

Põhivara ainetes *Elekter ja magnetism* ning *Aine elektrilised omadused*

Hiljemalt septembrikuu lõpuks omandamisele kuuluv algfase (aines LOFY.01.002 FMP nõutav tase).

- Füüsika** on loodusteadus, mis uurib täppisteaduslike meetoditega looduse kahte põhivormi – **ainet** ja **välja**. Füüsika käsitleb looduse kõige üldisemaid ilminguid ehk füüsikalisi **objekte**. Objekt on see ese, nähtus või kujutlus, millele meie tegevus on parajasti suunatud. Füüsika eesmärgiks on välja selgitada looduse üldised põhjuslikud seosed ja konstrueerida looduse kõige üldisemad mudelid.
- Füüsikaline suurus** on füüsikalise objekti mõõdetav iseloomustaja (karakteristik). Füüsikaline objekt (loodusnähtus) on olemas ka ilma inimeseta. Füüsikaline suurus on inimlik vahend objekti kirjeldamiseks. Suuruse **mõõtmise** on tema väärtuse võrdlemine mõõtühikuga.
- Vastastikmõju** on põhjus, mis muudab kehade liikumisolekut (kiirust). Vastastikmõju intensiivsust kirjeldav füüsikaline suurus on **jõud**. Sõnaga *vastastikune* rõhutatakse asjaolu, et kui üks keha mõjutab teist, siis teine mõjutab ka esimest. Mõju võrdub vastumõjuga.
- Elektrilaeng** (q või Q) näitab, kui tugevasti keha osaleb elektromagnetilises vastastikmõjus. Looduses leidub kahte liiki elektrilaenguid, mida kokkuleppeliselt nimetatakse **positiivseteks** ja **negatiivseteks**. Samamargiliselt laetud kehade vahel mõjub tõukejõud, erimargiliselt laetud kehade korral aga tõmbejõud. Elektrilaengu SI-ühikuks on **üks kulon** (1 C). Elektriõpetuses kasutatakse tähise väiketähte (q, i, u) siis, kui vastav suurus on väike või muutuv ning suurt tähte (Q, I, U) siis kui tegemist on suure või muutumatu selle suuruse kogusega.
- Väli** on vastastikmõju vahendaja või siis aktiivne keskkond, mille vahendusel üks laetud keha mõjutab teist. *Väli on jõu tekkimise võimalikkus*. Aine ja välja kõige suuremaks erinevuseks on see, et aja ning ruumi mõisted on rakendatavad vaid ainele. Kuna kehad koosnevad eelkõige aineist, siis ei saa üht keha enam paigutada sinna, kus teine on juba ees. Aineosakestel on olemas personaalne ruum.
- Spinn** on alusosakese olemuslik sisemine liikumine, mis kuulub lahutamatu osakese juurde. **Aineosakese** korral on spinn tinglikult tõlgendatav osakese pöörlemisena ümber oma telje (ingl. *to spin* – pöörlema). Seda pöörlemist ei saa peatada, võib vaid muuta pöörlemistele asendit ruumis, mida nimetatakse **spinni suunaks**. Kaks vastassuunaliste spinnidega aineosakest võivad paikneda samas ruumpiirkonnas (teineteise “sees”). Nad pöörlevad ühel ja samal teljel vastandlikes suundades. **Väljaosakese** spinn on tingitud tema kulgevast liikumisest (enamasti absoluutkiirusega c)
- Töö A** on füüsikaline suurus, mis kirjeldab protsessi. Töö kirjeldab nii olukorra muutumist kui selleks vajalikku pingutust. Mehaanilise töö korral on tegemist kehade omavahelise asendi muutumisega.
- Energia** on füüsikaline suurus, mis kirjeldab olukorda. Energia on keha või jõu võime teha tööd. Kui see võime on tingitud keha liikumisest teiste kehade suhtes, siis on tegemist **kineetilise energiaga** E_k . Kui see võime on tingitud keha asendist teiste kehade suhtes, siis räägitakse **potentsiaalsest energiast** E_p . Kuna töö on protsess, mis viib ühest olukorrast teise, siis tööga kaasneb energia muutumine.
- Elementaarlaenguks e** nimetatakse vähimat laengu väärtust. $1 e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C. Prootonil on laeng $+e$, elektronil $-e$, neutronil laeng puudub. d - ja b -kvarkidel on elektrilaeng $-1/3 e$; u -, c - ja t -kvarkidel aga $+2/3 e$. Aatomeid hoiab koos prootonite ja elektronide vahel mõjuv elektriline tõmbejõud.
- Elektrilaengu jäävuse seadus** väidab, et elektriliselt isoleeritud süsteemi kogulaeng on jääv suurus. Laeng võib tekkida ja kaduda vaid paarikaupa ($+q$ ja $-q$ üheskoos).
- Vabad laengukandjad** on laetud osakesed, mis saavad liikuda kogu vaadeldava keha või ainekoguse piires.
- Elektrivool** on laengukandjate suunatud liikumine. **Voolu** (kokkuleppeliseks) **suunaks** on positiivsete laengukandjate liikumise suund (vooluringis plussilt miinusele).
- Voolutugevus** näitab, kui suur laeng läbib ajaühikus juhi ristlõiget, $I = q/t$ ja $q = I t$. Voolutugevuse ühikuks on üks **amper** (1 A). **Üks kulon** on laeng, mis läbib ühe sekundi jooksul sellise juhi ristlõiget, milles kulgeb vool tugevusega üks amper. Kuna $q = I t$, siis $1 \text{ C} = 1 \text{ A} \cdot 1 \text{ s}$.
- Punktlaenguteks** nimetatakse laetud kehi, mille mõõtmed on tühiselt väikesed võrreldes nende vahekaugusega. *Punktlaeng on keha, mille elektrilaengut võib vaadelda koondununa ühte punkti*.
- Coulomb'i seadus**: Kaks punktlaengut mõjutavad teineteist jõuga, mis on võrdeline nende laengute korrutisega ja pöördvõrdeline laengutevahelise kauguse ruuduga $F = k q_1 q_2 / r^2$. Jõud on suunatud piki laetud kehi ühendavat sirget ja sõltub aineist, milles nad asuvad. Vaakumis võrdetegur $k = 1/(4\pi \epsilon_0)$, kus suurust ϵ_0 nimetatakse **elektrikonstandiks**: $k = 9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$. See tähendab, et kahe punktlaengu 1 C vahel mõjub vaakumis vahekaugusel 1 m jõud $9 \cdot 10^9 \text{ N}$. Coulomb'i seadus on analoogiline gravitatsiooniseadusega, Coulomb'i võrdetegur k gravitatsioonikonstandiga G .

Elektrivälja tugevus E näitab, kui suur jõud mõjub selles väljas ühikulise positiivse laenguga kehale.

Väljatugevus = jõud : selle keha laeng, millele jõud mõjub, $E = F / q$. Elektrivälja tugevust võib lühidalt nimetada **E-vektoriks**. E -vektor on alati suunatud positiivselt laetud kehast eemale ja negatiivselt laetud keha poole (plussilt miinusele). Punktlaeng Q tekitab endast kaugusel r väljatugevuse $E = k Q / r^2$ (k - võrdetegur Coulomb'i seaduses).

Superpositsiooni printsiip (liitumise põhimõte): kehade süsteemi väljatugevuse leidmiseks tuleb üksikute kehade väljatugevuse vektoreid liita. Superpositsiooni printsiip tuleneb välja omadusest mitte segada teist välja (väljaosakesel ei ole vajadust personaalse ruumi järele).

Välja jõujoon on mõtteline joon, mille igas punktis on väljavektor selle joone puutuja sihiline. Jõujoone suund ühtib väljavektori suunaga. Seal, kus väli on tugevam, paiknevad jõujooned tihedamalt.

Aine dielektriline läbitavus ε näitab, kui mitu korda on elektriline jõud vaakumis (F_0) suurem jõust antud aines (F). $\varepsilon = F_0 / F$, seega $F = F_0 / \varepsilon$.

Elektrinihe D iseloomustab keskkonnast sõltumatult keha võimet tekitada elektrivälja (nihutada teisi laetud kehi). Kui laetud keha tekitab aines välja tugevusega E , siis elektrinihe D näitab, millise väljatugevuse (εE) tekitab seesama keha vaakumis. Üldiselt $D = \varepsilon_0 \varepsilon E$ (ühik $1 \text{ C} / \text{m}^2$).

Voog Φ on füüsikaline suurus, mis näitab, kuivõrd välja jõujooned läbivad mingit pinda. Voo arvutamisel tuleb välja kirjeldav suurus (D , E vms.) korrutada selle pinna pindalaga S ning koosinusega nurgast β pinna normaali ja välja suuna vahel. Näiteks elektrinihe voog $\Phi_D = D S \cos \beta$.

Gaussi seadus (teoreem): Elektrinihe voog läbi kinnise pinna võrdub selle pinna poolt piiratud laengute algebralise summaga. Üldiselt: kõik kinnise pinnaga piiratud ruumis paiknevad laengud võtavad osa välja tekitamisest pinnal.

Homogeenseks nimetatakse välja, mille tugevuse vektor on kõigis ruumi punktides ühesugune nii pikkuselt kui suunalt. Homogeense elektrivälja tugevus kahe erinimeliselt laetud tasase metallplaadi vahel avaldub kujul $E = q / \varepsilon_0 \varepsilon S$, kus q on ühe plaadi laeng ja S - selle pindala.

Väljatugevus kirjeldab välja jõu kaudu, **potentsiaal** ja **pinge** aga töö kaudu, mida vastav jõud võib ära teha, seejuures sõltumatult töö tegemise viisist (trajektoori kujust). Välja, milles tehtud töö ei sõltu trajektoori (liikumistee) kujust, nimetatakse **potentsiaalseks väljaks**. Gravitatsiooniväli ja elektrostaatiline (paigalseisvatest laetud kehade põhjustatud) väli on potentsiaalsed.

Punktlaengu q potentsiaalne energia homogeenses elektriväljas tugevusega E on esitatav kujul $E_p = q E d$, kus d on punktlaengu kaugus energia nulltasemest. Homogeenses gravitatsiooniväljas (raskusväljas) vastab sellele punktmassi m potentsiaalse energia valem $E_p = m g h$.

Ühe punktlaengu q potentsiaalne energia teise punktlaengu Q (mittehomogeenses) elektriväljas tugevusega E on esitatav kujul $E_p = q E r = k q Q / r$, kus r on laengute vahekaugus. Gravitatsiooniväljas $E_p = m g r = G m M / r$, kus $g(r) = G M / r^2$.

Välja potentsiaal φ näitab, kui suur on vaadeldavas punktis ühikulise positiivse laenguga keha potentsiaalne energia $\varphi = E_p / q$. Punktlaeng Q tekitab endast kaugusel r elektrivälja, mille potentsiaal $\varphi = k Q / r$ (k - Coulomb'i võrdetegur). Gravitatsiooniväljas $\varphi = G M / r$, kus M on välja tekitava keha mass.

Ekvipotentsiaalpinnaks nimetatakse ühesugust potentsiaali omavate väljapunktide hulka. Ekvipotentsiaalpinnad ja jõujooned on omavahel alati risti.

Pinge U on kahe väljapunkti potentsiaalide vahe, potentsiaal aga on pinge mingi kokkuleppelise nulltaseme suhtes. Pinge kirjeldab olukorda, milles välja jõud tööd teevad. Pinge on suur seal, kus töö on pingeline (seda tööd on raske teha).

Kahe punkti vaheline pinge näitab, kui suure töö teeb väli positiivset ühikulist laengut omava keha viimisel ühest punktist teise: $U = A / q$. Potentsiaali ja pinge ühikuks on üks volt.

Üks volt (1 V) on pinge elektrivälja kahe punkti vahel siis, kui laengu 1 C viimisel ühest punktist teise teeb elektriväli töö 1 J : $1 \text{ V} = 1 \text{ J} / 1 \text{ C}$. Raskusväljas $1 \text{ V} = 1 \text{ J} / 1 \text{ kg}$ (aga seda reeglina ei kasutata).

Pinge ja väljatugevuse seos: väljatugevus kahe ekvipotentsiaalpinna vahel on leitav nende pindade vahelise pinge jagamisel pindade vahekaugusega: $E = U / d$.

Üks volt meetri kohta (1 V/m) on sellise elektrivälja tugevus, milles potentsiaal muutub piki jõujoont igal meetril ühe voldi võrra: $1 \text{ V/m} = 1 \text{ N/C}$. Kuju 1 V/m kasutatakse rohkem.

Üks elektronvolt (1 eV) on töö, mida teeb elektriväli ühe elementaarlaenguga osakese (elektroni) viimisel ühest punktist teise, kui nende punktide vaheline pinge on üks volt: $1 \text{ eV} = 1 e \cdot 1 \text{ V}$.

Energeetiline seosekonstant mikro- ja makromailma vahel: $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} / e$ ehk J / eV .

- Magnetvälja** tekitab elektrivool (*laengukandjate liikumisega kaasnev elektrivälja muutumine*). Magnetvälja tekitavad aga ka aineosakesed, millel on olemas spinn. See on osakeste **omamagnetväli**.
- Püsimagnet** on magnetiliselt aktiivne keha. Püsimagneti magnetväli on tema osakeste omamagnetväljade summa. Tinglikult eristatakse püsimagneti **põhja- ja lõunapoolust** (N ja S). Kahe püsimagneti erinev nimelised poolused tõmbuvad, samanimelised aga tõukuvad. Magnetvälja kokkuleppelist suunda näitab selles väljas orienteerunud magnetnõela põhjapoolus.
- Vooluga juhtme magnetväljas** pöörduv magnetnõel juhtmega ristuvasse asendisse (Oerstedi katse). Kui ühisel keskristisrõngel paiknevates paralleelsetes juhtmetes kulgevad samasuunalised voolud, siis mõjub juhtmete vahel tõmbejõud. Vastassuunaliste voolude korral mõjub tõukejõud. Ristuvate juhtmete vahel jõudu ei mõju.
- Kahe ühepikkuse ja paralleelse juhtmelõigu vahel mõjuv jõud** on võrdeline juhtmelõikude pikkusega l ning voolutugevustega juhtmetes (I_1 ja I_2). See jõud on ka pöördvõrdeline juhtmelõikude vahekaugusega r . Ühtekokku: $F = K I_1 I_2 l / r$. Vaakumi korral võrdetegur $K = 2 \cdot 10^{-7} \text{ N/A}^2$. SI-süsteemis esitatakse ta kujul $K = \mu_0 / 2\pi$, kus suurust $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N/A}^2$ või H/m nimetatakse **magnetkonstandiks**.
- Ühik 1 A:** Kui kahe paralleelse, lõpmata pika ja lõpmata peenikese sirgjuhtme vahel, milles voolab ühesuguse tugevusega vool ja mille vahekaugus on 1 m, mõjub juhtmete pikkuse iga meetri kohta jõud $2 \cdot 10^{-7} \text{ N}$, siis voolutugevus juhtmetes on **üks amper**.
- Ampère'i seadus:** Vooluga juhtmelõigule mõjuv jõud F on võrdeline juhete läbiva voolu tugevusega I , juhtmelõigu pikkusega l ja siinusega nurgast α voolu suuna ja magnetvälja suuna vahel: $F = B I l \sin \alpha$.
- Vasaku käe reegel:** Kui vasaku käe 4 väljasirutatud sõrme osutavad voolu suunda ja magnetväli on suunatud peopessa, siis väljasirutatud põial näitab juhtmelõigule mõjuva magnetjõu suunda. Magnetjõud on alati risti nii voolu kui ka magnetvälja suunaga.
- Magnetinduktsioon** B näitab jõudu, mis mõjub ühikulise vooluga ja ühikulise pikkusega juhtmelõigule selle juhtmega ristuv magnetväljas: $B = F / (I l)$. Magnetinduktsioon on vektoriaalne suurus ja teda võib nimetada ka **B-vektori**ks. B -vektori kokkuleppelist suunda näitab magnetväljas orienteerunud magnetnõela põhjapoolus. Magnetinduktsiooni SI-ühikuks on tesla (1 T). Magnetinduktsioon kirjeldab magnetvälja samamoodi nagu väljatugevus E kirjeldab elektrivälja.
- Üks tesla** (1 T) on sellise magnetvälja induktsioon, milles välja suunaga ristuvale juhtmele pikkusega 1 m ja vooluga 1 A mõjub välja poolt jõud 1 N: $1 \text{ T} = 1 \text{ N} / (1 \text{ A} \cdot 1 \text{ m})$.
- Magnetvälja jõujoon** on mõtteline joon, mille igas punktis on B -vektor suunatud piki selle joone puutujat. Väljaspool püsimagnetit kulgevad jõujooned põhjapooluselt lõunapoolusele (N→S). Magnetvälja jõujooned on kinnised jooned ehk pöörised. Magnetväli on **solenoidaalne** väli ehk **pöörisväli**. Selle põhjuseks on asjaolu, et erinevalt elektrivälja kirjeldavast E -vektorst ei ühti magnetvälja kirjeldava B -vektori suund proovikehale mõjuva jõu suunaga.
- “Parema käe rusika” reegel:** Kui rusikasse tõmmatud parema käe väljasirutatud põial näitab voolu suunda, siis neli kõverdatud sõrme näitavad selle voolu magnetvälja suunda.
- Aine magnetiline läbitavus** μ näitab, kui mitu korda on magnetjõud selles aines (F) suurem jõust vaakumis (F_0). $\mu = F / F_0$, seega $F = \mu F_0$. Kuna magnetinduktsioon on määratud jõu kaudu, siis ka $\mu = B / B_0$, ning $B = \mu B_0$, $B_0 = B / \mu$.
- Magnetvälja tugevus** H iseloomustab keskkonnast sõltumatult voolu võimet tekitada magnetvälja. Kui vool tekitab aines magnetinduktsiooni B , siis magnetvälja tugevus H näitab, millise magnetinduktsiooni ($B_0 = B / \mu$) tekitaks seesama vool vaakumis. Üldiselt $H = B / (\mu_0 \mu)$ ja $B = \mu_0 \mu H$. Magnetvälja tugevuse ühikuks on amper meetri kohta (1 A/m).
- Sirgjuhe**, milles kulgeb vool I , tekitab endast kaugusel r magnetinduktsiooni $B = K I / r$. SI-süsteemis $B = (\mu_0 \mu / 2\pi) I / r$, kus μ on ümbritseva keskkonna magnetiline läbitavus.
- Ringjuhe** läbimõõduga d ja vooluga I , tekitab oma tsentris magnetinduktsiooni $B = \mu_0 \mu I / d$ ja seega magnetvälja tugevuse $H = I / d$.
- Üks amper meetri kohta** on sellise magnetvälja tugevus, mida tekitab oma tsentris ringjuhe läbimõõduga 1 m, kui temas kulgeb vool 1 A.
- Solenoid** (pikk ja kitsas juhtmepool), milles kulgeb vool tugevusega I , tekitab oma teljel magnetinduktsiooni $B = (\mu_0 \mu N / l) I$. Siin N - solenoidi keerdude arv ja l - solenoidi pikkus. Magnetinduktsioon on alati võrdeline teda tekitava vooluga.

Magnetilise pinge U_m leidmiseks mingil suunatud lõigul tuleb magnetvälja tugevuse projektsioon lõigu suunale (H_l) korrutada lõigu pikkusega l .

Magnetvälja tsirkulatsiooniteoreem ehk **kogu voolu seadus**: magnetiline pinge kinnisel joonel (ka: magnetimisergutus ehk magnetomotoorjõud) on võrdne kogu vooluga, mis läbib selle joonega piiratud pinda. Kõik pinda läbivad voolud võtavad osa magnetvälja tekitamisest pinna piirjoonel.

Lorentzi jõud F_L , mis mõjub laengut q omavale ja kiirusega v liikuvale osakesele magnetväljas induktiooniga B , avaldub kujul $F_L = q v B \sin \alpha$, kus α on nurk osakese liikumissuuna ja magnetvälja suuna vahel. Juhtmelõigule mõjuv magnetjõud, mis on määratud Ampère'i seadusega $F = B I l \sin \alpha$, summeerub liikuvatele laengukandjatele mõjuvatest Lorentzi magnetjõududest.

Elektromotoorjõud $\mathcal{E}$ näitab kõrvaljõudude tööd positiivse ühiklaengu ühekordsel läbiviimisel kogu vooluringist. Elektromotoorjõud on suurim pinge, mida antud vooluallikas on üldse suuteline tekitama (allikapinge) ehk siis kõigi vooluringis esinevate pingete summa.

Elektromagnetism käsitleb laetud osakeste mitteühtlast liikumist ning elektri- ja magnetnähtuste omavahelisi seoseid.

Elektromagnetilise induktiooni nähtuseks nimetatakse elektrivälja tekkimist magnetvälja muutumisel.

Seda elektrivälja nimetatakse **pööriselektriväljaks**, kuna tema jõujooned on kinnised jooned ehk pöörised (väli on solenoidaalne). Kui juhe lõikab liikumisel magnetvälja jõujooni, siis toimib juhtmes **induktsiooni elektromotoorjõud**. Kui juhe on vooluringi osa, siis tekib selles induktioonivool.

Induktsioonivoolu tekitamiseks juhtmes teeb tööd jõud, mis liigutab juhet magnetväljas. See jõud ongi induktiooni elektromotoorjõudu määravaks kõrvaljõuks. Magnetväljas liikuva juhtmelõigu kineetiline energia muundub pööriselektrivälja energiaks (see põhjustab täiendava pidurduse).

“Tavalise” magnetjõu tekkimine: magnetväli + elektrivool $\rightarrow$ magnetjõud $\rightarrow$ juhtme liikumine.

Elektromagnetiline induktioon: magnetväli + juhtme liikumine $\rightarrow$ magnetjõud $\rightarrow$ elektrivool.

Magnetväljas liikuva juhtmelõigu otstel tekkiv pinge U (induktsiooni elektromotoorjõud $\mathcal{E}$) avaldub kujul

$U = v l B \sin \alpha$, kus v on liikumise kiirus, B – magnetinduktsioon, l – juhtmelõigu pikkus ja α – nurk liikumise suuna ning magnetvälja suuna vahel (sama nurk α , mis Lorentzi jõu valemis)

Magnetvoog näitab, millisel määral läbivad magnetvälja jõujooned vaadeldavat pinda. Magnetvoog avaldub kujul $\Phi = B S \cos \beta$, kus B on magnetinduktsioon pinnal, S – pinna pindala ning β – nurk pinna normaali ja magnetvälja suuna vahel. Magnetvoo ühikuks on üks veeber.

Üks veeber (1 Wb) on magnetvoog, mis läbib pinda pindalaga 1 m^2 selle pinnaga ristuvast magnetväljas, kui välja magnetinduktsioon on 1 T. $1 \text{ Wb} = 1 \text{ T} \cdot 1 \text{ m}^2$.

Faraday induktiooniseadus: Kontuuris tekkiv induktiooni elektromotoorjõud on võrdeline magnetvoo muutumise kiirusega kontuuris. SI-süsteemi korral on võrdetegur valitud võrdseks ühega ja järelikult

$\mathcal{E}_i = - d\Phi/dt$. Miinusmärk väljendab Lenzi reeglit.

Lenzi reegel: Induktsioonivoolu suund on selline, et tema magnetväli takistaks voolu põhjustavat magnetvoo muutumist. Induktsioonivool toimib alati vastupidiselt voolu esile kutsuval põhjusele. Lenzi reegel on samaväärne mehaanikast tuntud faktiga, et hõõrdejõud toimib alati liikumapanevale jõule vastupidiselt (takistab liikumist). Matemaatiliselt: algse magnetvälja muutus ΔB ja induktioonivoolu magnetväli B_i on alati vastassuunalised.

Elektromagnetväli on elektromagnetilist vastastikmõju vahendav ühtne väli, mis võib avalduda kas elektri- või magnetväljana. Elektromagnetväli levib ruumis **elektromagnetlainena**, milles elektri- ja magnetväli muutuvad perioodiliselt teineteiseks (muutuv elektriväli tekitab muutuva magnetvälja, see aga jälle muutuva elektrivälja). Elektromagnetvälja kirjeldavad Maxwelli võrrandid.

Maxwelli võrrandid: 1) $\text{rot } \mathbf{E} = - \partial \mathbf{B} / \partial t$, ajas muutuv magnetväli (induktsiooniga $\mathbf{B}$) tekitab elektrivälja, (tugevusega $\mathbf{E}$) mille jõujooned ümbritsevad vasakpoolsete pööristena (seda näitab miinusmärk!) magnetvälja muutumise suunda, s.t. vektori $\Delta \mathbf{B}$ või $\partial \mathbf{B}$ suunda (Faraday induktiooniseadus).

2) $\text{div } \mathbf{B} = 0$, magnetväljal allikad puuduvad (jõujooned on alguse ja lõputa kinnised jooned).

3) $\text{rot } \mathbf{H} = \partial \mathbf{D} / \partial t + \mathbf{J}$, nii ajas muutuv elektriväli (muutuv elektrinihe $\mathbf{D}$) kui ka laengukandjate vahetu liikumine (mida kirjeldab voolutihedus $\mathbf{j}$) tekitavad magnetvälja (tugevusega $\mathbf{H}$), mille jõujooned ümbritsevad parempoolsete pööristena voolu (elektrivälja muutumise) suunda (kogu voolu seadus).

4) $\text{div } \mathbf{D} = \rho$, elektrostaatilise välja allikateks on elektrilaengut omavad kehad (Gaussi seadus).

Suurus ρ on elektrilaengu ruumtihedus ($\rho = dq/dV$).

Rootor (rot $\mathbf{E}$, ingliskeelses kirjanduses curl $\mathbf{E}$) on vektor, mis on parema käe rusikareegli kohaselt suunatud piki välja $\mathbf{E}$ jõujoontest moodustuvate pöörise telge. Rootor seda suurem (pikem), mida pööriselisem on väli tugevusega $\mathbf{E}$ (mida väiksema raadiusega kinnised jooned on välja $\mathbf{E}$ jõujooned).

Divergents (div $\mathbf{D}$) on nende punktide tihedus, millest välja $\mathbf{D}$ jõujooned väljuvad (välja allikate tihedus).

Divergents on skalaarsuurus. Ta on seda suurem, mida tugevam allikas paikneb vaadeldavas punktis.

Alalisvooluks nimetatakse elektrivoolu, mille tugevus ja suund ajas ei muutu.

Laengukandjate kontsentratsiooniks n nimetatakse vabade laengukandjate arvu aine ruumalaühiku kohta: $n = N/V$. Sellest $N = nV$, laengukandjate arv on kontsentratsiooni ja ruumala korrutis.

Voolutugevus I on esitatav ühe laengukandja laengu q , laengukandjate kontsentratsiooni n , suunatud liikumise kiiruse v ja juhtme ristlõikepindala S korrutisena $I = q n v S$.

Ohmi seadus: Voolutugevus juhis on võrdeline juhi otstele rakendatud pingega: $I = G U = U/R$.

Võrdetegurit G nimetatakse juhtivuseks, tema pöördväärtust R aga juhi takistuseks.

Juhi takistus näitab, kui suure pinge rakendamisel juhi otstele tekib selles juhis ühikulise tugevusega vool: $R = U/I$. Takistuse mõõtühikuks on üks oom (1Ω).

Üks oom on sellise juhi takistus, mille otstele rakendatud pingel 1 V tekitab juhis voolu 1 A.

Takistiteks nimetatakse kindlat takistust omavaid juhte. Takisti takistus on reeglina palju suurem ühendusjuhtmete takistusest. Takistite **jadaühenduse** kogutakistuse leidmisel takistusi liidetakse.

Rööpühenduse kogutakistuse leidmisel liidetakse takistuste pöördväärtusi.

Juhi takistus on võrdeline tema pikkusega ja pöördvõrdeline ristlõikepindalaga. Võrdeteguriks on aine eritakistus ρ : $R = \rho l / S$. Metallide takistust põhjustab laengukandjate vastastikmõju võnkuvate ioonidega. Mida kõrgem on temperatuur, seda rohkem ioonid võnguvad ja seda suurem on metallkeha takistus. Metallkeha takistus on reeglina võrdeline temperatuuriga.

Aine eritakistus ρ näitab, kui suur on sellest ainest valmistatud ühikulise pikkuse ja ühikulise ristlõikepindalaga keha takistus. $\rho = R S / l$. Aine eritakistuse ühikuks on üks **oom korda meeter**. $1 \Omega \cdot \text{m}$ on sellise aine eritakistus, mille tükk pikkusega 1 m ja ristlõikepindalaga 1 m^2 omab takistust 1Ω . Aine eritakistus on esitatav kujul $\rho = b / q^2 n$, kus b on liikumise takistustegur laengukandjate suunatud liikumisel, q – ühe laengukandja laeng ja n – laengukandjate kontsentratsioon.

Takistuse (eritakistuse) **temperatuuritegur** α näitab, kui suur on antud aine eritakistuse suhteline muutus 0°C juures temperatuuri tõusmisel ühe kraadi võrra. $\alpha = (\rho - \rho_0) / \rho_0$ t. Sellest $\rho = \rho_0 (1 + \alpha t)$. Takistuse temperatuuriteguri ühikuks on pöördkraad $(^\circ \text{C})^{-1}$.

Ülijuhtivas olekus aine eritakistus on praktiliselt null. Ülijuhtivus on võimalik vaid allpool kriitilist temperatuuri T_k .

Joule'i-Lenzi seadus: Elektrivoolu toimel juhis eralduv soojushulk Q on võrdeline voolutugevuse I ruuduga, juhi takistusega R ja voolu kestusega t : $Q = I^2 R t$.

Juhis tehtav töö on võrdeline voolutugevusega I , pingega U juhi otstel ja ajaga t : $A = I U t$.

Elektriseadme võimsuse saab esitada voolutugevuse ja pingel korrutisena $N = I U$. Kütteseadme või lambi **takistus tööolukorras** on leitav nimivõimsuse N ja nimipinge U kaudu valemist $R = U^2 / N$.

Üks kilovatt-tund ($1 \text{ kW} \cdot \text{h}$) on energia, mis ühe tunni jooksul eraldub seadmes võimsusega üks kilovatt. $1 \text{ kW} \cdot \text{h} = 3,6 \text{ MJ}$

Vooluallikaks nimetatakse seadet, mis muundab mitteelektrilist energiat elektrienergiaks. Vooluallikas rakenduvad mitteelektrilised jõud ehk kõrvaljõud.

Ohmi seadus kogu vooluringi kohta: $I = \mathcal{E} / (R + r)$ või $\mathcal{E} = I R + I r$, voolutugevus ahelas on võrdeline elektromotoorjõuga ja pöördvõrdeline kogutakistusega (r on vooluallika **sisetakistus**).

Sisetakistus iseloomustab vooluallika sees laengukandjate suunatud liikumist pidurdavate jõudude toimet. Pingel sisetakistusel $U_s = I r$ on mitte elektrijõu vaid just kõrvaljõu poolt tehtud töö ühikulise laengu läbiviimiseks vooluallikast.

Kahe keha omavaheline mahtuvus C näitab, kui suure laengu viimisel ühelt kehalt teisele tekib kehade vahel ühikuline pingel: $C = q / U$.

Keha mahtuvus näitab, kui suure laengu andmisel kehale tekib potentsiaali ühikuline muutus: $C = q / \Delta \varphi$. Ühe keha mahtuvusest räägitakse siis, kui teine asjaosaline keha on väga kaugel.

Üks farad (1 F) on sellise keha mahtuvus, millele tuleb anda laeng üks kulon, selleks et muuta tema potentsiaali ühe voldi võrra: $1 \text{ F} = 1 \text{ C} / 1 \text{ V}$.

Kondensaatoriks nimetatakse kehade süsteemi, mis on loodud mingi kindla mahtuvuse saamiseks. Kondensaator koosneb kahest juhtivast plaadist ehk kattedest, mille vahel paikneb dielektriku kiht. Kondensaatori mahtuvus C on tema katete omavaheline mahtuvus. Plaatkondensaatori mahtuvus on võrdeline katete pindalaga S , katetevahelise aine dielektrilise läbitavusega ε ja pöördvõrdeline katete vahekaugusega d : $C = \varepsilon_0 \varepsilon S / d$.

Elektrivälja energia kondensaatoris avaldub kujul $E_e = C U^2 / 2$, kus C on kondensaatori mahtuvus ja U - tema pinge. Kuna $U = E d$, siis on elektrivälja energia võrdeline väljatugevuse ruuduga. See on analoogiline deformeeritud keha potentsiaalse energiaga $E_p = k x^2 / 2$.

Elektrivälja energia ruumtihedus (energia ruumalaühiku kohta) $w_e = dE_e / dV$ avaldub kujul $w_e = \varepsilon_0 \varepsilon E^2 / 2$. Välja energia on alati võrdeline välja jõu kaudu kirjeldava suuruse ruuduga.

Endainduktsiooni nähtus esineb juhul, kui juhis induktsiooni elektromotoorjõudu põhjustav magnetvoo muutus on tingitud voolu muutumisest juhis endas.

Juhi induktiivsus L näitab, kui suur endainduktsiooni elektromotoorjõud tekib selles juhis voolu ühikulisel muutumisel ajaühiku jooksul, $L = - \mathcal{E}_e / (dI / dt)$ või $L = - \mathcal{E}_e / (dI / dt)$. Sellest $\mathcal{E}_e = - L dI / dt$.

Ühe juhtmekeeru korral näitab induktiivsus magnetvoo muutust $\Delta \Phi$, mille tekitab selles keerus ühikuline voolu muutus ΔI : $L = \Delta \Phi / \Delta I$. Induktiivsuse ühikuks on üks henri (1 H).

Induktiivsus kirjeldab inertsit laengukandjate liikumisel vaadeldavas juhis (nagu mass mehaanikas).

Üks henri (1 H) on sellise juhi induktiivsus, milles voolu muutumine kiirusega üks amper ühes sekundis kutsub esile endainduktsiooni elektromotoorjõu üks volt: $1 \text{ H} = 1 \text{ V} / (1 \text{ A} / 1 \text{ s}) = 1 \text{ Wb} / 1 \text{ A}$.

Magnetvälja energia juhtmepoolis induktiivsusega L ja vooluga I avaldub kujul $E_m = L I^2 / 2$. See on analoogiline kineetilise energiaga $E_k = m v^2 / 2$, mida omab liikuv keha massiga m ja kiirusega v .

Magnetvälja energia ruumtihedus (energia ruumalaühiku kohta) $w_m = dE_m / dV$ avaldub kujul $w_m = \mu_0 \mu H^2 / 2 = B^2 / 2 \mu_0 \mu$.

Elektromagnetvõnkumiste käigus muutub laetud kondensaatori elektrivälja energia voolu magnetvälja energiaks juhtmepoolis ja vastupidi. Need muutused on perioodilised, kusjuures sumbumise puudumisel omavõnkeperiood $T = 2\pi(LC)^{1/2}$ ning omavõnkesagedus $\omega_0 = 1 / (LC)^{1/2}$. Sumbuvate elektromagnetvõnkumiste ringsagedus $\omega = (\omega_0^2 - \beta^2)^{1/2}$, kus sumbetegur $\beta = R / (2L)$.

Kvantväljateooria väidab, et igasugust välja edastavad osakesed. Välja olemus on täielikult määratud osakekestega, mis seda välja edasi kannavad. Aineosakese olemust määrab omakorda viis, kuidas see osake seostub väljadega (millistes vastastikmõjudes ta osaleb).

Välja jõudude mõjuulatus on määratud vastavat mõju vahendavate osakeste keskmise elueaga. Kuna footon ja graviton on stabiilsed (eluiga lõpmatu), siis ulatub elektromagnetilise ja gravitatsioonilise välja mõju välja tekitavast kehast teoreetiliselt kuitahes kaugemale. Välja nõrgenemine pöördvõrdeliselt kauguse ruuduga on kvantväljateooria järgi tingitud sellest, et mida suurem on välja tekitavat keha ümbritseva mõttelise sfääri pindala ($4\pi r^2$), seda väiksem on tõenäosus vaheosakese jõudmiseks sfääri just sellesse punkti.