:

$$\oint_L \vec{B}d\vec{l} = \mu_0(I_{ob}+I_a) \tag{12}$$

Još treba samo odrediti kvantitativnu vrijednost sabirka I_a. U tom cilju posmatrajmo datu sliku.



Uočimo u nekoj supstanci proizvoljnu konturu (zatvorenu liniju) L . Ona će obuhvatiti izvjestan broj provodnika (makrostruja), a od mikrostruja uočimo samo one orbite koje obuhvataju konturu L . (Ostale orbite unutar konture L probijaju površinu S , koja se solanja na konturu, dva puta te je njihov algebarski zbir struja jednak nuli, pa ih ne uzimamo u razmatranje!) Uočimo, nadalje, na konturi L elementarni cilindar zapremine $d\upsilon$, čija se osa poklapa sa elementiom konture dl , koji predstavlja visinu tog cilindra. Ovakav elementarni cilindar može se shvatiti kao strujni element dužine dl ! U magnetnom pogledu, okarakterisaćemo ga vektorom magnetizacije $\vec{M}$, kojega definišemo količnikom:

$$\vec{M} = \frac{\sum_{d\upsilon}\vec{m}_i}{d\upsilon} = N'\cdot\vec{m} \tag{13}$$

Tj. kao količnik sume magnetnih momenata svih atoma u elementu $d\upsilon$ i zapremine tog elementa! (N' - zapreminska gustima magnetnog momenta atoma supstance.)
Izdijelimo, sada, uočenu konturu L na konačan broj malih dužina Δl_i tako da je svaki takav odsječak u stvari visina nekog malog cilindra osnovice Δs_i i zapremine $\Delta\upsilon_i$. U magnetnom pogledu, opet, svaki ovakav cilindar, duž konture L , možemo okarakterisati njegovim magnetnim momentom, pa je:

$$\Delta\vec{m}_i = N'm\Delta\upsilon_i = M\Delta\upsilon_i = M\Delta\vec{s}_i\Delta\vec{l}_i = \vec{M}\Delta\vec{l}_i\Delta s_i \tag{14}$$

$$I_a = \sum_i \Delta i_i = \sum_i \Delta i_i \frac{\Delta s_i}{\Delta s_i} = \sum_i \frac{\Delta m_i}{\Delta s_i} = \sum_i \vec{M}\frac{\Delta\vec{l}_i\Delta s_i}{\Delta s_i} = \sum_i \vec{M}\Delta\vec{l}_i \tag{15}$$

Jer je, prema definiciji, moment elementa strujne konture dat kao: $\Delta i_i\Delta s_i = \Delta m_i$. Tačnu vrijednost za ukupnu veličinu Amperovih struja dobijamo prelaskom na graničnu vrijednost, tj:

$$I_a = \lim_{i\to\infty}\sum_i \vec{M}\Delta\vec{l}_i = \oint_L \vec{M}dl \qquad (16)$$

Uvrštavanjem vrijednosti za I_a u Amperov zakon dobijamo:

$$\oint_L \vec{B}d\vec{l} = \mu_o(I_{ob} + \oint_L \vec{M}d\vec{l}) \qquad (17)$$

$$\oint_L \left(\frac{\vec{B}}{\mu_o} - \vec{M}\right)d\vec{l} = I_{ob} \qquad (18)$$

ili, označavajući $\vec{H} = \dfrac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M}$, (vektor jačine magnetnog polja) dobijamo konačno:

$$\oint_L \vec{H}d\vec{l} = I_{ob} \qquad (19)$$

Ova relacija predstavlja matematički iskaz <u>uopštenog Amperovog zakona</u>, koji, dakle, važi za <u>ma kakvu</u> materijalnu sredinu!
Vektor magnetizacije $\vec{M}$ zavisi od vektora $\vec{H}$. Naime, kod <u>linearnih i homogenih</u> sredima, sa povećanjem jačine vektora $\vec{H}$ povećava se i intenzitet vektora $\vec{M}$. Zato možemo napisati:

$$\vec{M} = \lambda_m\vec{H} \qquad (20)$$

Gdje λ_m predstavlja veličinu koja izražava sposobnost magnećenja supstance.
Iz relacije $\vec{H} = \dfrac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M}$ slijedi:

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) = \mu_0(1+\lambda_m)\vec{H} = \mu_0\mu_r\vec{H} = \mu\vec{H} \qquad (21)$$

Za linearne sredine

$$\vec{B} = \mu\vec{H} \qquad (22)$$

Veličina μ se zove <u>magnetna permeabilnost supstance.</u> Izražava sposobnost supstance da joj se orjentišu magnetni momenti više ili manje u smjeru polja, tj izražava magnetna svojstva te supstance.
Osim rotacije oko jezgra elektron vrši vrtnju i oko svoje ose. To je takozvani spin elektrona, pa se i za njega može vezati neki spinski magnetni moment. Spinski magnetni moment je ključ za objašnjenje ponašanja feromagnetnih materijala!
Napomena 1:
Vektor magnetizacije $\vec{M}$ ima prirodu vektora $\vec{H}$, jer je $M(=)\dfrac{1}{m^3}Am^2 = \dfrac{A}{m}$

Napomena 2: kakva je razlika, u fizičkom smislu, između vektora magnetne indukcije $\vec{B}$ i vektora jačine magnetnog polja $\vec{H}$?
Fizički gledano, magnetna indukcija $\vec{B}$ bi predstavljala jačinu magnetnog polja u dotičnoj sredini, dok bi vektor $\vec{H}$ predstavljao jačinu istog tog magnetnog polja da nema nikakve sredine! Otuda neki autori nazivaju ovu veličinu i pobudom!

3 Neprekidnost linija magnetnog polja. (Zakon o konzervaciji magnetnog fluksa)

Važna osobina magnetnog polja: linije magnetnog polja uvijek su <u>zatvorene</u> linije ma kakav bio izvor magnetnog polja!
(Indikaciju o zatvorenosti magnetnih linija nalazimo u eksperimentalnoj činjenici da se opiljci gvožđa raspoređuju po koncentričnim kružnicama na horizontalno postavljenom kartonu kroz koji prodire provodnik sa električnom strujom.)
Kažemo da je magnetno polje **<u>vrtložnog</u>** karaktera!
Analitički iskaz ove činjenice glasi:

$$\oint_S \vec{B}d\vec{S} = 0 \qquad (23)$$

(ova relacija je u neku ruku i očigledna imajući na umu da linije magnetnog polja prodiru kroz zatvorenu površinu S ili paran broj puta ili nula puta! Koliko linija polja uđe u S toliko ih i izađe!)
Dok je za elektrostatičko polje Gausov zakon u opštem obliku

$$\oint_S \vec{D}d\vec{S} = q \qquad (24)$$

imao fizičko značenje da su izvori vektora $\vec{D}$ slobodna naelektrisanja q, dotle gornja relacija (23), koja izražava zakon o konzervaciji magnetnog fluksa ima ovo fizičko značenje: <u>ne postoje nekakve magnetne mase, odnosno magnetna opterećenja, (odnosno magnetni polovi), koja bi, poput električnih opterećenja, predstavljala izvore magnetnog polja!</u> Pokazalo se da <u>jedini</u> izvor magnetnog polja može biti **<u>struja</u>**, odnosno <u>strujanje</u> elektriciteta! (Napomena: Vektor $\vec{S}$ je uvijek tangencijalan na linije magnetnog polja. Oblik ovih linija zavisi od forme provodnika!)

4 Zakon elektromagnetne indukcije (Faradejev zakon)

Godine 1831. Faradej je, poslije niza eksperimenata sa stalnim magnetom (izvor magnetnog polja) i <u>žičanom</u> konturom, uočio sledeće: kad god se kroz konturu mijenja magnetni fluks u konturi se indukuje električna struja! Pri tome je potpuno nebitno na koji način se ostvaruje promjena fluksa, da li
1. izvor miruje a pomjera se kontura; ili
2. kontura miruje a izvor se pomjera; ili
3. i izvor i kontura miruju, ali se magnetno polje mijenja vremenski i, na kraju
4. kombinacijom ova tri slučaja.
Kad kažemo da se indukovala struja mislimo da se indukovalo električno polje, a pošto je kontura zatvorena kažemo da se indukovala ems ε koja predstavlja linijski integral vektora $\vec{E}$ po konturi, tj

$$\varepsilon = \oint_L \vec{E}d\vec{l} = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt}\int_{S_L} \vec{B}d\vec{S} = -\int_{S_L} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}d\vec{S} \quad \text{(Faradejev zakon)} \qquad (25)$$

Znak minus predstavlja u stvari matematički iskaz **Lencovog zakona** koji prati nerazdvojno Faradejev zakon!
Naime, kada se fluks spoljašnjeg polja $\vec{B}$ povećava onda indukovana struja ima takav smjer da svojim poljem slabi spoljašnje polje, i obrnuto! Kada fluks spoljašnjeg polja kroz konturu slabi tada je indukovana struja takvog smjera da potpomaže svojim magnetnim poljem spoljašnje polje! Drugim riječima, indukovana struja je uvijek takvog smjera da se sa svojim magnetnim poljem protivi promjeni spoljašnjeg magnetnog polja kroz konturu, tj protivi se svom uzroku!
Ovo protivljenje možemo shvatiti i kao inercijalnost elektromagnetnog sistema.

5 Uopštenje Faradejevog zakona indukcije

Kada se tumači Faradejev zakon može se postaviti i ovakvo pitanje: Kakva je uloga žičane konture?
Posmatrajući izraz za Faradejev zakon

$$\oint_L \vec{E}d\vec{l} = -\int_{S_L} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S} \tag{26}$$

Maksvel uočava jednu krajnje bitnu okolnost. Naime, promjenjivo magnetno polje $(\partial \vec{B} / \partial t) \neq 0$ stvara, odnosno indukuje promenljivo električno polje! A zatim, Maksvel smatra da postojanje provodne (žičane) konture nije uslov za indukovanje električnog polja! Električno polje bi se indukovalo, po Maksvelu, u svakom slučaju, bila kontura provodna ili neprovodna! Postojanje provodne konture je samo uslov za pojavu struje u njoj. Maksvel dalje smatra da je indukovano električno polje po svojoj prirod **vrtložnog** karaktera! Njegove linije se obuhvataju sa linijama magnetnog polja, a njegova cirkulacije je jednaka:

$$\oint_L \vec{E}d\vec{l} = -\frac{d\Phi}{dt} = -\int_{S_L} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S} \quad \text{(Faradej-Maksvelov zakon)} \tag{27}$$

Pri ovom, naglasimo još jednom, za Maksvela linija L nije obavezno realna kontura (provodna ili dielektrična), već to može biti čak i neka zamišljena zatvorena linija u promenljivom magnetnom polju!
Na prvi pogled moglo bi se reći da Maksvelovo uopštenje nije u suštini ništa novo u odnosu na izvorni Faradejev zakon, utoliko prije što su matematički iskazi u oba slučaja identični!
Međutim, Maksvelovo uopštenje u svojoj dubini ima taj smisao što insistira, što najavljuje suštinsku vezu između električnog i magnetnog polja i to nezavisno od sredine!!! Za Maksvela su električno i magnetno polje **uzajamno uzročno vezani fenomeni**.
Naravno, ovakvo Maksvelovo tumačenje ne može se neposredno dokazati! S toga se ovo uopštenje, pored one Maksvelove hipoteze o struji pomjeraja u vakuumu, može shvatiti

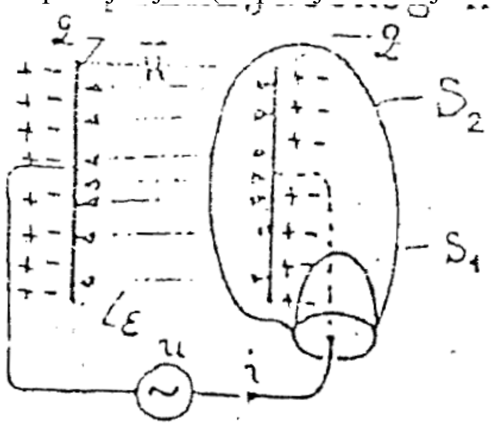
kao Druga Maksvelova hipoteza, koja će, kao i Prva, biti dokazane tek posredno u cjelini preko posledica!

6 Uopštenje Amperovog zakona

Prilikom uopštavanja Amperovog zakona došli smo na kraju do sledećeg izraza:

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = I_{ob} = \int_{S_L} \vec{J} d\vec{S} \tag{28}$$

Prećutno pretpostavljajući da struja I_{ob} koja stvara magnetno polje $\vec{H}$ je **vremenski nepromjenljiva** struja!
Valjanost gornje relacije provjerimo na slučaj pločastog kondenzatora priključenog na izvor promjenljive (na primjer naizmjenične) struje.



Promjenljiva struja u kolu data je relacijom:

$$i = \frac{dq}{dt} \tag{29}$$

Uočimo površine S_1 i S_2 koje se oslanjaju na zajedničku konturu L (vidi sliku).
Primjenjujući Amperov zakon, u gornjoj formi, na površinu S_1 dobijamo da je:

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = \int_{S_1} \vec{J} d\vec{S} = i \tag{30}$$

Dok primjenom iste relacije na površinu S_2 dobija se:

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = \int_{S_2} \vec{J} d\vec{S} = 0 \tag{31}$$

Dakle, Amperov zakon u datoj formi ne daje isti rezultat! Otuda možemo smatrati da, u datoj formi, Amperov zakon nema valjanost opšteg karaktera.
Kako proširiti Amperov zakon?
Kada smo tumačili polarizaciju supstance, tj ponašanje supstance u promjenljivom električnom polju kazali smo da pod uticajem promjenljivog električnog polja dolazi do stalnog kretanja, bolje reći titranja vezanog naelektrisanja, odnosno do pojave takozvane struje polarizacije. Za Maksvela, svako kretanje elektriciteta, pa prema tome i struja polarizacije, **dovodi do stvaranja magnetnog polja na potpuno ravnopravan način!**

Dakle, prema Maksvelu, magnetno polje ne stvara samo kondukciona i konvekciona struja već i struja pomjeraja! Otuda zaključak:
Amperov zakon treba, na desnoj strani njegovog izraza, proširiti sa još jednim sabirkom koji će predstavljati struju polarizacije

$$\oint_L \vec{H}d\vec{l} = \int_{S_L} (\vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t})d\vec{S} \tag{32}$$

Ovu relaciju s pravom možemo nazvati **Amper-Maksvelovim zakonom.**
Provjerimo sada da li u ovoj formi Amperov zakon ima opšti karakter i to opet na primjeru pločastog kondenzatora priključenog na vremenski promjenljiv izvor.
1. za površinu S_1:

$$\oint_L \vec{H}d\vec{l} = \int_{S_1} (\vec{J} + \cancel{\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}}^{0})d\vec{S} = \int_{S_1} (\vec{J} + 0)d\vec{S} = \int_{S_1} \vec{J}d\vec{S} = i$$

2. za površinu S_2:

$$\oint_L \vec{H}d\vec{l} = \int_{S_2} (\cancel{\vec{J}}^{0} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t})d\vec{S} = \int_{S_2} \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}d\vec{S} = \frac{d}{dt}\int_{S_2} \vec{D}d\vec{S} = \frac{d}{dt}\int_{S_2} \vec{D}d\vec{S} + \underbrace{\frac{d}{dt}\int_{S_1} \vec{D}d\vec{S}}_{=0} = \frac{d}{dt}\oint_{S_1+S_2} \vec{D}d\vec{S} = \frac{dQ_p}{dt} = \frac{dq}{dt} = i$$

(Napomenimo da je q_p jednako q na elektrodi kondenzatora)
Na kraju, razriješimo još neke male dileme. Naime, iz izvornog oblika Faradejevog zakona, koji glasi

$$\oint_L \vec{E}d\vec{l} = -\int_{S_L} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}d\vec{S} \tag{33}$$

Slijedi da promjenljivo magnetno polje stvara električno polje, koje je promjenljivo. S druge strane, obrnuti zaključak ne možemo izvesti ni iz Amperovog zakona u obliku

$$\oint_L \vec{H}d\vec{l} = I_{ob} = \int_{S_L} \vec{J}d\vec{S} \tag{34}$$

iz čistog razloga što struja $\vec{J}$ ne mora uvijek biti izazvana električnim poljem, već to može biti i struja izazvana čisto mehaničkim pomjeranjem (prenošenjem) elektriciteta.
Kako onda dokazati da i promenljivo električno polje stvara promjenljivo magnetno polje?
Maksvel odgovor vidi u najopštijem obliku Amperovog zakona. Naime, pretpostavimo da nema kondukcione struje. Tada Amperov zakon poprima formu:

$$\oint_L \vec{H}d\vec{l} = \int_{S_L} \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}d\vec{S} = \varepsilon\int_{S_L} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}d\vec{S} \tag{35}$$

Dakle, konstatujemo još jedanput: električno i magnetno polje su uzajamno uzročni fenomeni.

6.1 Gausova teorema i zakon o konzervaciji magnetnog fluksa za vremenski promjenljiva polja

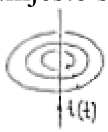
Obrazlažući zakon o konzervaciji magnetnog fluksa iskazan matematički u formi:

$$\oint_S \vec{B}d\vec{S} = 0 \tag{36}$$

Istakli smo posebno dvije činjenice:

- Linije magnetnog polja su uvijek zatvorene.
- Magnetno polje je bezizvorno polje.

Obje činjenice su u stvari fizičko tumačenje gornje matematičke relacije!
Pri svemu ovome prećutno smo pretpostavili da se posmatrano magnetno polje vremenski ne mijenja! Zato je sasvim logično sada postaviti ovakvo pitanje: Da li u istoj matematičkoj formi važi zakon o konzervaciji magnetnog fluksa i za slučaj vremenski promjenljivog magnetnog polja?
Da bismo odgovorili na ovo pitanje poslužimo se čisto logičkim rasuđivanjem i posmatrajmo opet slučaj magnetnog polja kojeg stvara provodnik kroz koji protiče, umjesto stalne, vremenski promjenljiva struja.



Očigledno je da će se sa promjenom intenziteta struje u provodniku mijenjati i intenzitet magnetnog polja oko provodnika! Ali nema nikakvog razloga ne vjerovati da će linije ovog polja zadržati isti oblik, istu formu, dok će se njihova gustina oko provodnika mijenjati u ritmu promjene struje u provodniku! Tako je, u stvari, rezonovao Maksvel.
Zaključak: zakon o konzervaciji magnetnog fluksa mora zadržati istu formu i za slučaj vremenski promjenljivog magnetnog polja!
Primijenimo isto logično rasuđivanje i za slučaj uopštene Gausove teoreme. Naime, objašnjavajući ovu teoremu istakli smo takođe dvije važne činjenice:

- Linije polja $\vec{D}$ izviru iz pozitivnog, a uviru u negativno slobodno naelektrisanje
- Električno polje je izvorno.

I jedna i druga činjenica su sadržane u matematičkoj formi ove teoreme:

$$\oint_S \vec{D}d\vec{S} = q_{ob} \tag{37}$$

Opet smo prećutno pretpostavili da se opterećenje q_{ob} ne mijenja u vremenu!
Neka je sada izvor polja $q_{ob} = q_{ob}(t)$, tj vremenski promjenljivo. Istim rezonom kao i prije zaključujemo da se promjenom nalektrisanja u vremenu mijenja i intenzitet polja $\vec{D}$, ali linije polja i dalje počinju i završavaju se na naelektrisanju $q_{ob}(t)$.
Dakle, važnost gornje relacije uopštene Gausove teoreme je nepromjenljivog oblika!
Na kraju treba dodati da su ova dva zaključka u stvari još dvije Maksvelove hipoteze, odnosno Maksvelova postulata!

7 Elektromagnetno polje

Prva i Druga Maksvelova hipoteza su izražene uopštenjem Amperovog i uopštenjem Faradejevog zakona; analitička forma ovih uopštenih zakona glasi:

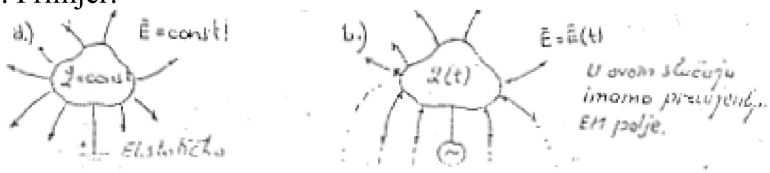
- Uopšteni Amperov zakon

$$\oint_L \vec{H}d\vec{l} = \int_{S_L} (\vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t})d\vec{S} \tag{38}$$

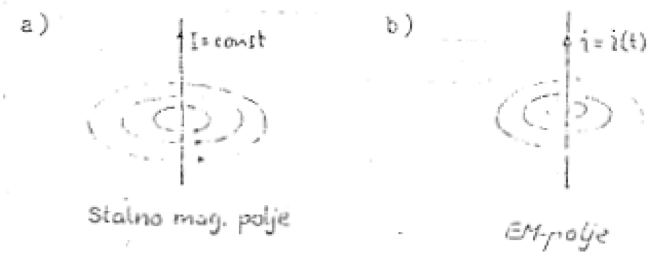
- Uopšteni Faradejev zakon

$$\oint_L \vec{E}d\vec{l} = -\int_{S_L} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}d\vec{S} \tag{39}$$

Značenje ovih relacija, kao što je to ranije istaknuto, je sledeće: Svako promjenljivo električno polje dovodi do generisanja promjenljivog magnetnog polja i obrnuto. Svako promjenljivo magnetno polje dovodi do generisanja promjenljivog električnog polja! Drugim riječima, kad god u nekom dijelu prostora pobudimo bilo promjenljivo električno polje, bilo promjenljivo magnetno polje, tada će u tom dijelu prostora istovremeno biti generisano magnetno, odnosno električno polje! Dakle, kad god imamo promjenljivo električno, odnosno magnetno polje, onda se više ne može govoriti samo o jednom od tih polja, već istovremeno o oba. Otuda je opravdano govoriti da u tom dijelu prostora postoji jedinstveno **elektromagnetno polje**, čije su komponente, električno i magnetno polje, uzajamno uzročno i suštinski vezane!
Tako smo došli do suštine elektromagnetno polja ko jedinstvenog procesa!
Ilustrujmo, na dva primjera, sva navedena polja:
1. Primjer:



2. Primjer:



Treći Maksvelov postulat dat je relacijom

$$\oint_S \vec{D}d\vec{S} = q_{ob} = \int_{\upsilon_S} \rho d\upsilon \tag{40}$$

Četvrti Maksvelov postulat glasi:

$$\oint_S \vec{B}d\vec{S} = 0 \tag{41}$$

I najzad, dodajmo prethodnim relacijama i jednačinu kontinuiteta

$$\oint_S \vec{B}d\vec{S} = -\frac{dq}{dt} \tag{42}$$

Koja karakteriše proces strujanja slobodnog nalelektrisanja. (Strujanje kroz neku zatvorenu površinu praćeno je smanjenjem ili povećanjem količine naelektrisanja u domenu ograničenom tom površinom.) ova jednačina se može iskazati i u obliku:

$$\oint_S \vec{J} d\vec{S} = -\frac{dq}{dt} = -\frac{d}{dt}\int_{\upsilon_S} \rho d\upsilon = -\int_{\upsilon_S} \frac{\partial \rho}{\partial t} d\upsilon \tag{43}$$

Dakle,

$$\oint_S \vec{J} d\vec{S} = -\int_{\upsilon_S} \frac{\partial \rho}{\partial t} d\upsilon \tag{44}$$

Ovih pet zakona predstavljaju **<u>zakone</u> elektromagnetnog polja u <u>integralnoj</u> formi.**