

1. Definicija električne poljske jakosti (Coulombov zakon)

Coulomb je ugotovil:

$$\overset{Q_2}{\underset{2}{\vec{F}_{21}}} \xrightarrow{\overset{Q_1}{\underset{1}{\vec{r}}}} \overset{Q_1}{\underset{1}{\vec{d}}} \xrightarrow{\overset{Q_2}{\underset{2}{\vec{F}_{12}}}}$$

- obe sili \vec{F}_{12} in \vec{F}_{21} tvorita dvojico sil, ki sta po vrednosti enaki in nasprotno usmerjeni

- obe sili sta prenosorazmerni elektrinama Q_1 in Q_2 ter obratnosorazmerni kvadratu razdalje med elektrinama

- v sorazmernem faktorju k sta zajeti tako geometrijska oblikovanost prostora in snovna lastnost dielektrika, ki izpolnjuje prostor

$$\vec{F}_{12} = \vec{F}_{21} = k \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \quad [\text{N}]; \quad \text{sila je vektorska veličina}$$

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21} = \vec{1}_r k \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \quad [\text{N}]$$

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \times 10^9 \quad \left[\frac{\text{Vm}}{\text{As}} \right]; \quad \epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} = \frac{10^{-9}}{36\pi} \quad \left[\frac{\text{As}}{\text{Vm}} \right]$$

Električna poljska jakost je v neki točki električnega polja podana kot sila, ki bi tam delovala na enoto pozitivne elektrine +1 As.

$$\vec{F} = \vec{E}Q \quad [\text{N}]; \quad \vec{E} = \vec{1}_r k \frac{Q_2}{r^2} \quad \left[\frac{\text{N}}{\text{As}} \right]$$

2. Potencial, napetost volt-definicija

Če v električno polje, v točko 1, postavimo elektrino Q , potem po Coulombovem zakonu velja $\vec{F} = \vec{E}Q$. Če sedaj pamakemo elektrino za dolžinski diferencial $d\vec{l}$, opravi električno polje delo $dA = \vec{F} \times d\vec{l}$. Iz tega ugotovimo, da pri premiku

elektrine iz točke 1 v točko 2: $A_{12} = Q \int_1^2 \vec{E} \times d\vec{l} = QU_{12}$;

$$U_{12} = \frac{A_{12}}{Q} = \int_1^2 \vec{E} \times d\vec{l} \quad \left[\frac{\text{J}}{\text{As}} = \text{V} \right]$$

Električna napetost je delo, ki ga opravi električno polje pri prenosu pozitivne enote elektrine +1 As iz točke 1 v točko 2.

V električnem polju je električni potencial določen šele tedaj, ko v polju določimo točko 0, kjer je $V_0 = 0$. Potem je potencial v točki A definiran kot delo, ki ga tam opravi električno polje, da prenese +1 As iz točke A v točko V_0 .

$$V_A := \int_A^0 \vec{E} \times d\vec{l} = - \int_0^A \vec{E} \times d\vec{l}$$

3. Snovni dielektriki-polarizacija

Če postavimo v električno polje snovni dielektrik, delujejo na elektrine v snovni strukturi dielektrika električne sile. Zaradi teh sil je dielektrik v električnem polju v

električnem polju v električno napetem stanju. $E = \frac{U}{d} \quad \left[\frac{\text{V}}{\text{m}} \right]$

$\mathcal{E} = \epsilon_0 \times \mathcal{E}_r$ - dielektričnost snovnega dielektrika

Pri konstantni napetosti sta elektrini v razmerju $1 : \mathcal{E}_r$; $\left(\frac{Q}{Q_0} = \epsilon_r \right)$

Pri konstantni elektrini sta napetosti v razmerju $\mathcal{E}_r : 1$; $\left(U' = \frac{U}{\epsilon_r} \right)$

ϵ_r je število, ki pove, kolikokrat je dielektričnost nekega snovnega dielektrika večja od dielektričnosti praznega prostora ϵ_0 .

Dielektrike delimo na polarne in nepolarne.

Polarni so takšni dielektriki, ki tudi v nevzbujenem stanju navzven učinkujejo kot električni dipol. Pod pojmom električni dipol razumemo dve enaki raznoimenski elektrini na zelo majhni razdalji.

Če na polarni dielektrik deluje električno polje se lahko zgodi: 1. Če je molekula gibljiva, dvojica sil zavrti dipol tako, da leži njegova os v smeri električnega polja in je vrtilni moment enak 0. To je **orientacijska** polarizacija. 2. Če molekula ni gibljiva, se razdalja med elektrinama dipola spremeni. To je **molekularna** polarizacija.

Nepolarni so takšni dielektriki, v katerih se težišči pozitivne in negativne elektrine v nevzbujenem stanju ujemata.

Na pozitivno elektrino deluje sila v smeri električne poljske jakosti, na negativno pa v nasprotni smeri. Zaradi sil se težišči elektrin ne ujemata več. To je **elektronska polarizacija**.

4. Prehod polja (D ; E) na meji dveh dielektrikov

Grafično predstavljamo električna polja z gostotnicami (\vec{D}) ali silnicami (\vec{E}).

$\vec{D} = \epsilon \vec{E}$ Če električno polje prestopa mejo med dielektrikoma pravokotno na mejno ploskev, govorimo o **normalnem (pravokotnem)** prehodu električnega polja. Normalni komponenti gostot električnega pretoka D prestopata na meji

dveh dielektrikov zvezno (D se ohranja). $\frac{E_{1n}}{E_{2n}} = \frac{\epsilon_{r2}}{\epsilon_{r1}}$ Normalni komponenti

električnih poljskih jakosti prestopata na meji dveh dielektrikov v obratnem sorazmerju z dielektričnostjo.

Če je električno polje med dielektrikoma vzporedno ali tangencialno z mejno ploskvijo, govorimo o **tangencialnem** prehodu električnega polja. Tangencialne komponente električnih poljskih jakosti na mejni ploskvi dveh dielektrikov

prestopajo zvezno (E se ohranja). $\frac{D_{1t}}{D_{2t}} = \frac{\epsilon_{r1}}{\epsilon_{r2}}$ Tangencialni komponenti gostot

električnega pretoka na mejni ploskvi dveh dielektrikov prestopata v premem sorazmerju z dielektričnostjo dielektrikov.

5. Kapacitivnost (vezave, porazdelitve U in Q)

Kapacitivnost je snovno-geometrijska lastnost $C = \frac{Q}{U} \left[\frac{C}{V} = F \right]$; $\epsilon = \frac{D}{E}$.

Pripada poljubni prostorski razmestitvi dveh kovinskih ploskev, med katerima se nahaja dielektrik.

Osnovni vezavi kondenzatorjev sta zaporedna in vzporedna.

Zaporedna vezava:

$$Q = Q_1 = Q_2 = Q_3; \quad U = U_1 + U_2 + U_3; \quad \frac{Q}{C} = \frac{Q_1}{C_1} + \frac{Q_2}{C_2} + \frac{Q_3}{C_3};$$

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$$

Recipročna vrednost nadomestne kapacitivnosti zaporedno vezanih kondenzatorjev je enaka vsoti recipročnih vrednosti kapacitivnosti posameznih kondenzatorjev.

$$\frac{U_1}{U} = \frac{C}{C_1}$$

Napetosti se razdelijo na posamezne kondenzatorje v obratnem razmerju njihovih

$$\text{kapacitivnosti. } \frac{U_1}{U_2} = \frac{C_2}{C_1}$$

Vzporedna vezava:

$$U = U_1 = U_2 = U_3; \quad Q = Q_1 + Q_2 + Q_3; \quad UC = U_1C_1 + U_2C_2 + U_3C_3; \\ C = C_1 + C_2 + C_3$$

Nadomestna kapacitivnost vzporedno vezanih kondenzatorjev je enaka soti

$$\text{kapacitivnosti posameznih kondenzatorjev. } \frac{Q}{C} = \frac{Q_1}{C_1} = \frac{Q_2}{C_2} = \frac{Q_3}{C_3}$$

Elektrine se delijo na posamezne kondenzatorje v premem razmerju kapacitivnosti.

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{C_1}{C_2}$$

6. Energija (diferencialna in integralna oblika-izpelji!)

Dielektrik je v električnem polju v elastično napetem stanju zaradi česa je v njem nakopičena energija, imenovana energija električnega polja.

$$w_e \Leftrightarrow W_e, \quad E \Leftrightarrow U, \quad D \Leftrightarrow Q, \quad \epsilon \Leftrightarrow C$$

Električno energijo, nakopičeno v celotnem električnem polju, ki ga povzroča nabor elektrin, označujemo z W_e . To je integralna veličina. $W_e = \frac{QU}{2}$; $C = \frac{Q}{U}$

Električno energijo, nakopičeno v enoti prostornine imenujemo prostorninska gostota energije in jo označujemo z w_e . To je diferencialna veličina. $w_e = \frac{DE}{2}$;

$$\epsilon = \frac{D}{E}$$

7. Mehanizem el. toka v kovinah

Kovine imajo zadnji valenčni pas le delno zaseden z elektroni. Električni tok je možen le z elektroni v delno zasedenem energijskem pasu. Pri izolatorjih in polprevodnikih pa je valenčni pas popolnoma zaseden. To velja pri nizkih temperaturah. Nad valenčnim pasom se nahaja prazen pas, imenovan prevodni pas. Med pasovoma pa je energijska reža ΔW , kjer ni energijskih stanj. Pri polprevodnikih elektroni preskočijo valenčni pas že pri majhni dovedeni energiji.

8. Svojska prevodnost, Ohmov zakon (diferencialna in integralna oblika-izpeljii!)

Svojska prevodnost je snovna lastnost prevodnikov. Predvsem je odvisna od temperature. Svojska prevodnost je odvisna od števila gibljivih nosilcev elektronov n in povprečnega časa prostega leta $\bar{\tau}$ elektrona. Število gibljivih nosilcev elektronov s porastom temperature narašča, povprečni čas prostega leta pa pada. Ali bo svojska prevodnost s porastom temperature naraščala ali padala je odvisno od spreminjanja produkta $n\bar{\tau}$.

$$\vec{J} = \gamma \vec{E} \left[\frac{A}{m^2} \right]; \quad \vec{J} \text{ in } \vec{E} \text{ sta kolinearna vektorja zato je } \gamma = \frac{ne^2\bar{\tau}}{2m_e} \left[\frac{A}{Vs} \right]$$

skalarna vrednost, imenovana specifična prevodnost in je snovna lastnost prevodne snovi. Odvisnost $\vec{J} = \gamma \vec{E}$ povezuje tri diferencialne veličine tokovnega polja. To je Ohmov zakon v diferencialni obliki.

Za znano diferencialno obliko Ohmskega zakona pripadajočo integralno obliko zapišemo tako, da diferencialne veličine zapišemo s pripadajočimi integralnimi veličinami. $\vec{J} = \gamma \vec{E} \Rightarrow I = UG$

$$J \Rightarrow I, E \Rightarrow V, \gamma \Rightarrow G, \rho \Rightarrow R$$

Ohmska prevodnost G je snovno geometrijska lastnost tokovnega polja. Definirana je kot tok, ki ga skozi določen prostor tokovnega polja požene potencialna razlika 1V, tudi ohmska prevodnost ima svojo enoto to je 1 siemens.

9. Joulov zakon (diferencialna in integralna oblika-izpelji!)

Zaradi pospeševanja v električnem polju elektron v času prostega leta pridobi dodatno kinetično energijo. V časovnem intervalu se vsak elektron enkrat zaleti, zato se del kinetične energije pretvori v izgubno energijo oziroma v Joulsko toploto.

$$\bar{w}_{el} = \frac{m_e \bar{v}_m^2}{2} = \frac{e^2 \bar{\tau}^2}{2m_e} E^2; \quad \bar{w} = n \bar{w}_{el} = \frac{ne^2 \bar{\tau}^2}{2m_e} E^2 \left[\frac{J}{m^3} \right]; \quad p = \gamma E^2 \Rightarrow$$

$$\text{dodamo Ohmov zakon} \Rightarrow J = \gamma E; \quad p = JE = \gamma E^2 = \frac{E^2}{\rho} = \frac{J^2}{\gamma} = \rho J^2$$

Integralno obliko dobimo, če upoštevamo enako strukturno obliko diferencialne in integralne oblike zakona.

$$J \Rightarrow I, \quad E \Rightarrow U, \quad \gamma \Rightarrow G, \quad \rho \Rightarrow R, \quad p \Rightarrow P$$

$$\text{Zato zapišemo: } P = IU = GU^2 = \frac{U^2}{R} = \frac{I^2}{G} = RI^2$$

10. Ohmska upornost - vezave - enostavna vezja (Theveninov, Nortonov teorem...)

Theveninov teorem pravi, da je lastna napetost U_0 aktivnega dvopola enaka napetosti na odprtih sponkah aktivnega dvopola. Notranja upornost R_n aktivnega dvopola je enaka nadomestni upornosti aktivnega dvopola, v katerem smo odstranili vse vire.

Nortonov teorem pravi, da je lastni tok I_k nadomestnega toka generatorja za aktivni dvopol enak toku skozi kratko sklenjene sponke aktivnega dvopola. Notranja prevodnost G_n nadomestnega tokovnega generatorja je enaka nadomestni prevodnosti aktivnega dvopola, v katerem smo odstranili vse vire.

11. Stacionarno magnetno polje (H, B, fluks) enostavni primeri (vodnik, zanka, tuljava)

Magnetizem je posledica elektrin v gibanju. Stacionarna magnetna polja zajemajo tiste fizikalne pojave, ki jih povzročajo enakomerno gibalne elektrine. Magnetno polje ustvarja magnetna napetost Θ . Magnetna poljska jakost H je magnetna napetost po dolžinski enoti.

$$\Theta = H \cdot l$$

Magnetna poljska jakost je **vektorska veličina**. Če v neki točki prostora magneti več tokov, moramo pripadajoče magnetne poljske jakosti seštevati **vektorsko**.

Magnetna poljska jakost pove, kako močno magnetimo v neki točki prostora. Kako močno bo magnetno polje v tej točki prostora pa zavisi še od magnetne lastnosti snovi, ki jo magnetimo. Magnetno lastnost snovi imenujemo permeabilnost μ , z magnetno poljsko jakostjo je povezana v osnovni zakonitosti magnetnega polja:

nemagnetne snovi imajo konstantno permeabilnost : $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs/Am}$ (imenujemo jo tudi permeabilnost praznega prostora - ali zraka);

za **magnetne snovi** zapišemo izraz za permeabilnost v obliki $\mu = \mu_r \mu_0$

Magnetna poljska jakost H pove, kako močno magnetimo prostor, gostota magnetnega pretoka B pa kolikšen je rezultat tega magnetenja.

12. Magnetne snovi: dia, para, feromagnetizem histerezna zanka

Paramagnetiki so tiste snovi, kjer momenti zaradi kroženja elektronov in spina niso v ravnotežju. Zato se magnetno polje v njihovi notranjosti poveča in velja $\mu_r > 1$. Relativna permeabilnost je največkrat le malenkostno večja od 1. Primeri paramagnetnih snovi so kisik, volfram, razne soli in oksidi ...

Diamagnetiki so snovi, kjer se momenti kroženja elektronov in spina kombinirajo tako, da ni rezultančnega momenta. Pod vplivom zunanega magnetnega polja se zmanjša vpliv kroženja elektronov in izniči vpliv spina. Magnetno polje znotraj takšne snovi je tako manjše v primerjavi z magnetnim poljem v praznem prostoru. Velja torej $\mu_r < 1$, kjer je relativna permeabilnost največkrat le malenkostno manjša od 1. Primeri diamagnetikov so bizmut, grafit, zlato, germanij, voda, ...

V feromagnetikih se zaradi vpliva jedrskih sil skupine atomov lokalno uredijo v isto smer. Pojav imenujemo feromagnetizem. Takšnim področjem pravimo domene, ki so velike med kvadratnim milimetrom in kvadratnim decimetrom. Domene so na začetku medsebojno neurejene, zato ne vplivajo na magnetno polje zunaj feromagnetik. Pri sobni temperaturi te lastnosti veljajo za železo, nikelj, kobalt, samarij in njihove okside.

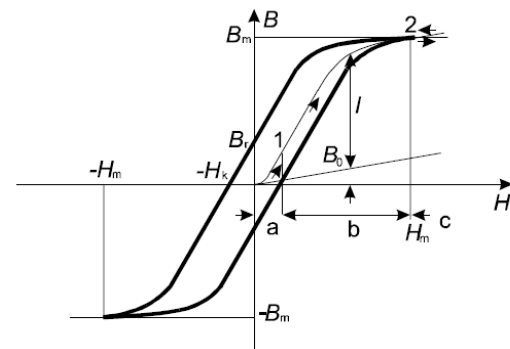
Antimagnetiki so podobni paramagnetikom, vendar se magnetni dipoli pod vplivom zunanega magnetnega polja usmerijo tako, da je magnetno polje znotraj njih približno enako nič. Primer takšne snovi je manganov oksid.

Ferimagnetiki so posebna vrsta antimagnetikov, kjer pa pod vplivom zunanega magnetnega polja rezultanta magnetnih dipolskih momentov v notranjosti ni enaka nič. Po magnetnih lastnostih so podobni feromagnetikom, natančneje feritom.

Superparamagnetiki vsebujejo feromagnetne delce, ki so ločeni z neferomagnetno snovjo. Mogoče je vplivati na vsako domeno posebej in domene ostanejo ločene tudi pod vplivom zunanega magnetnega polja. Superparamagnetiki se uporabljajo pri izdelavi magnetnih nosilcev podatkov, npr. diskov.

Histerezna zanka

Ko pride nenamagneten feromagnetik pod vpliv zunanega magnetnega polja (H), se magneti po deviški krivulji, ki je na sliki označena z a. Pri zelo majhnih H je ta krivulja kar razgibana, kar na sliki ni razvidno. Deviška krivulja velja le pri prvem magnetenju. Gostota magnetnega pretoka znotraj feromagnetika narašča le do kolenske vrednosti, po njej pa je naraščanje zelo počasno. To lahko razložimo s tem, da so se pod vplivom zunanega magnetnega polja vse domene že usmerile v to smer. Ko zunanje magnetno polje zmanjšamo na 0, gostota magnetnega pretoka v njem ostane na vrednosti B_r , ki ji pravimo remanentna gostota magnetnega pretoka. Če želimo, da znotraj feromagnetika ne bo magnetnega polja, mora zunanje jakost zunanega magnetnega polja biti enaka H_c , ki pomeni koercitivno magnetno poljsko jakost. Opazimo lahko, da se pri krivulji magnetenja ob povečevanju in manjšanju jakosti zunanega magnetnega polja razlikujeta. Temu pojavu se reče histereza. Energija, ki je potrebna za en takšen cikel, je premo sorazmerna s ploščino histerezne zanke. Če želimo, da bo feromagnetik razmagneten tudi brez zunanega magnetnega polja, moramo ves cikel nekajkrat ponoviti in pri tem postopoma zmanjševati amplituda zunanje magnetne poljske jakosti H .



13. Naelektrni delec v magnetnem polju

14. Sile v magnetnem polju

15. Elektromagnetna indukcija (razširjeni Kirchhoffov zakon)

Elektromagnetna indukcija je pojav, pri katerem nastane električna napetost v vodniku, ki se giblje v magnetnem polju tako, da smer vodnika ne sovpada s smerjo magnetnega polja, ali v električnem krogu, postavljenem v spremenljivem magnetnem polju.

Pojav je matematično prvi opisal Michael Faraday, ki je ugotovil, da je inducirana napetost U_i v zaključeni zanki premo sorazmerna hitrosti spreminjanja magnetnega pretoka Φ skozi površino te zanke. Spoznanje je danes znano kot indukcijski zakon ali Faradayev zakon:

$$U_i = - \frac{d\Phi}{dt}$$

Predznak inducirane napetosti razlaga Lenzovo pravilo, po katerem se v zanki inducirani tok, ki skuša zaradi lastne indukcije s svojim magnetnim poljem nasprotovati spremembi, ki ga je povzročila.

Pri enakomernem premikanju ravnega vodnika po homogenem magnetnem polju tako, da je vodnik pravokoten na smer magnetnega polja, smer premikanja pa pravokotna tako na vodnik kot na magnetno polje, se indukcijski zakon poenostavi v izraz:

$$U_i = lvB$$

Pri tem je l dolžina vodnika v magnetnem polju, v hitrost premikanja vodnika, B pa gostota magnetnega polja

16. Induktivnost; medsebojna induktivnost

Induktivnost je snovno-geometrijska lastnost prostora, v katerem se sklepa magnetno polje. Za nemagnetne snovi je induktivnost konstantna veličina, za magnetne snovi pa je zaradi spremenljive permeabilnosti $\mu = \mu(I)$ induktivnost funkcija toka magnetenja $L = L(I)$. V tokovni zanki ali tuljavi ima vsaka sprememba električnega toka za posledico spremembo pripadajočega magnetnega pretoka φ oziroma magnetnega sklepa ψ . Medsebojno razmerje obeh veličin določa snov v prostoru in oblikovanost prostora, ki ga magnetimo z električnim tokom. Lastna induktivnost tuljave je definirana kot razmerje med magnetnim sklepom ψ in tokom I tuljave. Enota induktivnosti je 1H (henry) = 1 Vs/A.

$$L_s = \frac{1}{\omega} \cdot \sqrt{\left(\frac{U}{I}\right)^2 - R_s^2},$$

Medsebojna induktivnost je razmerje med inducirano napetostjo v enem krogu in časovnim odvodom toka v drugem krogu. Medsebojna induktivnost M je odvisna od vezave tuljav in je lahko pozitivna ali pa negativna. Na osnovi tega lahko določimo medsebojno induktivnost tako, da dvakrat izmerimo skupno induktivnost, vendar drugič obrnemo sponke druge tuljave. Princip je na naslednji sliki.



17. Sile in energija v magnetnem polju