

## Põhivara aines LOFY.03.007 Elektriahelad

**Elektriahel** on süsteem, mis koosneb vooluallikatest/pingeallikatest, tarvititest ja ühendusjuhtmetest. Allikad ja tarvitid võivad olla elektriahelasse ühendatud jadamisi (järjestikku) või rööbiti (paralleelselt).

**Elektrilaeng** (ingl *charge*, tähis  $q$  või  $Q$ , edaspidi lihtsalt *laeng*) näitab, kui tugevasti keha osaleb elektromagnetilises vastastikmõjus (laeng kui keha omadus). Looduses leidub kahte liiki laenguid, mida kokkuleppeliselt nimetatakse positiivseteks ja negatiivseteks. Samamargiliselt laetud kehade vahel mõjub tõukejõud, erimargiliselt laetud kehade korral aga tõmbejõud. Laengu ühikuks SI-süsteemis on *kulon* (1 C).

**Elementaarlaenguks**  $e$  nimetatakse vähimat võimalikku vabana esinevat laengu väärtust. Prootonil on laeng  $+e$ , elektronil  $-e$ , neutronil laeng puudub.  $1 e = 1,6022 \cdot 10^{-19}$  C. Aatomeid hoiab koos prootonite ja elektronide vahel mõjuv elektriline tõmbejõud.

**Vabad laengukandjad** (*free carriers*) on laengut omavad osakesed, mis saavad liikuda kogu vaadeldava keha või ainekoguse piires. Seonduvalt kasutatakse sõna *laeng* sageli ka tähenduses "laetud osakeste kogum" (näiteks väljendid *laeng paikneb*, *laeng liigub*, *laeng läbib* juhtme ristlõiget jne).

**Elektrivool** (*current*) on laengukandjate suunatud liikumine. **Voolu** (kokkuleppeliseks) **suunaks** on positiivsete laengukandjate liikumise suund (vooluringis plussilt miinusele). Elektrinähtuste kirjeldamisel ei ole üldreeglina tähtis, kumma määrgiga laengukandjad tegelikult liiguvad.

**Alalisvool** (DC – *direct current*) on *elektrivool*, mille tugevus ja suund ajas ei muutu. Ajas täiesti konstantse tugevusega alalisvool on võimalik vaid alalispinge allika (näiteks keemilise vooluallika) korral. *Alaldi* korral on täidetud vaid voolu suuna konstantsuse nõue, mistõttu on tegemist pulseeriva alalisvooluga. Selle korral voolutugevus siiski perioodiliselt muutub, kuid mitte väga suurtes piirides.

**Voolutugevus**  $I$  näitab, kui suur elektrilaeng läbib ajaühikus juhi ristlõiget,  $I = q / t$  ja  $q = I t$ . Voolutugevuse ühikuks on üks amper (1 A). Voolutugevus on esitatav ühe laengukandja laengu  $q$ , laengukandjate kontsentratsiooni  $n$ , laengukandjate suunatud liikumise kiiruse  $v$  (triivi kiiruse) ja juhtme ristlõikepindala  $S$  korrutisena:  $I = q n v S$ .

**Amper** on *voolutugevuse* ühik, SI põhiühik. Kui kahes paralleelses, lõpmata pikas ja lõpmata peenikeses sirgjuhtmes, mille vahekaugus on 1 m, voolab ühesuguse tugevusega vool ja ühe juhtme poolt mõjub teise juhtme igale meetripikkusele lõigule jõud  $2 \cdot 10^{-7}$  N, siis voolutugevus juhtmetes on üks amper (1 A).

**Kulon** (*coulomb*) on elektrilaengu SI-ühik. Üks kulon (1 C) on laeng, mis läbib ühe sekundi jooksul sellise juhi ristlõiget, milles kulgeb vool tugevusega üks amper. Kuna  $q = I t$ , siis  $1 \text{ C} = 1 \text{ A} \cdot 1 \text{ s}$ .

**Mahutavus** on keemilist *vooluallikat* (kuivelementi või *akut*) iseloomustav suurus, mis võrdub laenguga, mida see vooluallikas on maksimaalselt laetuna suuteline vooluringist läbi viima. Mahutavust mõõdetakse ampertundides (1 Ah = 3600 C). Autoaku mahutavus on 40-100 Ah, mobiiltelefoni akul mõnisada mAh.

**Juht** (*conductor*) on aine, milles vabade laengukandjate arv ei erine palju aatomite üldarvust (erinevus on kuni 1000 korda). Juhtides tekib tugev elektrivool. Vabade laengukandjate arv juhis võib olla aatomite arvust koguni suurem (näiteks alumiiniumis 3 korda, iga  $\text{Al}^{3+}$  kohta tuleb 3 juhtivuselektroni), aga juht on ka kraanivesi, milles (Tartus) sisaldub 1 laengukandja iga 3000-4000 neutraalosakese (vee molekuli) kohta.

**Dielektrik** (täheenduses: **mittejuht**, ingl *insulator*) on aine, milles laengukandjate arv on aatomite arvust palju (üle miljardi korra) väiksem. Mõõdukas elektriväljas dielektrik ei juhi voolu, tema eritakistus on suur (nt kuival õhul ca  $10^{13}$  kuni  $10^{14}$   $\Omega\text{m}$ ). Iga dielektrikut iseloomustab labilöögi-väljatugevus. See on niisuguse elektrivälja tugevus, mille korral dielektrikus tekib elektrivool. Kuival õhul on see  $3 \cdot 10^6$  V/m = 3 kV/mm.

**Pooljuht** (*semiconductor*) on aine, milles laengukandjate arv on reguleeritav (sõltub temperatuurist, pealangevast valgusest jne.). Pooljuhid paiknevad oma elektrijuhtivuse poolest juhtide ja mittejuhtide vahel. Puhtas (lisandeid mitte sisaldavas) pooljuhis on vabade laengukandjate arv aatomite üldarvust väiksem ca  $10^6$ - $10^9$  korda, puhta pooljuhi eritakistus on kuni  $10^3$   $\Omega\text{m}$ , lisandeid sisaldavas pooljuhis aga alla  $10^{-3}$   $\Omega\text{m}$ .

**Pinge** (ka: *elektriline pinge*, ingl *voltage*)  $U$  on suurus, millega kirjeldatakse elektriväljas toimuvat protsessi või vähemasti selle toimumise võimalikkust. Protsessi kirjeldab pinge, olukorda elektrivälja mingis punktis aga kirjeldab *potentsiaal*. Protsess viib süsteemi ühest olekust teise, mistõttu töö on kahe potentsiaalse energia vahe ning vastavalt pinge on kahe *potentsiaali* vahe. Pinge  $U$  kahe punkti vahel näitab, kui suurt tööd teeb elektrivälja ühikulise positiivse laenguga keha viimisel ühest punktist teise:  $U = A/q$ . Pinge on suur seal, kus elektrivälja töö on pingeline (seda tööd on raske teha). Pinge SI-ühikuks on *volt* (1 V). See nimetus pärineb keemilise vooluallika leiutaja Alessandro Volta nimest.

**Volt** on elektrilise pinge, potentsiaali või elektromotoorjõu SI-ühik. Kui laengu 1 C viimisel ühest punktist teise teeb elektrivälja töö 1 J, siis on pinge nende punktide vahel üks volt (1 V).  $1 \text{ V} = 1 \text{ J} / 1 \text{ C}$ .

**Volt meetri kohta** (1 V/m) on elektrivälja tugevuse SI-ühik. 1 V/m on sellise elektrivälja tugevus, milles potentsiaal muutub liikumisel piki välja suunda igal meetril ühe voldi võrra.

**Pinge ja väljatugevuse seos:** väljatugevus  $E$  on leitav kahe punkti vahelise pinge  $U$  jagamisel nende punktide vahekaugusega  $l$  piki elektrivälja mõjumise suunda:  $E = U/l$ .

**Elektrivälja tugevus**  $E$  (ka:  $E$ -vektor) näitab, kui suur jõud mõjub selles väljas ühikulise positiivse laenguga kehale.  $E$ -vektor on alati suunatud positiivselt laetud kehast eemale ja negatiivselt laetud keha poole.

**Elektrivälja potentsiaal** (*potential*)  $\varphi$  näitab, kui suur on vaadeldavas punktis ühikulise positiivse laenguga keha potentsiaalne energia  $\varphi = E_p/q$ .

**Ohmi seadus:** Voolutugevus juhis on võrdeline juhi otstele rakendatud pingega:  $I = G U = U/R$ . Suurust  $G$  nimetatakse **juhtivuseks** (*conductance*), tema pöördväärtust  $R$  aga juhi **takistuseks** (*resistance*).

**Takistus**  $R$  näitab, kui suure pinge rakendamisel juhi otstele tekib selles juhis ühikulise tugevusega vool:  $R = U/I$ . Takistuse mõõtühikuks on üks oom (1  $\Omega$ ). Juhi takistus on võrdeline tema pikkusega  $l$  ja pöördvõrdeline ristlõikepindalaga  $S$ . Võrdeteguriks on aine eritakistus  $\rho$ :  $R = \rho l/S$ .

**Eritakistus**  $\rho$  (*resistivity*) iseloomustab ainet, millest koosneb uuritav juht. Aine eritakistus näitab, kui suur on sellest aineest valmistatud ühikulise pikkuse ja ühikulise ristlõikepindalaga keha takistus:  $\rho = R S/l$ . Eritakistuse SI-ühikuks on oom korda meeter (1  $\Omega \cdot m$ ). Eritakistust määravaid mikrosuursi kirjeldab valem  $\rho = b/q^2 n$ , milles  $q$  on ühe laengukandja laeng,  $b$  – liikumise takistustegur ehk takistav jõud, mis tekib laengukandja liikumisel ühikulise kiirusega ( $b = F_t/v$ ),  $n$  – laengukandjate kontsentratsioon. Suurus  $b$  võrdub laengukandja massi  $m$  ning kahe hajumisprotsessi vahelise keskmise ajavahemiku ehk elektrijuhtivuse ajateguri  $\tau$  suhtega:  $b = m/\tau$ . Eritakistuse pöördväärtust nim. **erijuhtivuseks** (*conductivity*).

**Ohmi seaduse olemust** väljendab seos:

$$U = E l = \frac{F_e}{q} l = \frac{F_t}{q} l = \frac{b v}{q} l = \frac{b}{q} \cdot \frac{I}{q n S} l = \frac{b}{q^2 n} \cdot \frac{l}{S} I = R I,$$

kus  $U$  on pinge juhi otstel,  $E$  – elektrivälja tugevus juhis,  $l$  – juhi pikkus,  $S$  – juhi ristlõikepindala,  $q$  – ühe laengukandja laeng,  $v$  – laengukandjate suunatud liikumise keskmine kiirus,  $F_e$  – ühele laengukandjale mõjuv elektrijõud,  $F_t$  – ühtlasel liikumisel (alalisvoolu korral) elektrijõuga võrdne takistusjõud.

**Oom** (*ohm*) on juhi takistuse SI-ühik. Üks oom (1  $\Omega$ ) on sellise juhi takistus, mille otstele rakendatud pinge 1 V tekitab juhis voolu 1 A. Nimetus pärineb voolutugevuse ja pinge võrdelisuse avastaja G. Ohmi nimest.

**Oom korda meeter** (1  $\Omega \cdot m$ ) on aine eritakistuse SI-ühik. 1  $\Omega \cdot m$  on sellise aine eritakistus, mille tükk pikkusega 1 m ja ristlõikepindalaga 1  $m^2$  omab takistust 1  $\Omega$ . Heade elektrijuhtide eritakistust mõõdetakse enamasti miljon korda väiksemates ühikutes mikro-oom korda meeter (1  $\mu\Omega \cdot m$  ehk  $\Omega \cdot mm^2/m$ ).

**Takistuse** (või eritakistuse) **temperatuurisõltuvus:**  $\rho = \rho_0 (1 + \alpha t)$ . Absoluutse temperatuuri  $T$  kasutamisel  $\rho = \rho_0 \alpha T$ , metalli eritakistus on laias vahemikus võrdeline temperatuuriga.

**Takistuse temperatuuritegur**  $\alpha$  näitab, kui suur on antud aine eritakistuse suhteline muutus 0  $^{\circ}C$  juures temperatuuri tõusmisel ühe kraadi võrra:  $\alpha = (\rho - \rho_0)/\rho_0 t$  (siin  $t$  – temperatuur Celsiuse skaalas). Takistuse temperatuuriteguri ühikuks on pöördkraad ( $^{\circ}C$ ) $^{-1}$ . Siin on  $\rho_0$  siis aine eritakistus 0  $^{\circ}C$  juures.

**Takistuse tekkemehhanism:** kõigi heade elektrijuhtide takistuse temperatuuritegurid on ca 0,004 ( $^{\circ}C$ ) $^{-1}$ . See näitab, et metalli takistus tekib suunatult liikuvate juhtivuselektronide vastastikmõjul soojusliikumises osalevate aatomjääkidega (ioonidega), sõltumatult juhtivuselektronide kontsentratsioonist  $n$  ja elektrijuhtivuse ajategurist  $\tau$  (vt *eritakistus*) konkreetsetes metallis. Soojuslikult võnkuvad ioonid tekitavad "seina", millelt elektronilained hakkavad "tagasi peegelduma".

**Takisti** on kindlat takistust omav juht (elektrit juhtiv keha). Takisti takistus on reeglina palju suurem ühendusjuhtmete takistusest.

**Takistite jadaühenduse** kogutakistuse  $R_j$  leidmisel takistusi liidetakse, sest kõiki jadamisi ühendatud takisteid läbib üks ja seesana vool. Sama voolutugevuse  $I$  juures liidetakse pingesid:  $U_j = U_1 + U_2 + \dots$ , millest  $I R_j = I R_1 + I R_2 + \dots$  ja seega  $R_j = R_1 + R_2 + \dots$ . Kuna juhi takistus on võrdeline tema pikkusega (valem  $R = \rho l/S$ ), siis võib ka öelda, et pikkuste liitmine läheb üle takistuste liitmiseks.

**Takistite rööpühenduse** korral liidetakse takistuste pöördväärtusi ehk juhtivusi, sest kõigile rööpharudele rakendub sama pinge  $U$  ning liidetakse voolutugevusi:  $I_r = I_1 + I_2 + \dots$  ehk  $G_r U = G_1 U + G_2 U + \dots$  ja seega  $G_r = G_1 + G_2 + \dots$  ehk  $1/R_r = (1/R_1) + (1/R_2) + \dots$ . Võib ka öelda, et ühepikkuste takistite ristlõikepindalade liitmine  $S_r = S_1 + S_2 + \dots$  läheb üle takistuste pöördväärtuste ehk juhtivuste liitmiseks.

**$n$  ühesuguse takisti** (takistusega  $R$ ) jadaühenduse takistus on  $n R$ . Samas  $n$  ühesuguse takisti rööpühenduse takistus on  $R/n$ . Mistahes jadamisi ühendamine suurendab kogutakistust, sest iga täiendava jadaühenduses takisti lisamine tekitab täiendava raskuse voolu läbiminekuks ahelast. Mistahes rööbiti ühendamine aga vähendab kogutakistust, sest iga täiendava rööpharu lisamine on voolule lisavõimaluse loomine. Kogutakistus seeläbi väheneb. **NB!** Alati tasub kontrollida, et rööpühenduse takistus oleks väiksem kummagi rööpharu takistusest.

**Kahe takisti** (takistustega  $R_1$  ja  $R_2$ ) **rööpühenduse kogutakistus** on takistuste korrutis jagatud nende summaga:  $R_r = R_1 \cdot R_2 / (R_1 + R_2)$ . Seda valemit võib rakendada korduvalt, kui rööpharusid on rohkem kui 2.

**Muudetav takisti** (*variable resistor*) on seade, mille takistust reeglina muudetakse juhi efektiivse pikkuse muutmise teel. Tuntuimad näited muudetavast takistist on reostaat ja liugkontaktiga potentsiomeeter (nn "liugpote"). Nad sisaldavad ühesugusest materjalist ja konstantse ristlõikepindalaga traati (reostaat) või metalset õhukest riba (liugpote). Seadme kasutamisel *muudetava takistina* ühendatakse vooluringi ühe otsakontakti ja keskmise liugkontakti (liuguri) vahele jääv osa seadmest. Sama seadet on võimalik kasutada ka *pingejagurina*, rakendades jagatava pinge kahe otsakontakti vahele ning võttes reguleeritava pinge ühe otsakontakti ja liuguri vahele jääva osa pealt.

**Pingejagur** on pinge reguleerimise seade, mis koosneb kahe takisti (takistustega  $R_1$  ja  $R_2$ ) jadaühendusest.

Jagatav pinge  $U$  rakendatakse jadaühenduse otstele ja see tekitab mõlemale takistile ühise voolu tugevusega  $I = U / (R_1 + R_2)$ . Seega tekib takistil  $R_2$  pinge  $U_2 = I R_2 = U \cdot R_2 / (R_1 + R_2)$ , mis on reguleeritav takistuste  $R_1$  ja  $R_2$  omavahelise vahekorra muutmise teel. Enamasti on takistusteks  $R_1$  ja  $R_2$  *muudetava takisti* (reostaadi või liugpote) kahe osa takistused ning nende vahekorda reguleeritakse liuguri nihutamise teel. **NB!** Pingejaguri valem  $U_2 = U \cdot R_2 / (R_1 + R_2)$  kehtib lihtviisiliselt vaid koormamata pingejaguri korral, st juhul kui takistiga  $R_2$  rööbiti ühendatud ahelas (toidetavas vooluahelas takistusega  $R_k$ ) ei kulge kõneväärset voolu ( $R_2 \ll R_k$ ). Kui koormustakistus  $R_k$  muutub takistusega  $R_2$  võrreldavaks (koormatud pingejagur), siis tuleb  $R_2$  pingejaguri valemis asendada rööpühenduse takistusega  $R_2 \cdot R_k / (R_2 + R_k)$ .

**Voolujagur** on voolu reguleerimise seade, mis koosneb kahe takisti (takistustega  $R_1$  ja  $R_2$ ) rööpühendusest.

Jagatav vool tugevusega  $I$  hargneb rööpühenduses kaheks haruvooluks  $I_1$  ja  $I_2$ . Sama pinge  $U$  rakendub nii rööpühendusele tervikuna ( $U = I \cdot R_r$ ) kui ka uuritavale rööpharule takistusega  $R_2$  ( $U = I_2 R_2$ ). Kuna teatavasti  $R_r = R_1 \cdot R_2 / (R_1 + R_2)$ , siis  $I_2 R_2 = I \cdot R_1 R_2 / (R_1 + R_2)$ , millest  $I_2 = I \cdot R_1 / (R_1 + R_2)$  **NB!** Kui pingejaguri valemis  $U_2 = U \cdot R_2 / (R_1 + R_2)$  seisab lugejas selle takisti enda takistus ( $R_2$ ), millelt võetakse väljundpinge  $U_2$ , siis voolujaguri valemis seisab lugejas naaberharu takistus ( $R_1$ ). Mida suurem on naaberharu (konkureeriva haru) takistus, seda suurem osa jagatavast voolust  $I$  kulgeb meie poolt uuritavas harus (takistusega  $R_2$ ), sest "kraan teise toru peal on ju kinni".

**Takistite värvikood** koosneb takisti silindrilisele korpusele kantud koaksiaalsetest värvilistest rõngastest. Neid võib olla kuni viis. Kuldsed (*gold*) ja hõbedased (*silver*) rõngad esinevad järjestuse lõpus (kolmanda või neljandana). Seega tuleb rõngaste lugemist alustada takisti sellest otsast, kus hõbedasi või kuldseid rõngaid ei ole. Takistus esitatakse kahekohalise arvuna, millele järgneb kordsustegur (*multiplier*, nt  $10^2$ ). Esimene rõngas näitab kahekohalises arvus kümneliste numbrit: pruun 1, punane 2, oranž 3, kollane 4, roheline 5, sinine 6, violetne 7, hall 8, valge 9 (värvid valguse sageduse suurenemise järjekorras). Teine rõngas näitab kahekohalises arvus analoogiliselt üheliste numbrit: must 0, pruun 1, ..., valge 9. Kolmas rõngas näitab kordsustegurit: must  $\cdot 10^0$ , pruun  $\cdot 10^1$ , punane  $\cdot 10^2$ , ..., valge  $\cdot 10^9$ . Neljas rõngas näitab takistuse väärtuse lubatud määramatust või tolerantsi (*tolerance*): pruun  $\pm 1\%$ , punane  $\pm 2\%$ , kuldne  $\pm 5\%$ , hõbedane  $\pm 10\%$ . Viies rõngas näitab töökindlust (*reliability*): pruun 1%, punane 0,1%, oranž 0,01%, kollane  $\pm 0,001\%$ .

Näide: kood kollane-violetne-oranž-hõbedane-punane tähendab, et takisti takistus on  $47 \cdot 10^3 \Omega = 47 \text{ k}\Omega$ , selle väärtuse tolerants on  $\pm 10\%$  (tõeline väärtus jääb  $42 \text{ k}\Omega$  ja  $52 \text{ k}\Omega$  vahele) ning töökindlus on 0,1%.

**Takisti töökindlus** tähendab nõuetele vastavuse säilitamist tuhande töötunni jooksul. Kui töökindlus on 1%, siis keskmiselt vaid ühel sajast takistist väljub takistuse väärtus 1000 töötunni möödumisel tolerantsi piiridega määratud vahemikust. Ülejäänud 99 takistil see jääb lubatud piiridesse. Kui töökindlus on 0,1%, siis keskmiselt vaid ühel tuhandest takistist väljub takistuse väärtus 1000 tunni jooksul lubatud piiridest.

**Lineaarseks** nimetatakse takistit, mille takistus ei sõltu pingest (takistus on konstantne, sõltuvus  $I = G U$  ehk  $I = U/R$  on võrdeline).

**Mittelineaarseks** nimetatakse takistit, mille takistus sõltub pingest (takistus ei ole konstantne, sõltuvus  $I = G U$  ehk  $I = U/R$  pole võrdeline). Tuntud mittelineaarne takisti on varistor. Kõik pn-siirdeid sisaldavad pooljuhtseadmed on ka reeglina mittelineaarsed.

**Seadme voltamperkarakteristikuks** nimetatakse seadet läbiva voolu tugevuse  $I$  ja pinge  $U$  vahelise sõltuvuse graafikut. Lineaarse seadme voltamperkarakteristik on sirge, mittelineaarsel seadmel kõverjoon.

**Termotakisti** (ingl *thermistor*) on takisti, mille takistus tugevasti sõltub temperatuurist. See võimaldab takistuse muutumise põhjal mõõta temperatuuri.

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

**Elektromotoorjõud** (EMJ, ingl *electromotive force, EMF*, tähis  $\mathcal{E}$ ) on suurim pinge, mida antud vooluallikas on üldse suuteline tekitama (pinge väljalülitatud olukorras, *off-switched voltage*). EMJ nimetatakse mõnikord ka tühipingeks või vallaspingeks. EMJ on pinge, mis tekib katkestuskohas vooluringi katkestamisel. EMJ on võrdne mitteelektriliste jõudude tööga positiivse ühiklaengu ühekordsel läbiviimisel kogu vooluringist. EMJ mõõtühikuks süsteemis SI on volt (1 V).

**Vooluallika sisetakistus** (ingl *internal resistance*)  $r$  iseloomustab allika sees laengukandjate suunatud liikumist pidurdavate jõudude toimet. Pinge sisetakistusel  $U_s = Ir$  on mitte elektrijõu vaid kõrvaljõu poolt tehtud töö ühikulise laengu läbiviimiseks vooluallikast. Tarvitamise käigus keemilise allika sisetakistus suureneb, sest reaktsioonil tekkinud aine segab reageerivate ainete omavahelist kontakteerumist.

**Vooluallikas** [ka: *pingeallikas (voltage source)*, ka lihtsalt *allikas*] on seade, mis muundab mitteelektriliste jõudude ehk kõrvaljõudude energiat elektrienergiaks. Elektrijõud saab erimärgilisi laenguid viia ainult kokku. Kõrvaljõud aga viivad neid lahku (tekivad vooluallika klemmide vahel pinge). Levinuimad allikad on keemiline allikas, mehaaniline generaator ja elektrongeneraator. **Keemilise allika** korral muudetakse elektrienergiaks keemilise sideme energiat, mehaanilises generaatoris voolava vee, auru või tuule mehaanilist energiat. Elektrongeneraatoris muudetakse ühe sageduse või pingega (enamasti jaotusvõrgust võetavat) elektrivälja energiat teise sageduse või pingega elektrivälja energias.

**Keemilised allikad** jagunevad üksikuteks elementideks (cells) ja paljudest (enamasti jadamisi) ühendatud elementidest koosnevateks patareideks (*batteries*). Kõnekeeles nimetatakse ka silindrilisi üksikelemente enamasti "patareideks". Keemilised allikad on jagatavad ka mittelaetavateks (primary cells or sources) ja laetavateks (secondary sources).

**Mittelaetavas allikas** toimuv keemiline reaktsioon on pöördumatu – kui reageerivad ained saavad otsa, siis tuleb allikas utiliseerida. Mittelaetava allika tuntuim näide on tsink-süsinik-element, kus elemendi silindrilise kesta materjalina toimiv metalliline tsink reageerib täiteainega, moodustades tsingi soola. Tsink lahku soola koostisesse ioonina  $Zn^{2+}$ , jättes oma elektronid kesta maha. Selle tagajärjel laadub kesta negatiivselt ning silindri teljel paiknev süsielektrood positiivselt. Veel kasutatakse mangaan-leelismetalli (manganese-alkaline), tsink-kloriid (zinc-chloride ehk nn heavy-duty) ja hõbe-oksiid (silver-oxide) mittelaetavaid (*primary*) elemente, mis kõik uuest peast omavad EMJ väärtust ca 1,5 V. Liitium-element (lithium cell) omab EMJ väärtust ca 3 V ja see püsib pikaajaliselt konstantsena.

**Laetava keemilise allika** korral on keemiline reaktsioon pööratav – kasutamise käigus tekkinud ühend laadimisel uuesti laguneb, laadiva allika elektrienergia arvel. Laetava allika tuntuim näide on autodes kasutatav happeaku (lead-acid battery), kus väävelhappe ( $H_2SO_4$ ) vesilahuses paiknevateks negatiivseteks elektrodideks on pliiist (Pb) koosnevad plaadid, positiivseteks elektrodideks aga plii-dioksiidist (PbO<sub>2</sub>) plaadid. Happeaku töö põhineb plii lahkumisel negatiivselt elektrodilt ioonina  $Pb^{4+}$ , negatiivset laengut kandvaid elektrone maha jättes. Elektroonikas kasutatakse laetavaid nikkel-kaadmium (ni-cad), nikkel-metallhüdriid (ni-mh), elemendi EMJ ca 1,25 V) ja liitium-ioon (li-ion) (elemendi EMJ 3,6 V) tüüpi laetavaid allikaid. Just liitium-ioon-elemente eelistatakse laptop-arvutite ja mobiiltelefonide akudes.

**Akumulaator** ehk **aku** on laetav keemiline pingeallikas. Aku võimaldab elektrienergiat ajutiselt muundada keemilise sideme energias (aku laadimine). Töötavas akus (tühjenemisel) toimub reaktsioon, mille käigus keemilise sideme energia muutub taas elektrienergiaks.

**Allika tühiseis** (koormamata seisund) on olukord, mil allikat ei kasutata. Vooluring kas puudub üldse või temas sisalduv lüliti on avatud (välistakistus  $R = \infty$  ja seega  $I = 0$ ). Pinge allika klemmidel võrdub elektromotoorjõuga. Tööd ei tehta, sest puudub liikumine.

**Allika lühis** (maksimaalselt koormatud seisund) on olukord, mil takistus allika klemmide vahel (välistakistus) võrdub nulliga ning *kogu vooluringi Ohmi seadusest* tulenevalt kulgeb ahelas lühisvool  $I_l = \mathcal{E}/r$ . Ahela välisosas tööd ei tehta, sest seal ei mõju liikumise suunas jõude, ehkki liikumine ise on olemas. Kõrvaljõud teevad tööd ainult sisetakistusel. **NB!** Allika lühist võib uurida vaid väga lühiajaliselt, sest väikese sisetakistuse  $r$  korral on lühisvool väga tugev ja allika sees eraldub väga palju soojust.

**Joule'i-Lenzi seadus:** Elektrivoolu toimetel juhul eralduv soojushulk  $Q$  (ingl. *Joule's heat*) on võrdeline voolutugevuse  $I$  ruuduga, juhi takistusega  $R$  ja voolu kestusega  $t$ :  $Q = I^2 R t$ . Juhis elektrivoolu poolt tehtav töö  $A$  on leitav valemist  $A = I U t$ .

**Elektrivoolu võimsus**  $P$  (power) on esitatav voolutugevuse ja pinge korrutisena  $P = I U$ . Jadaühenduse korral on otstarbekas kasutada seda kujul  $P = I^2 R$ , rööpühenduse korral aga kujul  $P = U^2/R$ . Sellest tulenevalt on kütteseadme või lambi takistus leitav nimivõimsuse  $P_n$  ja nimipinge  $U_n$  kaudu valemist  $R = U_n^2 / P_n$ . Kui seadme toitepinge erineb nimiväärtusest, siis eraldub seadmes ka nimivõimsusest erinev võimsus. Kuna võimsus on pingest ruutsõltuvuses (valem  $P = U^2/R$ ), siis mõjub pinge muutmine võimsusele väga järsult (nt pinge kahekordsel vähendamisel kahaneb võimsus 4 korda).

**Kilovatt-tund** (1 kW·h) on laiatarbeline elektrienergia mõõtühik. 1 kW·h on energia, mis ühe tunni jooksul eraldub seadmes võimsusega üks kilovatt. 1 kW·h = 1000 W · 3600 s = 3,6 MJ.

**Vooluallika kasuteguriks** (efficiency)  $\eta$  [kreeka täht *eeta*] nimetatakse väljaspool allikat eralduva kasuliku võimsuse  $P = I U$  ja kogu vooluringis eralduva võimsuse  $P_k = I \varepsilon$  (kus  $\varepsilon$  on EMJ) – suhet:  $\eta = P/P_k$ . Allika kasutegur iseloomustab õigupoolest mitte allikat vaid tema kasutamise tingimusi (vooluringi tervikuna). Kasuteguri väärtus suurima kasuliku võimsuse korral on 0,5 (50%). See olukord saavutatakse sise- ja välistakistuse võrdumisel:  $\eta_{\max P} = R / (R+r)$ . Koormamata olukorras (tühiseisul) on kasutegur 100 %, kuid mingit reaalset kasu me ei saa, sest voolu ju pole (liikumine puudub, tööd ei tehta).

**Maksimaalne võimsusülekanne** (kasutegur 50%) saavutatakse sisetakistuse  $r$  ja välistakistuse  $R$  võrdumise korral. Kahe mistahes elektriseadme ühendamisel on üks alati allika ja teine tarviti ehk koormuse rollis. Esimese seadme takistus on konkreetset juhul allika sisetakistuseks ja teise seadme takistus välistakistuseks. Kui soovime, et elektrienergiat maksimaalse efektiivsusega ühelt seadmelt teisele üle antaks, siis peame seadmete takistused võrdsustama. Seda nimetatakse koormuse sobitamiseks allikaga.

**Koormussirge** (load line) on  $U = f(I)$  teljestikus joonistatud sirge, mille kõik punktid kirjeldavad antud allika võimalikke tööseisundeid. Koormussirge võrrandiks on kogu vooluringi Ohmi seadus, mis on esitatud kujul  $U = -r I + \varepsilon$ . Matemaatikast tuntud sirge võrrandis  $y = a x + b$  on argumendiks  $x$  voolutugevus  $I$ , funktsiooniks  $y$  on pinge  $U$ , sirge tõusuks  $a$  on sisetakistuse vastandväärtus  $-r$  ja algordinaadiks  $b$  on allika EMJ  $\varepsilon$ . Kuna tõus on negatiivne ( $-r$ ), siis on koormussirge langev. Koormussirge ületab pinge telge tühiseisu punktis ( $U = \varepsilon, I = 0$ ) ja voolutugevuse telge lühise punktis ( $I = I_l = \varepsilon / r, U = 0$ ).

**Tööpunkti**ks nimetatakse seda koormussirge punkti, mille määrab konkreetne välistakistus  $R = U / I$  (koormustakistus). Tööpunkti ning  $I$ - ja  $U$ -telgede baasil joonistatud risküliku pindala võrdub ahelas eralduva kasuliku võimsusega, mis on maksimaalne sise- ja välistakistuse võrdumisel. Mistahes allika toimimist konkreetse tarviti korral saab graafiliselt iseloomustada koormussirge ja tööpunkti abil. Elektroonikas tehakse nii pidevalt.

**Ekvivalentahela meetod** (equivalent circuit method) seisneb ahela skeemi lihtsustamises nii, et mitu takistit (vm skeemielementi) asendatakse üheainsa, nn ekvivalentse takistiga (skeemielemendiga), mille toime ahelat läbivale voolule on samaväärne (ekvivalentne) vaadeldava mitme takisti ühise toimega. Näited: a) kaks jadamisi ühendatud takistit 30  $\Omega$  ja 50  $\Omega$  asendatakse ekvivalentse takistiga 80  $\Omega$ , b) kaks rööbiti ühendatud takistit 20  $\Omega$  ja 20  $\Omega$  asendatakse ekvivalentse takistiga 10  $\Omega$ . Analooiliselt võib ka mitut pingeallikat asendada üheainsa ekvivalentse allikaga.

**Allikate jadaühendusel** tekkiva ekvivalentallika EMJ on üksikute allikate elektromotoorjõudude summa:  $\varepsilon_j = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \dots$  ning ekvivalentallika sisetakistus on üksikute allikate sisetakistuste summa:  $r_j = r_1 + r_2 + \dots$ . Erijuhul, kui on tegemist  $n$  ühesuguse elemendiga, mis on jadamisi ühendatud patareiks (nn "lapik patarei"), avalduvad patarei EMJ  $\varepsilon_n$  ja sisetakistus  $r_n$  kujul  $\varepsilon_n = n \varepsilon_1$  ja  $r_n = n r_1$ , kus  $\varepsilon_1$  ja  $r_1$  on vastavalt ühe elemendi EMJ ja sisetakistus.

**$n$  ühesuguse allika rööpühendusel** tekkiva ekvivalentallika EMJ on võrdne üksiku allika elektromotoorjõuga. Ekvivalentallika sisetakistus avaldub kujul  $r_n = r_1 / n$ , kus  $r_1$  on ühe elemendi sisetakistus (sama, mis takistite rööpühendusel).  **$n$  erineva allika rööpühendusel** tekkiva ekvivalentallika EMJ ja sisetakistuse leidmise lihtsat eeskirja pole olemas. Tuleb rakendada Kirchhoffi seadusi.

**Kirchhoffi seadused** (ka: Kirchhoffi reeglid) võimaldavad  $n$  hargnemispunkti ehk sõlme omava ning  $m$  erinevaks kinniseks kontuuriks jagatava vooluahela kohta koostada võrrandisüsteemi, mis sisaldab  $n - 1$  sõltumatut Kirchhoffi vooluseaduse (ehk I reegli) võrrandit ja  $m - 1$  sõltumatut Kirchhoffi pingeseaduse (ehk II reegli) võrrandit. Neist võrranditest on kõiki elektromotoorjõude ja takistusi teades leitavad kõik voolutugevused (või vastupidi).

**Kirchhoffi vooluseadus** (*current law*): Hargneva vooluahela igas hargnemispunktis ehk sõlmes on voolude algebraline summa võrdne nulliga. Sõlme sisenevate (positiivsete) voolutugevuste summa võrdub sõlmest väljuvate (negatiivsete) voolutugevuste summaga. Kirchhoffi vooluseadus on sisuliselt elektri-laengu jäävuse seadus. Kuna laeng ei teki ega kao, siis peab ajaühikus mingisse sõlme sisenev laeng võrduma sellest sõlmest väljuva laenguga. Ajaühikus mingit vooluringi punkti läbiv laeng aga ongi ju voolutugevus. Kirchhoffi vooluseaduse võrrandite arv ( $n - 1$ ) on sõlmede arvust  $n$  ühe võrra väiksem põhjusel, et mingis sõlmes hargnenud voolud peavad mingis teises sõlmes jälle kokku saama. Näide: vaid kahe sõlme korral osutub ühes sõlmes üks vool ( $I_1$ ) sisenevaks ja kaks ülejäänut ( $I_2$  ja  $I_3$ ) väljuvateks ( $+I_1 - I_2 - I_3 = 0$ ), teises sõlmes aga osutuvad  $I_2$  ja  $I_3$  sisenevateks ning  $I_1$  väljuvaks ( $-I_1 + I_2 + I_3 = 0$ ). Tekkinud kaks võrrandit on identsed, sest esimese võrrandi korrutamisel  $(-1)$ -ga saame teise. Iga täiendava sõlme lisamisel saame just seda sõlme kirjeldava täiendava võrrandi, mis ei taandu varasematele.

**Kirchhoffi pingeseadus** (*voltage law*): Mistahes kinnises kontuuris, mis on välja valitud mistahes hargnevast vooluahelast, on allikate elektromotoorjõudude algebraline summa  $\sum \mathcal{E}_i$  võrdne ahela takistust omavatel lõikudel (sh allikate sisetakistused) tekkivate pingete kui voolutugevuse ja takistuse korrutiste  $I_j R_j$  (või  $I_k r_k$ ) algebralise summaga:  $\sum \mathcal{E}_i = \sum I_j R_j + \sum I_k r_k$ . Erinevate summeerimisindeksite ( $i, j, k$ ) kasutamisega rõhutame asjaolu, et mitte mingit üksühest vastavust vasak- ja parempoolse summa liidetavate vahel ei ole. Ingliskeelses kirjanduses nimetatakse elektromotoorjõude sageli (puhttakistuslikule ahelale) rakendatud pingeteks (*applied voltages*) ning voolutugevuse ja takistuse korrutisi pingelangudeks (*voltage drops*). Korrektsem oleks öelda, et EMJ rakendumisel (allika olemasolu korral) tõuseb potentsiaal ning takistil potentsiaal langeb (olukorda ahela punktis kirjeldab potentsiaal, pinge kirjeldab kujuteldavat protsessi). Mõnikord loetakse elektromotoorjõude summeerimisel positiivseteks ja pingesid takistitel negatiivseteks. Sel juhul võtab Kirchhoffi pingeseadus (vooluseadust meenutava) kuju  $\sum \mathcal{E}_i - \sum I_j R_j - \sum I_k r_k = 0$ . **NB!** Kirchhoffi pingeseadus on *kogu vooluringi Ohmi seaduse* rakendamine ühe kindla kontuuri jaoks ahelas.

**Kirchhoffi pingeseaduse rakendamine**: Vaatlusaluses kontuuris tuleb kõigepealt defineerida positiivne liikumissuund (reeglina päripäeva) ja teha oletus voolu suuna kohta igas takistis. Mingi vooluallika elektromotoorjõudu loetakse summeerimisel positiivseks, kui see vooluallikas tekitab voolu kontuuris valitud positiivses suunas. Kui allikas tekitab valitud positiivsele suunale vastupidise suunaga voolu, siis loetakse tema elektromotoorjõud summeerimisel negatiivseks. Kui oletuslik voolu suund takistis ühtib kontuuris valitud positiivse liikumissuunaga, siis loetakse pinge sellel takistil summas positiivseks. Kui oletuslik voolu suund takistis on vastupidine kontuuris valitud positiivsele liikumissuunale, siis loetakse pinge sellel takistil negatiivseks. Kui me oleme ülesande lahendanud (kõik voolutugevused leidnud), siis saame teada, kas voolu suuna suhtes tehtud oletus oli õige või mitte. Kui me saame positiivse voolutugevuse, siis oli tehtud oletus õige, kui aga saame negatiivse voolutugevuse, siis kulgeb vool selles takistis tegelikult vastupidises suunas.

**Superpositsiooniteoreem**: Voolutugevust mistahes kinnises kontuuris, mis on välja valitud mistahes hargnevast vooluahelast, võib *kogu vooluringi Ohmi seaduse abil* leida sõltumatult vooluahela teistes kontuurides analoogiliselt leitavatest voolutugevustest. Reaalne voolutugevus hargneva ahela mingis lõigus on kõigis seda lõiku läbivates kontuurides tekkivate voolutugevuste algebraline summa (superpositsioon). Superpositsiooniteoreemi rakendamisel me leiame selle voolu tugevuse, mida meid huvitavas ahela osas tekitab iga ahelas sisalduv allikas eraldi, kusjuures kõik teised allikad on asendatud ekvivalentsete takistitega, mille takistused võrduvad vastavate allikate sisetakistustega. Sisuliselt me uurime olukordi, mis tekiks, kui kõigi teiste allikate EMJ-d puuduksid. Lõpuks liidame kõigi osavoolude tugevused algebraliselt (voolu suunda arvestades) – kokku. Voolutugevusi ja pingesid hargneva ahela mistahes lõigul saab leida nii Kirchhoffi seaduste kui ka superpositsiooniteoreemi abil.

**Pingegeneraator** (*constant-voltage source*) on allikas, mille sisetakistus  $r$  on nullilähedane, seega klemmi-pinge on konstantne ja võrdub allika elektromotoorjõuga. Mistahes reaalsel allikal ( $r \neq 0$ ) võib vaadelda koosnevana jadamisi ühendatud ideaalsest pingegeneraatorist ( $r = 0$ ) ja takistist, mille takistus võrdub allika sisetakistusega. Pingegeneraator on selline allika mudel, milles potentsiaali tõstev osa on mõtteliselt eraldatud langetavast ning need osad paiknevad ahelas jadamisi.

**Voolugeneraator** (*constant-current source*) on allikas, mille sisetakistus on palju suurem mistahes välis-takistusest ( $r \rightarrow \infty$ ). Seega tekitab voolugeneraator koormuses konstantse tugevusega voolu. Mistahes reaalsel allikal ( $r \neq 0$ ) võib vaadelda koosnevana rööbiti ühendatud ideaalsest voolugeneraatorist ( $r = \infty$ ) ja takistist, mille takistus võrdub allika sisetakistusega. Voolugeneraatori töövooluks  $I_{sc}$  (*shortcut current*) nimetatakse voolu, mis läbib voolugeneraatori ühendusjuhtmeid lühistatud väljundi korral ( $R = 0$ ).

**Thevenin'i** [loe: tävenään] **teoreem:** Iga lineaarne elektriabel (kaks-klemm) on asendatav Thevenin'i generaatoriga. See on teoreemi lühim sõnastus, aga teadagi nõuab sõnaseletusi: a) Lineaarne on elektriabel, mis sisaldab ainult lineaarseid (pingest mitte sõltuva takistusega) elemente (vooluallikaid ja takisteid); b) Thevenin'i generaator on pingegeneraator, mille elektromotoorjõuks on selline pinge, mis tekib kaks-klemmi otstel, kui eeldada lõpmata suurt takistust klemmide vahel (koormamata olukord). Samas on Thevenin'i generaatori sisetakistuseks kaks-klemmi otste vaheline takistus, kui kaks-klemmis sisalduvad vooluallikad on asendatud takistitega, mille takistused vastavalt võrduvad vooluallikate sisetakistustega. Thevenin'i generaatoris on jadamisi ühendatud ideaalne pingegeneraator (sisetakistus null, EMJ leitav ülaltoodud viisil) ning sisetakistust imiteeriv takisti, mille takistus on leitav ülaltoodud viisil.

**Nortoni'i teoreem:** Iga lineaarne elektriabel (kaks-klemm) on asendatav Nortoni generaatoriga. Jälle sõnaseletused: Nortoni generaator - voolugeneraator, mille töövooluks on selline vool, mis kulgeb kaks-klemmi otste vahel siis, kui eeldada nulliga võrduvat takistust klemmide vahel (nn. kaks-klemmi lühisvool). Ka Nortoni generaatori sisetakistuseks on kaks-klemmi otste vaheline takistus, kui kaks-klemmis sisalduvad vooluallikad on asendatud takistitega, mille takistused vastavalt võrduvad vooluallikate sisetakistustega. Nortoni generaatoris on rööbiti ühendatud ideaalne voolugeneraator (sisetakistus lõpmatu, töövool leitav ülaltoodud viisil) ning sisetakistust imiteeriv takisti.

**Thevenin'i ja Nortoni** aseskeemide rakendamine on otstarbekas juhtudel, kui elektriabla mingi osa takistust varieeritakse (optimeeritakse). Ahela ülejäänud osa asendatakse Thevenin'i või Nortoni generaatoriga, mille parameetrid (Thevenin'i generaatori EMJ, Nortoni generaatori töövool, sisetakistus) eelnevalt leitakse ning varieeritavat takistust käsitletakse generaatori koormustakistina. Kaob vajadus ahela igakordseks terviklikuks läbiarvutamiseks.

**Pinge- ja voolugeneraatori omavaheline vahetatavus** (*source conversion possibility*) tuleneb Thevenin'i ja Nortoni teoreemide samaaegsest kehtivusest ning faktist, et Thevenin'i ja Nortoni generaatorite sisetakistus on leitav ühesuguse eeskirja järgi (ühendame takistumõõturi kaks-klemmi väljundisse oludes, kus elektromotoorjõud puuduvad, allikad on mõtteliselt asendatud sisetakistust imiteerivate takistitega). Pingegeneraatori EMJ jagamisel generaatori sisetakistusega saame selle pingegeneraatoriga samaväärse voolugeneraatori töövoolu. Ideaalsele pingegeneraatorile ( $r = 0$ ) vastava voolugeneraatori töövool on lõpmata suur (aga praktikas seda ju peaaegu ei esine). Voolugeneraatori töövoolu tugevuse korrutamisel generaatori sisetakistusega saame samaväärse pingegeneraatori elektromotoorjõu.

**Sõlmpotentsiaalide meetod** (*nodal analysis*) seisneb Kirchhoffi vooluseaduse rakendamises viisil, kus ahela ühe sõlme potentsiaal defineeritakse nulliks ja teiste sõlmede potentsiaalid  $\varphi_i$  esitatakse pingetena  $U_i$  null-sõlme või võrdlussõlme (*reference node*) suhtes. Allikad esitatakse voolugeneraatoritena, nende generaatorite töövoolud on ka uuritavasse sõlme sisenevateks või sellest väljuvateks vooludeks. Voolutugevused passiivsetes (generaatorit mitte sisaldavates) ahela harudes esitatakse uuritava ( $i$ -nda) sõlme ja nullsõlme vahelise pinge  $U_i$  ning nende sõlmede vahele jääva ahela osa juhtivuse  $G_i = 1/R_i$  (ühikutes  $1S = 1\ \Omega^{-1}$  ehk siimens) korrutistena  $U_i G_i$ . Tekib süsteem, mis sisaldab nii mitut Kirchhoffi vooluseaduse võrrandit, kui palju on ahelas erinevaid mitte-nullise potentsiaaliga sõlmi. Kui teada on kõik takistused (juhtivused) ja generaatorite töövoolud, siis on selle võrrandisüsteemi lahendamisel leitavad kõik pinged (sõlmede potentsiaalid). Sõlmpotentsiaalide meetod on sobiv juhtudel, mil ahel sisaldab palju rööpharusid. Tulemusena tekib palju samaväärseid (sama potentsiaali omavaid) sõlmi. Samaväärsete sõlmede rühma võib sõlmpotentsiaalide meetodi rakendamisel vaadelda ühtse, nn supersõlmena (*supernode*).

**Kontuurvoolude meetod** (*mesh analysis*) seisneb Kirchhoffi pingeseaduse rakendamises viisil, kus hargnev ahel jagatakse vähimateks võimalikeks kontuurideks või võrgusilmadeks (*mesh*). Allikad esitatakse pingegeneraatoritena. Iga kontuuriga seostatakse kindel kontuurvool ning eeldatakse, et see kulgeb kontuuris päripäeva. Seetõttu on kontuurvoolud naaberkontuurides vältimatult vastassuunalised. Kontuurvoolu võrrandi ühel poolel paiknevad: a) kontuuri kogutakistuse  $R_T$  (*total*) ja konkreetse kontuuri (näiteks A) kontuurvoolu tugevuse  $I_A$  korrutis  $I_A R_T$ , mis loetakse positiivseks ning b) naaberkontuuride (B,C,D..) kontuurvoolude tugevuste ( $I_B, I_C, I_D \dots$ ) korrutised antud kontuurile ning naaberkontuurile ühiste ahelaosade takistustega ( $R_{AB}, R_{AC}, R_{AD} \dots$ ). Need korrutised loetakse negatiivseteks, kuna kontuurvool naaberkontuuris on alati vastassuunaline voolule antud kontuuris. Võrrandi teisel poolel paikneb kõigi antud kontuuris toimivate elektromotoorjõudude algebraline summa. Kui vastav allikas toimib kontuurvooluga samasuunaliselt, siis loetakse tema EMJ summeerimisel positiivseks, vastupidisel juhul aga negatiivseks.

**Kontuurvoolude meetod** seisneb seega võrrandite  $I_A R_T - I_B R_{AB} - I_C R_{AC} - \dots = \sum \mathcal{E}_i$  moodustamises. Tekib süsteem, mis sisaldab nii mitut Kirchhoffi pingeseaduse võrrandit, kui palju on ahelas elementaarkontuure. Kui teada on kõik takistused ja generaatorite elektromotoorjõud  $\mathcal{E}_i$ , siis on selle võrrandisüsteemi lahendamisel leitavad kõigi kontuurvoolude tugevused. Reaalne voolutugevus ahela mingis osas on seda osa läbivate kontuurvoolude tugevuste vahe. Kontuurvoolude meetod on sobiv juhtudel, mil ahel sisaldab palju omavahel ühisosa omavaid kontuure. Kontuurvoolude meetodi eelis tavalise Kirchhoffi seaduste metoodika ees seisneb selles, et käsitletakse ainult elementaarseid kontuure (mitte kõiki võimalikke kontuure).

**Kolmnurklülitus** ( $\Delta$ , *delta*) seisneb kolme takisti või muu skeemielemendi kokku ühendamises nii, et nad moodustavad võrdkülgse kolmnurga (nagu täht  $\Delta$ ). Lülituse klemme kui kolmnurga tippu tähistatakse tähtedega A, B, C. Tippude vastas paiknevaid kolmnurga külgi tähistatakse vastavalt tähtedega X, Y, Z (nii et A vastas paikneb X jne). Küljed kui skeemielemendid omavad vastavalt takistusi  $R_X$ ,  $R_Y$  ja  $R_Z$ .

**Tähtlülitus** (Y, *wye*) seisneb kolme takisti või muu skeemielemendi kokku ühendamises nii, et neile vastavad lõigud moodustavad sümmeetrilise Y-tähe, omades ühist otspunkti Y-tähe keskel. Tähtlülituse välimisi (mitteühiseid) punkte kui lülituse klemme tähistatakse tähtedega A, B, C. Nendest punktidest algavad ning keskel ühisel punktis lõppevad lülituse lõigud omavad vastavalt takistusi  $R_A$ ,  $R_B$  ja  $R_C$ . **NB!** Kolmnurk- ja tähtlülitus on kolmklemmid, erinevalt seni käsitletud kaksiklemmidest. Nad leiavad laialdast kasutamist kolmefaasilises vahelduvvooluvõrgus.

**Kolmnurk-täht-siire** (*delta-wye transformation*) on võtte reaalselt skeemis esineva kolmnurklülituse asendamiseks temaga samaväärse tähtlülitusega. Selle tähtlülituse A-lõigu takistuse  $R_A$  leidmiseks tuleb kolmnurga A-nurgast lähtuva kahe külje takistuste korrutis jagada kolmnurga kõigi kolme külje takistuste summaga:  $R_A = R_Y R_Z / (R_X + R_Y + R_Z)$ . Analoogiliselt ka  $R_B = R_X R_Z / (R_X + R_Y + R_Z)$  ja  $R_C = R_X R_Y / (R_X + R_Y + R_Z)$ .

**Täht-kolmnurk-siire** (*wye-delta transformation*) on võtte reaalselt skeemis esineva tähtlülituse asendamiseks temaga samaväärse kolmnurklülitusega. Näiteks kolmnurga X-külje takistuse leidmiseks tuleb tähe kõigist lõikudest moodustatud paaride (AB, BC, CA) takistuste korrutiste summa ( $R_A R_B + R_B R_C + R_C R_A$ ) jagada tähe selle lõigu (A) takistusega, mis paikneb kolmnurga X-külje vastas. Niisiis

$R_X = (R_A R_B + R_B R_C + R_C R_A) / R_A$ ;  $R_Y = (R_A R_B + R_B R_C + R_C R_A) / R_B$  ja  $R_Z = (R_A R_B + R_B R_C + R_C R_A) / R_C$ . Juhtivuste jaoks:  $G_X = G_B G_C / (G_A + G_B + G_C)$  ning  $G_Y = G_A G_C / (G_A + G_B + G_C)$  ja  $G_Z = G_A G_B / (G_A + G_B + G_C)$ .

**Magnetväli** on elektrivälja muutumisega (laengukandjate suunatud liikumisega) kaasnev jõuväli. Magnetvälja tekitavad aga ka aineosakesed, millel on olemas spinn. See on osakeste omamagnetväli. Magnetvälja kokkuleppelist suunda (**B**-vektori suunda) näitab selles väljas orienteerunud magnetnõela põhjapoolus. Magnetvälja kirjeldamist raskendab (võrreldes elektriväljaga) peamiselt fakt, et magnetnähtustes osalevad nii liikuvaid laengukandjaid sisaldavad kehad ehk vooluga juhtmed kui ka omamagnetväljaga aineosakesi sisaldavad kehad ehk püsimagnetid. Magnetnõel on väike pikergune pöördumisvõimeline püsimagnet.

**Püsimagnet** on magnetiliselt aktiivne keha. Püsimagneti magnetväli on tema osakeste omamagnetväljade summa. Tinglikult eristatakse püsimagneti **põhja- ja lõunapoolust** (N ja S). Kahe püsimagneti erinimelised poolused tõmbuvad, samanimelised aga tõukuvad. Magnetvälja kokkuleppelist suunda (**B**-vektori suunda, vt allpool) näitab selles väljas orienteerunud magnetnõela põhjapoolus.

**Ampère'i seadus**: Kaks pikka ja peenikest paralleelset sirgjuhet mõjutavad teineteist magnetjõuga  $F_m$ , mis on võrdeline voolutugevustega kummaski juhtmes ( $I_1$  ja  $I_2$ ) ning selle juhtmelõigu pikkusega  $l$ , millele jõud mõjub. Magnetjõud on ka pöördvõrdeline juhtmelõikude vahekaugusega  $r$ . Ühtekokku:  $F_m = K I_1 I_2 l / r$ . Vaakumi korral võrdetegur  $K = 2 \cdot 10^{-7} \text{ N/A}^2$ . Vooluga juhtmelõigule mõjuv magnetjõud  $F_m$  on alati võrdeline juhet läbiva voolu tugevusega  $I$ , juhtmelõigu pikkusega  $l$  ja siinusega nurgast  $\alpha$  voolu suuna ja magnetvälja suuna vahel:  $F_m = B I l \sin \alpha$ . Jõud on risti nii voolu kui magnetvälja suundadega.

**Vooluga juhtme magnetväljas pöördub magnetnõel juhtmega ristuvasse asendisse** (Oersted katse). Kui ühisel keskristisringel paiknevates paralleelsetes juhtmetes kulgevad samasuunalised voolud, siis mõjub juhtmete vahel tõmbejõud. Vastassuunaliste voolude korral mõjub tõukejõud. Ristuvate juhtmete vahel jõudu ei mõju.

**Magnetinduktsioon**  $B$  (ka **B**-vektor) näitab jõudu, mis mõjub ühikulise vooluga ja ühikulise pikkusega juhtmelõigule selle juhtmega ristuvast magnetväljas:  $B = F / (I l)$ .  $B$ -vektori kokkuleppelist suunda näitab magnetväljas orienteerunud magnetnõela põhjapoolus. Inglise-USA õpikutes (sh Jackson) nimetatakse suurust  $B$  enamasti magnetvoo tiheduseks (*magnetic flux density*).

**Tesla** (1 T) on magnetinduktsiooni SI-ühik. 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 püsिमagnetit kulgevad jõujooned põhjapooluselt lõunapoolusele ( $N \rightarrow S$ ). Sirgjuhtme ümber paiknevad jõujooned kontsentriliste ringjoontena, mille keskpunktid asetsevad juhtmel. Vooluga juhtme-pooli ehk solenoidi sees on magnetvälja jõujooned paralleelsed solenoidi teljega, solenoidi ühest otsast väljudes ja teisest otsast uuesti sisenedes. Magnetvälja jõujooned on alati kinnised jooned ehk pöörised.

**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.

**Ühik 1 A:** Kui kahe paralleelse, lõpmata pika ja lõpmata peenikese sirgjuhtme korral, milles voolab ühesuguse tugevusega vool ja mille vahekaugus on 1 m, mõjutab üks juhe teise juhtme mistahes ühe meetri pikkust lõiku jõuga  $2 \cdot 10^{-7}$  N, siis on voolutugevus juhtmetes **üks amper**.

**Magnetiline läbitavus**  $\mu$  näitab, kui mitu korda aine tugevdab magnetvälja ehk siis kui mitu korda on magnetinduktsioon aines  $B$  suurem magnetinduktsioonist vaakumis  $B_0$  (ilma aineta):  $\mu = B/B_0$ . Inglise-USA õpikutes nimetatakse nii defineeritud suurust enamasti aine suhteliseks magnetiliseks läbitavuseks (*relative permeability*,  $\mu_r$ ). Suuruste  $\mu_0$  ja  $\mu_r$  korrutist  $\mu_a$  (USA õpikus tähis  $\mu = \mu_0 \mu_r$ ) nimetatakse siis aine absoluutseks magnetiliseks läbitavuseks (*absolute permeability*).

**Magnetkonstant**  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  N/A<sup>2</sup> (või H/m), (sageli nimetatud ka vaakumi magnetiliseks läbitavuseks, *permeability of free space*) on suurus, mis saadakse Ampère'i seaduse võrdeteguri esitamisel SI-süsteemis kujul  $K = \mu_0/2\pi$ . Magnetkonstant on homogeense (omavahel paralleelsete jõujoontega) välja kirjeldamiseks sobiv võrdetegur.

**Magnetvälja tugevus**  $H$  (*magnetic field strength*) iseloomustab keskkonnast sõltumatult voolu võimet tekitada magnetvälja. Kui vool tekitab aines magnetinduktsiooni  $B$ , siis magnetvälja tugevus  $H$  näitab, kui suure magnetinduktsiooni ( $B_0 = B/\mu$ ) tekitaks seesama vool vaakumis. Üldiselt  $H = B/(\mu_0\mu)$  ja  $B = \mu_0\mu H$ . Magnetvälja tugevuse SI-ühik on amper meetri kohta (1 A/m).

**Sirgjuhe**, milles kulgeb vool  $I$ , tekitab endast kaugusel  $r$  magnetinduktsiooni  $B = K I/r$ . Süsteemis SI  $B = (\mu_0 \mu / 2\pi) I/r$ , kus  $\mu$  on ümbritseva keskkonna (suhteline) magnetiline läbitavus.

**Ringjuhe** läbimõõduga  $d$  ja vooluga  $I$ , tekitab oma tsentris magnetinduktsiooni  $B = \mu_0 \mu I/d$  ja seega magnetvälja tugevuse  $H = I/d$ .

**Amper meetri kohta** (1 A/m) on magnetvälja tugevuse SI-ühik. 1 A/m on sellise magnetvälja tugevus, mida tekitab oma tsentris ringjuhe läbimõõduga 1 m, kui temas kulgeb vool 1 A.

**Solenoid** (pikk ja kitsas juhtme-pool), 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.

**Magnetiline pinge**  $U_m$  on suurus, mille leidmiseks mingil suunatud lõigul tuleb magnetvälja tugevuse projekt-sioon lõigu suunale ( $H$ ) korrutada lõigu pikkusega  $l$  (samamoodi nagu elektrilisel pingel:  $U = E_l \cdot l$ ).

**Magnetomotoorjõud** (MMJ, ingl *magnetomotive force*, MMF, tähis  $M$ , Jacksoni õpikus  $F_m$ ) on kõigi magnetiliste pingete summa piki kinnist joont. Magnetilise pinge ja magnetomotoorjõu SI-ühikuks on amperkeer (1 Ak, *ampere-turn*) = vool 1A ühes keerus või vool 0,1A 10 keerus või ...)

**Kogu voolu seadus** (ka: Ampère'i tsirkulatsiooniteoreem): magnetiline pinge piki kinnist joont (ka: *magneeti-misergutus* ehk *magnetomotoorjõud*) on võrdne kogu vooluga, mis läbib selle joonega piiratud pinda. Kõik pinda läbivad voolud võtavad osa magnetvälja tekitamisest pinna piirjoonel. Kui on vaja leida magnetvälja tugevust mingil kinnisel joonel, siis tuleb jagada seda magnetvälja põhjustava voolu tugevus joone pikkusega (*magnetvälja tugevus* = *voolutugevus* / *jõujoone pikkus*).

**Magnetahel** on süsteem, mis koosneb magnetvoo tekitajatest, edastajatest ja neelajatest. Magnetahela parimaks näiteks on *trafo*. Magnetvoo tekitajaks on trafo *primaarmähis*, magnetvoo edastajaks on trafo *südamik* ja neelajaks *sekundaarmähis*. Magnetahelat kirjeldab vooluahela (kogu vooluringi) Ohmi seaduse  $I = \mathcal{E}/R_k$  analoog  $\Phi = M/R_m$ , kus voolutugevuse  $I$  asemel on magnetvoog  $\Phi$ , EMJ  $\mathcal{E}$  asemel magnetomotoorjõud  $M$  ning elektrilise kogutakistuse  $R_k$  asemel magnetiline takistus ehk relaktants (*reluctance*)  $R_m$ .

**Magnetvoog** (*magnetic flux*, tähis  $\Phi$ ) on suurus, mis näitab, kui võrd magnetvälja jõujooned läbivad mingit pinda. Magnetvoog avaldub kujul  $\Phi = B S \cos \beta$ , kus  $B$  on magnetinduktsioon,  $S$  – pinna pindala ja  $\beta$  on nurk pinna normaali ja magnetvälja suuna vahel. Magnetvoo SI-ühikuks on veeber (1 Wb).

**Veeber** on magnetvoo SI-ühik. Üks veeber (1 Wb) on magnetvoog, mis läbib pinda pindalaga üks ruutmeeter selle pinnaga ristuv magnetväljas, kui välja magnetinduktsioon on üks tesla ( $1\text{Wb} = 1\text{T} \cdot \text{m}^2$ ).

**Relaktants** (*reluctance*) ehk magnetiline takistus  $R_m$  on suurus mis analoogiliselt elektritakistusega  $R$  kirjeldab magnetvoo tekitamist takistavaid nähtusi magnetahelas. Relaktants näitab, kui suurt magnetomotoorjõudu on antud ahelas vaja selleks, et tekitada ühikulist magnetvoogu:  $R_m = M / \Phi$ . Relaktantsi mõõtühik on amper veebri kohta ehk pöördhenri ( $1\text{ A/Wb} = \text{H}^{-1}$ ).

**Permeants** (*permeance*) ehk magnetiline juhtivus  $P_m$  on relaktantsi pöördväärtus:  $P_m = 1/R_m$ . Permeants on suurus mis analoogiliselt elektrijuhtivusega  $G$  kirjeldab magnetvoo tekitamise efektiivsust magnetahelas. Permeants näitab, kui suur magnetvoog tekib antud magnetahelas ühikulise magnetomotoorjõu rakendamisel:  $P_m = \Phi / M$ . Permeantsi mõõtühikuks süsteemis SI on induktiivsuse mõõtühik henri (1 H).

Nii nagu aine erijuhtivus  $\sigma$  (eritakistuse  $\rho$  pöördväärtus) on sellest ainest valmistatud ühikulist pikkust  $l$  ja ühikulist ristlõikepindala  $S$  omava keha juhtivus  $G$  (takistuse pöördväärtus):  $\sigma = G l / S$ , nii on aine absoluutne magnetiline läbitavus (*absolute permeability*) sellest ainest valmistatud ühikulise pikkuse ja ristlõikepindalaga keha permeants:  $\mu_a = P_m l / S$ , (SI ühik henri meetri kohta, 1 H/m)

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

**Elektromagnetilise induktsiooni 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 induktsioonivool. Induktsioonivoolu tekitamiseks juhtmes teeb tööd jõud, mis liigutab juhet magnetväljas. See jõud ongi induktsiooni 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 induktsioon:** magnetväli + juhtme liikumine  $\rightarrow$  magnetjõud  $\rightarrow$  elektrivool.

**Magnetväljas liikuva juhtmelõigu** otstel tekkiv pinge  $U$  (induktsiooni elektromotoorjõud  $\mathcal{E}_i$ ) avaldub kujul  $U = v l B \sin \alpha$ , kus  $v$  on liikumise kiirus,  $B$  – magnetinduktsioon,  $l$  – juhtmelõigu pikkus ja  $\alpha$  - nurk liikumise suuna ning magnetvälja suuna vahel (sama nurk  $\alpha$ , mis Lorentzi jõu valemis).

**Faraday induktsiooniseadus:** Kontuuris tekkiv induktsiooni 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 kutsuvale põhjusele. Lenzi reegel on samaväärne mehaanikast tuntud faktiga, et hõõrdejõud või keskkonna takistusjõud toimib alati liikumapanevale jõule vastupidiselt (takistab liikumist). Matemaatiliselt: algse magnetvälja muutus  $\Delta B$  ja induktsioonivoolu magnetväli  $B_i$  on alati vastassuunalised.

**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,  $L = - \mathcal{E}_e / (\Delta i / \Delta t)$  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  $\Delta i$ :  $L = \Delta \Phi / \Delta i$ . Induktiivsuse ühikuks on üks henri (1 H). Induktiivsus kirjeldab laengukandjate liikumisel esinevat inertsust vaadeldavas juhis (nagu seda teeb mass mehaanikas).

**Üks henri** (1 H) on sellise juhi induktiivsus, milles voolu muutumine kiirusega üks amper ühes sekundis kutsus 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  $v$ .

**Kahe keha omavaheline mahtuvus**  $C$  (ingl *capacity*) näitab, kui suure laengu viimisel ühelt kehalt teisele tekib kehade vahel ühikuline pinge:  $C = q / U$ . Mahtuvus näitab, kui palju laengut mahub kehale või kehade süsteemile, nii et pinge (või potentsiaal) selle tagajärjel suureneb ühe ühiku võrra:  $C = \Delta q / \Delta U$  (võrdle induktiivsuse definitsiooniga!). Mahtuvus kirjeldab süsteemi laadumisvõimet.

**Üksiku juhtiva keha** (ehk irdjuhi) **mahtuvus** näitab, kui suure laengu andmisel kehale tekib keha potentsiaali ühikuline muutus:  $C = q / \Delta \varphi$ . Ühe keha mahtuvusest räägitakse siis, kui teine asjaosaline keha on vaadeldavast kehast väga kaugel.

**Kondensaatoriks** (ingl *capacitor*) nimetatakse kehade süsteemi, mis on loodud mingi kindla mahtuvuse saamiseks. Kondensaator koosneb reeglina kahest juhtivast plaadist ehk kattest, mille vahel paikneb dielektriku kiht. Kondensaatori mahtuvus  $C$  on tema katete omavaheline mahtuvus.

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

**Plaatkondensaatori mahtuvus** on võrdeline katete pindalaga  $S$ , katetevahelise aine dielektrilise läbitavusega  $\varepsilon$  ja pöördvõrdeline katete vahekaugusega  $l$ :  $C = \varepsilon_0 \varepsilon S / l$ .

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

**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.

**Kondensaatorite rööpühenduse** kogumahtuvuse  $C_r$  leidmisel mahtuvusi liidetakse, sest kõigile rööbiti ühendatud kondensaatoritele rakendub sama pinge  $U$ . Sama pinge  $U$  juures liidetakse kondensaatorite laenguid:  $Q_r = Q_1 + Q_2 + \dots$ , millest  $C_r U = C_1 U + C_2 U + \dots$  ja seega  $C_r = C_1 + C_2 + \dots$ . Kuna kondensaatori mahtuvus on võrdeline tema plaadi pindalaga (valem  $C = \varepsilon_0 \varepsilon S / l$ ), siis võib ka öelda, et ühesuguse plaatide vahekauguse  $l$  ja sama plaatidevahelise aine korral ( $\varepsilon = \text{const}$ ) plaatide pindalade liitmine  $S_r = S_1 + S_2 + \dots$  läheb üle mahtuvuste liitmiseks  $C_r = C_1 + C_2 + \dots$ .

**Kondensaatorite jadaühenduse** korral liidetakse kogumahtuvuse pöördväärtuse saamiseks üksikute kondensaatorite mahtuvuste pöördväärtusi, sest kõigil kondensaatoritel on sama laeng  $Q$  ning jadaühendusel liidetakse pingesid:  $U_j = U_1 + U_2 + \dots$  ehk  $Q / C_j = Q / C_1 + Q / C_2 + \dots$  ja seega  $1 / C_j = (1 / C_1) + (1 / C_2) + \dots$ . Võib ka öelda, et ühesuguse plaatide pindala  $S$  ja sama plaatidevahelise aine korral ( $\varepsilon = \text{const}$ ) jadaühendusel toimuv kondensaatorite plaatide vahekauguste liitmine  $l_j = l_1 + l_2 + \dots$  läheb valemist  $C = \varepsilon_0 \varepsilon S / l$  tuleneva seose  $l = \varepsilon_0 \varepsilon S / C$  põhjal üle mahtuvuste pöördväärtuste liitmiseks. Märkame, et mahtuvuste liitmise eeskirjad on vastupidised takistuste liitmise eeskirjade suhtes.

**$n$  ühesuguse kondensaatori** (mahtuvusega  $C$ ) rööpühenduse mahtuvus on  $n C$ . Samas  $n$  ühesuguse kondensaatori jadaühenduse mahtuvus on  $C / n$ . Mistahes rööbiti ühendamine suurendab kogumahtuvust, sest iga täiendava rööpühenduses kondensaatori lisamine tekitab täiendava võimaluse laengu äramahutamiseks. Mistahes jadamisi ühendamine aga vähendab kogumahtuvust, sest iga täiendava jadamisi ühendatud kondensaatori lisamine suurendab süsteemi otste efektiivset vahekaugust (viib süsteemi kuuluvad kehad üksteisest eemale). Kui vahekaugus  $l$  suureneb, siis kogumahtuvus väheneb. **NB!** Alati tasub kontrollida, et jadaühenduse mahtuvus oleks väiksem kummagi jadamisi ühendatud kondensaatori mahtuvusest.

**Kahe kondensaatori** (mahtuvustega  $C_1$  ja  $C_2$ ) **jadaühenduse kogumahtuvus** on mahtuvuste korrutis jagatud nende summaga:  $C_j = C_1 \cdot C_2 / (C_1 + C_2)$ .

**RC-ahel** omab takistust  $R$  ja sisaldab kondensaatorit mahtuvusega  $C$ . Takisti ja kondensaator on reeglina ühendatud jadamisi. Arvukalt RC-ahelaid sisaldavad mälupulgad, muud kiibid, arvutite toiteplokid jne.

**RC-ahelas kondensaatori laadimiseks** tuleb ahelasse täiendavalt jadamisi ühendada vooluallikas elektromotoorjõuga  $E$ , mis sisselülitamise hetkel ( $t = 0$ ) tekitab ahelas laadimisvoolu tugevusega  $I_0 = E / R$ . Mingil järgneval hetkel  $t$ , kui kondensaator on omandanud pinge  $u(t)$ , on laadimisvool  $i(t) = (E - u) / R$ . Voolutugevus väheneb, sest laetav kondensaator toimib vooluallikana, mis takistab laadimist.

**RC-laadimisahela siirdekarakteristik** (*transient response*)  $u(t) = U_m [1 - \exp(-t/\tau)]$  on piirangule lähenev kasvav eksponentfunktsioon, mille jaoks piiranguks on laadiva allika elektromotoorjõud  $E$  (kondensaatori maksimaalne pinge  $U_m$ ) ning suurust  $\tau = RC$  nimetatakse ahela **ajateguriks**. See võrdub ajaga, mille jooksul pinge  $u(t)$  muutub nullist kuni väärtuseni ca  $0,63 U_m$ , sest  $1 - e^{-1} = 1 - (1/e) = 1 - 0,368 \approx 0,63$ .

- RC-tühjenemisahela siirdekarakteristik** (pinge kahanemiskarakteristik)  $u(t) = U_m \exp(-t/\tau)$  on kahanev eksponentfunktsioon, mille järgi kondensaatori pinge  $u(t)$  väheneb algväärtusest  $U_m$  kuni nullini sama ajateguriga  $\tau = RC$ , mis kirjeldas pinge kasvu. **Ajategur**  $\tau = RC$  on nüüd aeg, mille jooksul pinge või voolutugevus vähenevad arv  $e = 2,7183...$  korda (väärtuseni ca  $0,37 U_m$ , kuna  $1/e \approx 0,37$ ) või siis aeg, mille jooksul protsess lõpeks, kui jääks kehtima algne lineaarne kahanemisseadus  $u(t) = (-U_m/\tau) \cdot t + U_m$ .
- RL-ahel** omab takistust  $R$  ja sisaldab induktorit (pooli) induktiivsusega  $L$ . Takisti ja induktor on reeglina ühendatud jadamisi. Arvukalt  $RL$ -ahelaid sisaldavad pingemuundurid, toiteplokid jm elektroonikaseadmed.
- RL-ahelas voolu tekitamiseks** tuleb ahelasse täiendavalt jadamisi ühendada vooluallikas elektromotoorjõuga  $E$ , mis mingi aja möödumisel viib voolutugevuse ahelas väärtuseni  $I_m = E/R$ . Kuid allika sisselülitamise hetkel ( $t = 0$ ) on voolutugevus  $i = 0$ , sest induktoris tekkiv endainduktsiooni EMJ  $-L di/dt$  tasakaalustab täpselt allika elektromotoorjõu  $E$ . Induktor toimib vooluallikana, mis takistab voolu muutumist ahelas.
- RL-ahela voolu kasvukarakteristik**  $i(t) = I_m [1 - \exp(-t/\tau)]$  on piirangule lähenev kasvav eksponentfunktsioon, mille jaoks piiranguks on voolutugevuse lõppväärtus  $I_m = E/R$  ning suurust  $\tau = L/R$  nimetatakse ahela **ajateguriks**. See võrdub ajaga, mille jooksul vool  $i$  muutub nullist kuni väärtuseni ca  $0,63 I_m$ .
- RL-ahela voolu kahanemiskarakteristik**  $i(t) = I_m \exp(-t/\tau)$  on kahanev eksponentfunktsioon, mille järgi voolutugevus ahelas  $i(t)$  väheneb algväärtusest  $I_m$  kuni nullini, ikka ajateguriga  $\tau = L/R$ .
- RL-ahela ajategur**  $\tau = L/R$  on voolu kahanemisprotsessis see aeg, mille jooksul voolutugevus väheneb arv  $e = 2,7183...$  korda (väärtuseni ca  $0,37 I_m$ , kuna  $1/e \approx 0,37$ ) või siis aeg, mille jooksul protsess lõpeks, kui jääks kehtima algne lineaarne kahanemisseadus  $i(t) = (-I_m/\tau) \cdot t + I_m$  (mat:  $y = a x + b$ )
- Elektromagnetvõnkumiste** käigus muutub laetud kondensaatori elektrivälja energia voolu magnetvälja energiaks juhtme poolis ja vastupidi. Need muutused on perioodilised, kusjuures sumbumise puudumisel omavõnkeperiood  $T = 2\pi (LC)^{1/2}$  ning omavõnkesagedus  $\omega_0 = 1 / (LC)^{1/2}$ . Sumbumatu elektromagnetvõnkumine on tuntud kui vahelduvvool.
- Vahelduvvooluks** (AC – *alternating current*) nimetatakse elektrivoolu, mille korral pinge ja voolutugevus perioodiliselt muutuvad. Laiatarbelise vahelduvvoolu korral muutuvad nad harmooniliselt (sin- või cos-seaduse järgi):  $u = U_m \cos \omega t$ ;  $i = I_m \cos(\omega t + \varphi)$ , kus  $u$  ja  $i$  on hetkväärtused,  $U_m$  ja  $I_m$  – amplituudväärtused (suurimad võimalikud väärtused),  $\omega t$  - faas,  $\varphi$  - algfaas (faas hetkel  $t = 0$ ),  $\omega$  - ringsagedus.
- Vahelduvpinget** tekitatakse elektrijaamas enamasti mehaanilise generaatori abil, mis muundab generaatori võlli pöörlemise kineetilist energiat elektrivälja energiaks (elektromagnetilise induktsiooni nähtus).
- Efektiivväärtus** (voolutugevuse efektiivväärtus) on vahelduvvoolu korral niisuguse alalisvoolu tugevus, mille korral vaid aktiivtakistust omav tarviti arendab vaadeldava vahelduvvooluga võrreldes ühesugust võimsust. Analooiliselt defineeritakse ka vahelduvpinge efektiivväärtus. Efektiivväärtuse nimetuseks Inglise-USA õpikutes (sh Jackson) on enamasti **RMS value** (*root mean squared value*), kuna võimsus on määratud voolutugevuse või pinge ruuduga (valemid  $P = I^2 R$  või  $P = U^2/R$ ). Seega tuleb vahelduvvoolu ajalise keskmise võimsuse leidmiseks võtta ruutjuur ruutude keskmisest (*root mean squared* - juur ruutude keskmisest). Väljendi *RMS value* otsetõlge eesti keelde kujul "ruutkeskmise väärtus" ei ole põhjendatud, kuna see on liiga üldine (ei viita otseselt vahelduvvoolule). Sinusoidaalse vahelduvvoolu efektiivväärtus ja amplituudväärtus on seotud viisil:  $I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \approx 0,707 \cdot I_m$ .
- Vahelduvvoolu peamine erinevus alalisvoolust** seisneb selles, et pinge ja voolutugevus reeglina ei saavuta vahelduvvooluahelas mingeid kindlaid seisundeid (näiteks oma maksimaalseid väärtusi) – üheaegselt. Üks neist saavutab selle seisundi varem (on *faasis ees*) ja teine saavutab hiljem (on esimesest *faasis taga*). Seetõttu tuleb vahelduvvoolu kirjeldamisel pinge või voolutugevuse amplituudväärtusele (või efektiivväärtusele) lisada info antud suuruse faasi kohta.
- Faas** on nurk, mis näitab, millises seisundis võnkuv süsteem parajasti on. Faas näitab, kui suure nurga võrra pööramisel jõuaks süsteem algasendist antud seisundit kirjeldavasse asendisse. Sõna *faas* võib tähistada ka perioodiliselt muutuva pinge olemasolu üleüldse (nt mõisted *faasijuhe* ja *faasiklemm*). Vahelduvvoolu korral loetakse algseisundiks ühe muutuva suuruse (voolutugevuse või pinge) võrdumist oma maksimaalse väärtusega ( $u = U_m$  või  $i = I_m$ ), kui kasutame koosinusfunktsiooni ( $\cos 0 = 1$ ) või siis selle võrdumist nulliga ( $u = 0$  või  $i = 0$ ), kui kasutame siinusfunktsiooni ( $\sin 0 = 0$ ). Algseisundit (faasi nullväärtust) määravaks suuruseks võetakse reeglina suurus, mis antud lülitusviisi korral on kõigile ahela osadele ühine (jadaühenduse korral voolutugevus, rööpühenduse korral pinge).

**Faasi nihe**  $\varphi$  pingest ja voolutugevuse vahel on nurk, mis kirjeldab ajalist nihet nende suuruste vahel. Faasi nihe on sama suur osa täispöördest, kui suure osa vönkeperioodist moodustab ajaline nihe pingest ja voolutugevuse mingite kindlate seisundite (näiteks maksimumide) vahel.

**Aktiivtakistus**  $R$  on kasuliku töö tegemisega seotud takistus vahelduvvooluahelas. Aktiivtakistust kitsamas mõttes põhjustab suunatult liikuvate laengukandjate vastastikmõju teiste aineosakestega (laengukandjate liikumisel esinev takistusjõud). Laiemas tähenduses põhjustavad aktiivtakistust kõik need jõud, mille vastu elektrivool tööd teeb. Aktiivtakistus on seesama takistus, mis on olemas ka alalisvoolu korral.

**Induktiivtakistus** (tähis  $X_L$ ) on takistus, mida avaldab vahelduvvoolule nurk- või ringsagedusega  $\omega$  juhtmepool induktiivsusega  $L$ . Voolu muutumisel hakkab pool endainduktsiooni tõttu toimima vooluallikana, mis takistab voolu muutust. Kehtib seos  $X_L = \omega L$ .

**Faasi nihe tekkimine induktiivtakistusel:** induktiivpoolile rakenduv väline pingest on ise see põhjus, mis suurendab voolutugevust poolis. Pingest on muutuse parameeter. Voolutugevus aga määrab magnetvälja energia (valem  $E_m = L I^2/2$ ). Voolutugevus on süsteemi stabiilsuse parameeter. Voolutugevus on põhjuslikus seoses tagajärje rollis ning seetõttu jääb pingest faasis maha. Maha jääb alati energeetiline suurus. Voolutugevus saab kasvada seni, kuni eksisteerib seda voolu soodustava polaarsusega pingest. Voolutugevuse kasv asendub kahanemisega hetkel, mil pingest muudab oma märki. Seega on voolutugevus maksimaalne just siis, kui pingest sinusoid läbib kahanemisel nullväärtust. Pingest maksimumist on siis aga juba möödunud veerand perioodi. Pingest saavutab amplituudväärtuse ajas  $T/4$  ja faasis  $\pi/2$  võrra varem.

**Mahtuvustakistus** (tähis  $X_C$ ) on takistus, mida avaldab vahelduvvoolule nurksagedusega  $\omega$  kondensaator mahtuvusega  $C$ . Laadimise käigus hakkab kondensaator toimima vooluallikana, mis takistab laadimist. Kehtib seos  $X_C = 1 / (\omega C)$ .

**Faasi nihe tekkimine mahtuvustakistusel:** kondensaatorit laadiv (välisest pingest põhjustatud) vool on ise see põhjus, mis laeb kondensaatorit. Voolutugevus on muutuse parameeter. Pingest aga määrab elektrivälja energia (valem  $E_e = C U^2/2$ ). Pingest on süsteemi stabiilsuse parameeter. Pingest on põhjuslikus seoses tagajärje rollis ning seetõttu jääb voolutugevusest faasis maha. Maha jääb alati energeetiline suurus. Pingest kondensaatoril saab kasvada seni, kuni eksisteerib kondensaatorit laadiva polaarsusega vool. Pingest kasv asendub kahanemisega hetkel, mil voolutugevus muudab oma märki. Seega on pingest maksimaalne just siis, kui voolutugevuse sinusoid läbib kahanemisel nullväärtust. Voolutugevuse maksimumist on siis juba möödunud veerand perioodi. Voolutugevus saavutab amplituudväärtuse ajas veerand perioodi ( $T/4$ ) ja faasis  $\pi/2$  radiaani võrra varem.

**Reaktiivtakistus** ehk **reaktants** (*reactance*)  $X$  on suurus, mis iseloomustab induktiivtakistuse (*inductive reactance*)  $X_L$  ja mahtuvustakistuse (*capacitive reactance*)  $X_C$  koostoimet. Kuna induktiivpooli ja kondensaatori jadaühenduse korral läbib mõlemat üks ja seesama vool, pingest aktiivtakistuseta induktiivpoolil on voolust faasis  $\pi/2$  võrra ees, aga pingest kondensaatoril voolust faasis  $\pi/2$  võrra taga, siis toimivad need kaks pingest vastassuunaliselt ja nende koosmõju kirjeldab kahe pingest vahe. Vastavalt on induktiivpooli ja kondensaatori jadaühenduse reaktants induktiiv- ja mahtuvustakistuse vahe:  $X = X_L - X_C = \omega L - 1/\omega C$ .

**Reaktiivjuhtivus** ehk **suskeptants** (*susceptance*)  $B$  on suurus, mis vahelduvvoolu rööpahelas iseloomustab induktiivjuhtivuse (*inductive susceptance*)  $B_L = 1/X_L = 1/\omega L$  ja mahtuvusliku juhtivuse (*capacitive susceptance*)  $B_C = 1/X_C = \omega C$  koostoimet. Suskeptants on takistuse pöördväärtus, mistõttu tema SI ühikuks on siimens (1 S). Kuna induktiivpooli ja kondensaatori rööpuühenduse korral rakendub mõlemale üks ja seesama pingest, voolutugevus kondensaatoris on pingest faasis  $\pi/2$  võrra ees, aga vool läbi aktiivtakistuseta induktiivpooli pingest faasis  $\pi/2$  võrra taga, siis toimivad need kaks voolu vastassuunaliselt ja nende koosmõju kirjeldab kahe voolutugevuse vahe. Vastavalt on induktiivpooli ja kondensaatori rööpuühenduse susceptants mahtuvusliku ja induktiivse susceptantsi vahe:  $B = B_C - B_L = \omega C - 1/\omega L$ .

**Kompleksarve**  $\tilde{A} = a + j b$ , kus  $j = (-1)^{1/2}$  on imaginaarühik, kasutatakse füüsikas selleks, et: 1) kiiresti tuletada üks reaalarvuline suurus teise põhjal, s.t. minna liikumise kiirendamiseks ajutiselt arvude imaginaar- (mitterealaalse) piirkonda; 2) esitada omavahel seotud kujul (komplekselt) kaks suurus, mis mõlemad kirjeldavad ühte ja sedasama loodusnähtust (üks suurus on siis vastava kompleksarvu reaali- ja teine imaginaarosa). Seda tehakse ka kompleksmeetodi kasutamisel vahelduvvoolu kirjeldamiseks (vt allpool).

**Kompleksarvu reaalsoja ja imaginaarosa:** Kompleksarvu  $\tilde{A}$  esitab komplekstasandil punkt, milleni jõudmiseks koordinaatide alguspunkti tuleb kõigepealt liikuda piki reaaltelge kompleksarvu reaalsoja  $a = \text{Re } \tilde{A}$  võrra ning seejärel sooritada 90-kraadine ( $\pi/2$  rad) pööre (seda kirjeldab imaginaarühik!) ja liikuda reaaltelgela ristuv suunas (piki imaginaartelge) imaginaarosa  $b = \text{Im } \tilde{A}$  võrra.

**Kompleksarvu  $\tilde{A}$  mooduliks** nimetatakse selle vektori  $\mathbf{r}$  pikkust  $r$ , mida mööda on võimalik liikuda koordinaatide alguspunktist otse kompleksarvuga  $\tilde{A}$  määratud punkti. Kompleksarvu moodul määrab terve hulga komplekstasandi punkte, mis kõik paiknevad ringjoonel raadiusega  $r$  ümber koordinaatide alguspunkti. Neist ühe kindla punkti väljavalimiseks tuleb täiendavalt fikseerida vektori  $\mathbf{r}$  asendit määrav nurk  $\varphi$  ehk kompleksarvu argument. Kompleksarvu  $\tilde{A}$  mooduli tähiseks on  $r = |\tilde{A}|$ .

**Kompleksarvu  $\tilde{A}$  argumendiks** nimetatakse nurka  $\varphi$ , mille võrra seda arvu määrav vektor  $\mathbf{r}$  on pööratud reaaltelje suhtes vastupäeva. Kuna kompleksarvu reaalosa  $a$ , imaginaarosa  $b$  ja moodul  $r$  moodustavad täisnurkse kolmnurga, milles  $a$  ja  $b$  on kaatetid ning  $r$  – hüpotenuus, siis  $a = r \cos \varphi$  ja  $b = r \sin \varphi$ , mistõttu  $\tilde{A} = a + j b = r \cos \varphi + j r \sin \varphi$  (kompleksarvu trigonomeetiline kuju).

**Euleri valem** väidab, et kompleksarv  $\tilde{A} = r \cos \varphi + j r \sin \varphi$  on üle viidav eksponentkujule:

$$\tilde{A} = r e^{j\varphi} = |\tilde{A}| e^{j\varphi} = |\tilde{A}| \exp(j\varphi).$$

**Kompleksmeetod** vahelduvvoolu kirjeldamiseks põhineb sellel, et korrutamine kompleksarvuga  $e^{j\varphi}$  kirjeldab pööret nurga  $\varphi$  võrra. Faasinurk aga sõltub mistahes võnkumiste (sh vahelduvvoolu) korral lineaarselt ajast:  $\varphi = \omega t$ . Kompleksmeetod esitab perioodiliselt muutuva pinget või voolutugevuse eksponentkujulise kompleksarvuna  $\tilde{U} = U_m e^{j\omega t} = U_m \exp(j\omega t)$  või  $\tilde{I} = I_m e^{j\omega t} = I_m \exp(j\omega t)$  mille moodul ( $U_m$  või  $I_m$ ) on pinget või voolutugevuse amplituudväärtus, kompleksarvu argument  $\omega t$  on faas ja kompleksarvu reaalosa on hetkväärtus (vastavalt  $u = \operatorname{Re} \tilde{U} = U_m \cos \omega t$  või  $i = \operatorname{Re} \tilde{I} = I_m \cos \omega t$ ). Kompleksse pinget või voolutugevuse imaginaarosa (vastavalt  $\operatorname{Im} \tilde{U} = U_m \sin \omega t$  või  $\operatorname{Im} \tilde{I} = I_m \sin \omega t$ ) kirjeldab vastava suuruse muutumise kiirust:  $d/dt [I_m \exp(j\omega t)] = j\omega I_m \exp(j\omega t)$ , aga samas ka  $d/dt [I_m \cos \omega t] = -\omega I_m \sin \omega t$ . Imaginaarühik kiiruse avaldises näitab, et kiirus on voolutugevuse enda suhtes faasis  $\pi/2$  võrra ees ( $+\pi/2$ ).

**Faasor** (*phasor*) on vektor, mis pöörleb ümber oma alguspunkti nurkkiirusega  $\omega$ , mistõttu tema projektsioon mingile teljele muutub sõltuvalt faasinurgast  $\omega t$  siinus- või koosinusseaduse järgi. Vahelduvvoolu korral on voolu või pinget faasorite projektsioonideks hetkväärtused  $i = I_m \cos \omega t$  või  $u = U_m \cos(\omega t + \varphi)$ . Faasorite pikkusteks on voolutugevuse või pinget amplituudväärtused ( $I_m$  või  $U_m$ ), nurk  $\varphi$  faasorite vahel on nende suuruste vahelise faasinihke rollis. Faasorid võimaldavad graafiliselt kirjeldada kõigi muutuvate suuruste koostoimet mistahes ajahetkel, kuna faasorite pikkused ja omavahelised nurgad ajas ei muutu. Faasor osutub komplekstasandil pinget või voolutugevust määravaks vektoriks.

**Faasorsuuruste liitmine:** kahe omavahel faasis nihutatud samaliigilise suuruse (pinge või voolutugevuse) koostoimet kirjeldav faasor on leitav komponentide faasorite vektoriaalsel liitmisel. Faasorsuuruste liitmisel või lahutamisel saame uue sama liiki faasorsuuruse. Faasorsuuruste liitmisel tuleb kasutada kompleksarvude trigo-kuju (*reciprocal form*):  $\mathbf{I}_1 + \mathbf{I}_2 = I_{m1} \exp(j\omega t) \exp(j\varphi_1) + I_{m2} \exp(j\omega t) \exp(j\varphi_2) = \{[I_{m1} \cos \varphi_1 + I_{m2} \cos \varphi_2] + j [I_{m1} \sin \varphi_1 + I_{m2} \sin \varphi_2]\} \exp(j\omega t)$ . See tähendab, et protseduurist jäetakse välja ajalist sõltuvust kirjeldav liige  $\exp(j\omega t)$ , mille võib maha taandada. Liidetakse eraldi kompleksarvude ajast sõltumatuid reaalosi ( $I_{m1} \cos \varphi_1 + I_{m2} \cos \varphi_2$ ) ja imaginaarosi ( $I_{m1} \sin \varphi_1 + I_{m2} \sin \varphi_2$ ) kui vastava faasori projektsioone. Faasorsuuruste lahutamine on lahutatava vastandarvu liitmine.

**Faasorsuuruste korrumatise** saab piirduda vastavate kompleksarvude eksponentkujuga (*polar form*):  $\mathbf{I}_1 \mathbf{Z}_2 = I_{m1} \exp(j\omega t) \exp(j\varphi_1) \cdot Z_2 \exp(j\varphi_2) = I_{m1} Z_2 \exp(j\omega t) \exp[j(\varphi_1 + \varphi_2)] = U_{12} \exp(j\omega t) \exp(j\varphi_{12}) = \mathbf{U}_{12}$ . Korrumatise mooduli saamiseks korrumatakse omavahel tegurite moodulid ja korrumatise faasi saamiseks liidetakse omavahel tegurite faasinurgad. Jälle ilmneb faasorite kasutamise eelis, mis seisneb selles, et protseduurist ei võta osa uuritavate suuruste ajalist sõltuvust kirjeldav liige  $\exp(j\omega t)$ . **NB!** Kompleksse pinget  $U_m \exp[j(\omega t + \varphi)] = U_m \exp(j\omega t) \exp(j\varphi)$  korrumatisele kompleksse voolutugevusega  $I_m \exp(j\omega t)$  saame kompleksse võimsuse  $I_m U_m \exp(2j\omega t) \exp(j\varphi)$ , mille faasor pöörleb juba sagedusega  $2\omega$  ja mille reaalse ajaline keskmine väärtus võrdub ahelas eralduva võimsusega  $P = (I_m U_m / 2) \cos \varphi = I U \cos \varphi$ .

**Faasorsuuruste jagamise** jagatakse omavahel moodulid ning jagatise faasi saamiseks lahutatakse jagatava faasinurgast jagaja faasinurk:  $\mathbf{U}_1 / \mathbf{Z}_2 = U_{m1} \exp(j\omega t) \exp(j\varphi_1) / Z_2 \exp(j\varphi_2) = I_{m12} \exp(j\omega t) \exp[j(\varphi_1 - \varphi_2)]$ . Protseduuris jällegi ei osale uuritavate suuruste ajalist sõltuvust kirjeldav liige  $\exp(j\omega t)$ . Kompleksse pinget  $U_m \exp[j(\omega t + \varphi)] = U_m \exp(j\omega t) \exp(j\varphi)$  jagamisele kompleksse voolutugevusega  $I_m \exp(j\omega t)$  saame kompleksse takistuse  $Z \exp(j\varphi)$ , kus pinget ja voolu faasorite pikkuste suhe  $U_m / I_m = Z$  osutub vahelduvvooluahela kompleksse takistuse ehk impedantsi mooduliks. Pinget ja voolu faasorite vaheline nurk  $\varphi$  väljendab impedantsi mitteaktiivsust, sest puhtalt aktiivse takistuse korral  $\varphi = 0$  ja  $Z = R$ .

**Kompleksmeetod jadaühendusel:** Kõiki jadamisi ühendatud skeemielemente läbib üks ja seesama **vool**.

Seega on mõtet uurida komplekssete pingete faase voolutugevuse  $\tilde{I} = I_m e^{j\omega t} = I_m \exp(j\omega t)$  suhtes. Pinged: aktiivtakistusel:  $\tilde{U}_R = U_R e^{j\omega t} = I_m R e^{j\omega t} = U_R \exp(j\omega t)$ ;

induktiivtakistusel:  $\tilde{U}_L = U_L e^{j(\omega t + \pi/2)} = I_m \omega L e^{j(\omega t + \pi/2)} = U_L e^{j(\pi/2)} e^{j\omega t} = U_L \exp(+j\pi/2) \exp(j\omega t)$  ja

mahtuvustakistusel:  $\tilde{U}_C = U_C e^{j(\omega t - \pi/2)} = (I_m / \omega C) e^{j(\omega t - \pi/2)} = U_C e^{j(-\pi/2)} e^{j\omega t} = U_C \exp(-j\pi/2) \exp(j\omega t)$ .

Välisallikast rakenduva kogupinge amplituud  $U_m$ , mille väärtusest tulenevalt tekivad osapinged amplituudidega  $U_R$ ,  $U_L$  ja  $U_C$ , on leitav pingete moodulite ( $U_R$ ,  $U_L$  ja  $U_C$ ) faasi arvestaval liitmisel. See taandub pingevektorite (pikkustega  $U_R$ ,  $U_L$  ja  $U_C$ ) vektoriaalsele liitmisele. Protseduur on teostatav Pythagorase teoreemi abil:  $U_m = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2}$ , kusjuures miinusmärk  $U_L$  ja  $U_C$  vahel väljendab nende pingete paiknemist vastasfaasis (vektorite vastassuunalisust).

**Vahelduvvooluahela kogutakistus ehk impedants (impedance)  $Z$**   $RLC$ -jadaühendusel avaldub kujul:

$$Z = U_m / I_m = \sqrt{I_m^2 R^2 + I_m^2 (X_L - X_C)^2} / I_m = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}.$$

Kompleksne impedants, mille mooduliks on ülaltoodud reaalne impedants, avaldub kujul  $\tilde{Z} = R + j(\omega L - 1/\omega C)$ , kus

$$\operatorname{Re} \tilde{Z} = R, \quad \operatorname{Im} \tilde{Z} = X_L - X_C = \omega L - 1/\omega C.$$

**Kompleksmeetod rööpühendusel:** Kõigil rööbiti ühendatud skeemielementidel on üks ja seesama **pinge**.

Seega on mõtet uurida voolutugevuste faase pinge  $\tilde{U} = U_m e^{j\omega t} = U_m \exp(j\omega t)$  suhtes. Voolud:

läbi aktiivtakistuse  $R$ :  $\tilde{I}_R = I_R e^{j\omega t} = (U_m / R) \exp(j\omega t)$ ;

läbi  $X_L$ :  $\tilde{I}_L = I_L e^{j(\omega t - \pi/2)} = (U_m / \omega L) e^{j(\omega t - \pi/2)} = I_L e^{j(-\pi/2)} e^{j\omega t} = I_L \exp(-j\pi/2) \exp(j\omega t)$  ja

läbi  $X_C$ :  $\tilde{I}_C = I_C e^{j(\omega t + \pi/2)} = \omega C U_m e^{j(\omega t + \pi/2)} = I_C e^{j(\pi/2)} e^{j\omega t} = I_C \exp(+j\pi/2) \exp(j\omega t)$ .

Summaarse voolutugevuse amplituud  $I_m$  on leitav osavoolude moodulite ( $I_R$ ,  $I_L$  ja  $I_C$ ) faasi arvestaval liitmisel. See taandub vooluvektorite (pikkustega  $I_R$ ,  $I_L$  ja  $I_C$ ) vektoriaalsele liitmisele. Protseduur on teostatav Pythagorase teoreemi abil:  $I_m = \sqrt{I_R^2 + (I_C - I_L)^2}$ , kusjuures miinusmärk  $I_C$  ja  $I_L$  vahel väljendab nende voolude paiknemist vastasfaasis (vektorite vastassuunalisust).

**NB!** Kui jadaahelas  $U_L - U_C$ , siis rööpahelas  $I_C - I_L$  !

**Vahelduvvooluahela kogujuhtivus (impedantsi pöördväärtus) ehk admittants (admittance)  $Y$**   $RLC$ -rööpühendusel avaldub kujul:  $Y = 1/Z = I_m / U_m = \sqrt{U_m^2 (1/R)^2 + U_m^2 [(1/X_C) - (1/X_L)]^2} / U_m = \sqrt{(1/R^2) + (\omega C - 1/\omega L)^2}$

Kompleksne admittants, mille mooduliks on ülaltoodud reaalne admittants, avaldub kujul:

$$\tilde{Y} = G + j(B_C - B_L) = 1/R + j(\omega C - 1/\omega L), \quad \text{kus} \quad \operatorname{Re} \tilde{Y} = G, \quad \operatorname{Im} \tilde{Y} = B = B_C - B_L = \omega C - 1/\omega L.$$

Seega kompleksse admittantsi reaalosaks on konduktants  $G$ , imaginaarosaks aga suskeptants  $B$ .

**Hetkvõimsus  $p$**  ehk võimsuse hetkväärtus on vahelduvvoolu võimsuse väärtus antud ajahetkel. See on pinge ja voolutugevuse hetkväärtuste korrutis. Hetkvõimsus  $p$  on ajast sõltumatu aktiivvõimsuse  $P$  ning ajast harmooniliselt sõltuva võimsuse  $p_t$  summa. Suuruse  $p_t$  ajaline keskvärtus on null.

**Aktiivvõimsus** on vahelduvvooluahelas realselt eralduv võimsus. Aktiivvõimsus avaldub:  $P = I U \cos \varphi$ , kus  $I$  ja  $U$  on vastavalt voolutugevuse ja pinge efektiivväärtused ning  $\varphi$  – faasinihe voolutugevuse ja pinge vahel. Aktiivvõimsus  $P = I U \cos \varphi$ , reaktiivvõimsus  $P_r = I U \sin \varphi$  ja näivvõimsus  $P_n = I U$  moodustavad täisnurkse võimsuskolmnurga, millel kaks esimest on kaatetid ja kolmas – hüpotenuus.

**Näivvõimsus**  $S = I U$  (tähis ka  $P_n$ ) on vahelduvvooluahelas see võimsus, mis ahelas eralduks juhul, kui faasinihe pinge ja voolutugevuse vahel puuduks. Näivvõimsus on näiv selles mõttes, et üldjuhul faasinihe ju null ei ole. Faasinihe on null vaid puhtaktiivse takistuse korral (kondensaatorite ja poolide puudumisel või nende mõju täielikul kompenseerumisel). Näivvõimsuse mõõtühikuks on voltamper (1 VA). Aktiivvõimsuse ühikust 1W erineva ühiku 1 VA kasutamisega rõhutatakse näivvõimsuse põhimõttelist erinevust aktiivvõimsusest (näivvõimsuse näivust).

**Reaktiivvõimsus** või **ebavõimsus** (tähis  $Q$  või  $P_r$ ) on see osa elektromagnetvälja energiast, mis vahelduvvoolu ühel poolperioodil ajaühikus lokaliseerub ahela reaktiivsetes osades (kondensaatorites või poolides) ja teisel poolperioodil aga läheb vooluallikasse (võrku) tagasi. Reaktiivvõimsus avaldub:  $P_r = I U \sin \varphi$ , kus  $I$  ja  $U$  on vastavalt voolutugevuse ja pinge efektiivväärtused ning  $\varphi$  – faasinihe voolutugevuse ja pinge vahel. Reaktiivvõimsuse mõõtühikuks on voltamper-reaktiivne ehk varr (1 VAR).

- Vahelduvvoolu võimsustegur**  $\cos \varphi$  on suurus, mis näitab, kui suur osa näivvõimsusest vahelduvvooluahelas reaalselt eraldub (kui suure osa näivvõimsusest  $P_n = I U$  moodustab aktiivvõimsus  $P = I U \cos \varphi$ ).
- Võimsusteguri parandamine:** Kui vahelduvvooluahel sisaldab vältimatult induktiivtakistust (näiteks elektrimootori mähis), mis suurendab faasinihet  $\varphi$  (vähendab võimsustegurit  $\cos \varphi$ ), siis lisatakse ahelasse täiendavalt kondensatoreid, mis vähendavad summaarset reaktantsi (valem  $X = X_L - X_C = \omega L - 1/\omega C$ ) ja seeläbi suurendavad (parandavad) võimsustegurit  $\cos \varphi$ .
- Vahelduvvooluahela parameetrite arvutamisel** võib kasutada kõiki neidsamu võtteid, mis toimivad alalisvooluahelas (pingejagur, voolujagur, ekvivalentahela meetod, täht-kolmnurk-siire, kolmnurk-täht-siire, pinge- ja voolugeneraatori vahetatavus, Kirchhoffi seadused, kontuurvoolude meetod, sõlmpotentsiaalide meetod, superpositsiooniteoreem, Thevenin'i ja Nortoni teoreemid). Reaalsed voolutugevused  $I$  ja pinged  $U$  tuleb vaid asendada komplekssetega  $\mathbf{I} = I_m \exp(j\omega t)$  ja  $\mathbf{U} = U_m \exp(j\omega t) \exp(j\varphi)$ ; takistused  $R$  asendada impedantsidega  $\mathbf{Z}$ , juhtivused  $G$  asendada admittantsidega  $\mathbf{Y}$  ning kasutada faasoralgebrat.
- Vahelduvvoolu pingejagur** (*voltage divider*) koosneb kahe koormuse (komplekssete impedantsidega  $\mathbf{Z}_1$  ja  $\mathbf{Z}_2$ ) jadaühendusest. Koormusel  $\mathbf{Z}_2$  tekib pinge  $\mathbf{U}_2 = \mathbf{U} \cdot \mathbf{Z}_2 / (\mathbf{Z}_1 + \mathbf{Z}_2)$ , kus  $\mathbf{U}$  on jagatav pinge. Pingejaguri väljundpinge  $\mathbf{U}_2$  on reguleeritav impedantside  $\mathbf{Z}_1$  ja  $\mathbf{Z}_2$  omavahelise vahekorra muutmise teel.
- Vahelduvvoolu voolujagur** (*current divider*) koosneb kahe koormuse (komplekssete impedantsidega  $\mathbf{Z}_1$  ja  $\mathbf{Z}_2$ ) rööpühendusest. Voolutugevus harus impedantsiga  $\mathbf{Z}_2$  avaldub kujul:  $\mathbf{I}_2 = \mathbf{I} \cdot \mathbf{Z}_1 / (\mathbf{Z}_1 + \mathbf{Z}_2)$ , kus  $\mathbf{I}$  on jagatava voolu tugevus. **NB!** Lugejas seisab naaberharu impedants  $\mathbf{Z}_1$ .
- Kirchhoffi vooluseadus** (*current law*) **vahelduvvooluahelas:** Hargneva vahelduvvooluahela igas hargnemispunktis ehk sõlmes on voolude algebraline faasorsumma võrdne nulliga. Sõlme sisenevate (positiivsete) voolutugevuste summa võrdub sõlmest väljuvate (negatiivsete) voolutugevuste summaga.
- Kirchhoffi pingeseadus** (*voltage law*) **vahelduvvooluahelas:** Mistahes kinnises kontuuris, mis on välja valitud hargnevast vahelduvvooluahelast, on pingeallikate komplekssete EMJ-de  $\mathbf{E} = E_m \exp(j\omega t) \exp(j\varphi)$  algebraline summa  $\sum \mathbf{E}_i$  võrdne ahela impedantsi omavatel lõikudel (sh allikate sees) tekkivate komplekssete pingete kui voolutugevuse ja impedantsi korrutiste  $\mathbf{I}_j \mathbf{Z}_j$  algebralise summaga:  $\sum \mathbf{E}_i = \sum \mathbf{I}_j \mathbf{Z}_j$ .
- Kolmnurk-täht-siire vahelduvvooluahelas:** skeemis reaalselt esinev kolmnurklülitus asendatakse temaga samaväärse tähtlülitusega, mille A-lõigu impedantsi  $\mathbf{Z}_A$  leidmiseks tuleb kolmnurga A-nurgast lähtuva kahe külje impedantside korrutis jagada kolmnurga kõigi kolme külje impedantside summaga:  $\mathbf{Z}_A = \mathbf{Z}_Y \mathbf{Z}_Z / (\mathbf{Z}_X + \mathbf{Z}_Y + \mathbf{Z}_Z)$ . Analoogiliselt  $\mathbf{Z}_B = \mathbf{Z}_X \mathbf{Z}_Z / (\mathbf{Z}_X + \mathbf{Z}_Y + \mathbf{Z}_Z)$  ja  $\mathbf{Z}_C = \mathbf{Z}_X \mathbf{Z}_Y / (\mathbf{Z}_X + \mathbf{Z}_Y + \mathbf{Z}_Z)$ .
- Täht-kolmnurk-siire vahelduvvooluahelas:** skeemis reaalselt esinev tähtlülitus asendatakse temaga samaväärse kolmnurklülitusega. Näiteks kolmnurga X-külje impedantsi leidmiseks tuleb tähe kõigist lõikudest moodustatud paaride (AB, BC, CA) impedantside korrutiste summa  $(\mathbf{Z}_A \mathbf{Z}_B + \mathbf{Z}_B \mathbf{Z}_C + \mathbf{Z}_C \mathbf{Z}_A)$  jagada tähe selle lõigu (A) takistusega, mis paikneb kolmnurga X-külje vastas.  $\mathbf{Z}_X = (\mathbf{Z}_A \mathbf{Z}_B + \mathbf{Z}_B \mathbf{Z}_C + \mathbf{Z}_C \mathbf{Z}_A) / \mathbf{Z}_A$ .
- Filter** on vahelduvvooluahel, milles voolutugevus või pinge sõltuvad sagedusest ( $\omega$  või  $f$ ). Vastavat funktsionaalset sõltuvust (enamasti admittantsi  $\mathbf{Y}$  sõltuvust sagedusest) nimetatakse ahela **sageduskosteks** (*selectivity*). Kõige lihtsamateks filtriteks ongi RC- ja RL-ahel. Kuna induktiivtakistus on võrdeline sagedusega ( $X_L = \omega L$ ), aga mahtuvustakistus on sagedusega pöördvõrdeline ( $X_C = 1/\omega C$ ), siis laseb RL-ahel paremini läbi madala ja RC-ahel – kõrge sagedusega vahelduvvoolu.
- RC- või RL-ahela piirsageduseks** ( $\omega_p$  või  $f_p$ ) nimetatakse ahela ajateguri  $\tau$  pöördväärtust. Vastavalt siis RC-ahela piirsagedus  $\omega_p = 1/RC$  ja  $f_p = 1/(2\pi RC)$  ning RL-ahelal  $\omega_p = R/L$  ja  $f_p = R/(2\pi L)$ . Piirsagedusel võrdub RC-ahela mahtuvustakistus või RL-ahela induktiivtakistus ahela aktiivtakistusega  $R$ , mis teatavasti ei sõltu sagedusest. Piirsagedusest väiksemal sagedusel domineerib RC-ahelas mahtuvustakistus ning piirsagedusest suuremal sagedusel RL-ahelas induktiivtakistus.
- RLC jada- või rööpahelas** esinevad mõlemad piiravad efektid samaaegselt, mistõttu ahela sageduskoste omab mingil sagedusel maksimumi (toimub resonants). Vastavat sagedust nimetatakse ahela resonantssageduseks  $\omega_r$ . RLC-jadaahelas tekib pingeresonants ja RLC-rööpahelas vooluresonants.
- Pingeresonantsiks** (*series resonance*) nimetatakse nähtust, mille korral RLC-jadaahelas on induktiivtakistus  $X_L = \omega L$  ja mahtuvustakistus  $X_C = 1/\omega C$  omavahel täpselt võrdsed. Kuna jadaahela kõiki osi läbib üks ja seesama vool, siis on ka pinged induktiiv- ja mahtuvustakistusel (vastavalt  $U_L$  ja  $U_C$ ) omavahel võrdsed. Pinge  $U_L$  on voolutugevusest faasis  $\pi/2$  radiaani ees ning pinge  $U_C$  voolust  $\pi/2$  rad võrra taga. Seega kahe pinge omavaheline faasinihe on  $\pi$ , need pinged on omavahel ka vastasuunalised (püüavad tekitada voolu vastandlikes suundades). Pinged  $U_L$  ja  $U_C$  tasakaalustavad teineteist, seega võivad nad mõlemad olla väga suured – palju suuremad ahela toitepingest.

**Pingeresonantsi mõiste:** nähtust nimetatakse eesti keeles pingeresonantsiks põhjusel, et teineteist tasakaalustavad kaks suurt pinget. Kuna  $RLC$ -jadaahela impedants  $Z = \sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}$ , siis võrdub impedants pingeresonantsi olukorras aktiivtakistusega:  $Z = R$  ning faasinihe pingel ja voolutugevuse vahel  $\varphi = 0$ . Pingeresonants tekib toitepinge sagedusel  $\omega_r = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2}$ , kus suurust  $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$  nimetatakse ahela omavõnkesageduseks ja suurust  $\beta = R/2L$  sumbeteguriks. Mõlemaid mõõdetakse SI-süsteemis ühikutes rad/s (tegemist on nurk- või ringsagedustega).

**Omavõnkesagedus**  $\omega_0$  on ringsagedus, millega toimub harmooniline elektriline vabavõnkumine ideaalses võnkeringis ehk  $LC$ -ahelas, mis sisaldab kondensaatorit mahtuvusega  $C$ , induktorit (pooli) induktiivsusega  $L$  ja mille aktiivne takistus  $R$  on null. Võnkumise käigus muundub kondensaatoris salvestuv elektrivälja energia perioodiliselt induktori magnetvälja energiaks ja vastupidi. Kui  $R = 0$ , siis elektromagnetvälja energia soojusena ei vabane ja võnkumine võiks kesta kuitahes kaua, kui võnkering ei kiirgaks elektromagnetlaineid. Iga reaalne võnkering siiski kaotab energiat, nii soojus- kui ka kiirguskadudena. Takistusvaba võnkeringi omavõnkesagedus on leitav takistuste  $X_L$  ja  $X_C$  võrdsuse tingimusest  $\omega_0 L = 1/\omega_0 C$ , mille põhjal  $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ , sagedus hertsides  $f_0 = 1/(2\pi\sqrt{LC})$  ja omavõnke-periood  $T_0 = 2\pi\sqrt{LC}$ .

**Sumbetegur**  $\beta = R/2L$  on suurus, mis sumbuvatel elektrilistel vabavõnkumistel kirjeldab amplituudi (kondensaatori maksimaalse pingel  $U_m$  või induktori maksimaalse voolutugevuse  $I_m$ ) eksponentsiaalset kahanemist ajas seaduse  $U_m(t) = U_{m0} \exp(-\beta t) = U_{m0} \exp(-t/\tau')$  või  $I_m(t) = I_{m0} \exp(-\beta t) = I_{m0} \exp(-t/\tau')$  kohaselt (see meenutab energiat loovutava  $RC$ - või  $RL$ -ahela siirdekarakteristikut). Siin  $U_{m0}$  või  $I_{m0}$  on amplituudi väärtus aja arvestuse alghetkel ( $t = 0$ ). Sumbeteguri pöördväärtust  $\tau' = 1/\beta$  nimetatakse sumbumise ajateguriks. Märkame, et sumbumise ajategur  $\tau' = 2L/R$  on kaks korda suurem  $RL$ -ahela ajategurist  $\tau = L/R$ . Seda põhjustab kondensaatori olemasolu  $RLC$ -võnkeahelas. Energia täiendav salvestumine kondensaatoris teeb muutused  $RLC$ -ahelas kaks korda aeglasemateks võrreldes  $RL$ -ahelaga. Sumbuvad vabavõnkumised toimuvad sagedusega  $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$  ehk pikemalt  $\omega = \sqrt{(1/LC) - (R^2/4L^2)}$ .

**Vooluresonantsiks** (*parallel resonance*) nimetatakse nähtust, mille korral vahelduvvoolu  $RLC$ -rööpahelas on induktiivne ja mahtuvuslik susceptants (vastavalt  $B_L = 1/\omega L$  ja  $B_C = \omega C$ ) omavahel täpselt võrdsed. Kuna rööpahela kõigile harudele rakendub üks ja seesama pingel, siis on voolutugevused läbi induktiivse koormuse ( $I_L$ , eeldame ideaalset induktorit, millel  $R = 0$ ) ja mahtuvusliku koormuse ( $I_C$ ) omavahel võrdsed. Vool  $I_C$  on pingest faasis  $\pi/2$  radiaani ees ning vool  $I_L$  pingest  $\pi/2$  rad võrra taga. Seega kahe voolu omavaheline faasinihe on  $\pi$ , need voolud on ahela kui terviku seisukohalt vastasuunalised. Voolud  $I_C$  ja  $I_L$  tasakaalustavad teineteist, seega võivad nad mõlemad olla väga suured – palju suuremad ahela toitevoolust. Nähtust nimetatakse eesti keeles vooluresonantsiks põhjusel, et teineteist tasakaalustavad kaks suurt voolu. Kuna  $RLC$ -rööpahela admittants  $Y = \sqrt{G^2 + (\omega C - 1/\omega L)^2}$ , siis võrdub admittants vooluresonantsi olukorras aktiivjuhtivuse ehk konduktantsiga:  $Y = G = 1/R$ . Rööbiti ühendatud kondensaator ja induktor moodustavad ideaalse võnkeringi ( $LC$ -ahela), milles vool kulgeb vahelduvvoolu poolel perioodil päripäeva ja teisel poolel perioodil vastupäeva. See vool nullistub hetkedel, mil maksimaalse väärtuse saavutab pingel.

**Pingeresonantsi-ahela** ( $RLC$ -jadaahela) **sageduskoste** on resonantsi kirjeldava parameetri ehk kondensaatoril tekkiva pingel  $U_C$  funktsionaalne sõltuvus sagedusest:  $U_C(f)$ . Sageduskoste määratlemisel eelistatakse pinget kondensaatoril induktoril tekkivale pingele põhjusel, et mitte lekkival kondensaatoril puudub aktiivtakistus täielikult, realsel induktoril on aga mingisugune aktiivtakistus alati olemas.

**$RLC$ -jadaahela hüvetegur** (*quality factor*, tähis  $Q$ ) näitab pingeresonantsi olukorras reaktiivvõimsuse  $P_Q$  või  $P_r$  ja aktiivvõimsuse  $P$  suhet:  $Q = (P_Q/P)_{\text{res}}$ . Kuna jadaahela kõiki osi läbib üks ja seesama vool  $I$ , siis ka  $Q = I^2 X_{L\text{res}} / I^2 R = \omega_r L / R$ . Kui hüvetegur on suur ( $\omega_r L \gg R$ ), siis  $\omega_r = \sqrt{(1/LC) - (R^2/2L^2)} \approx \sqrt{1/LC} = \omega_0$  ja hüveteguri valemi lugejasse ilmub induktiivse ning mahtuvusliku takistuse geomeetriline keskmine väärtus  $Z_w = (L/C)^{1/2}$ , mida nimetatakse **lainetakistuseks**  $\omega_0 L = \sqrt{1/LC} \cdot L = \sqrt{L/C} = \sqrt{\omega L \cdot (1/\omega C)} = Z_w$ . Seega hüvetegur:  $Q = \sqrt{L/C} / R = Z_w / R$ .

**Lainetakistus** (*wave impedance*)  $Z_w = (L/C)^{1/2}$  näitab induktiivse ja mahtuvusliku takistuse koostoimet resonantses vahelduvvooluahelas. Ta on saanud oma nime selle järgi, et elektromagnetlainete levikul vaakumis  $Z_w = (\mu_0/\epsilon_0)^{1/2}$ . Kuna EM-lainete levimise kiirus vaakumis  $c = 1/(\mu_0\epsilon_0)^{1/2}$ , siis  $Z_w$  (vaakum)  $= Z_0 = \mu_0 c$ . Suurust  $Z_0 = \mu_0 c = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N/A}^2 \cdot 299\,792\,458 \text{ m/s} = 376,730313 \, \Omega \approx 377 \, \Omega$  nimetatakse vaakumi lainetakistuseks.

**Läbilaskeriba** on vahemik selliste sageduse väärtuste  $f_1$  ja  $f_2$  vahel, mille korral resonantsi kirjeldav parameeter ( $RLC$ -jadaahelas pinge kas kondensaatoril või ideaalsel induktoril,  $RLC$ -rööpahelas voolutugevus kas  $L$ - või  $C$ -rööpharus) saavutab väärtuse, mis on resonantne väärtus ( $U_{C\text{ res}}$  või  $I_{C\text{ res}}$ ) jagatud ruutjuurega kahest, ehk siis 70,7% resonantsest väärtusest. Seega jadaahelas  $U_C(f_1) = U_C(f_2) = U_{C\text{ res}}/\sqrt{2} = 0,707 U_{C\text{ res}}$ . Kuna  $P = I^2 R$ , siis  $P(f_1) = P(f_2) = (I_{C\text{ res}}/\sqrt{2})^2 R = 0,5 P_m$ , kus  $P_m$  on resonantsi olukorras eralduv võimsus, siis määrab läbilaskeriba **piirsagedused**  $f_1$  ja  $f_2$  võimsuse vähenemine pooleni maksimaalsest võimsusest  $P_m$ .

**Läbilaskeriba laius** (*bandwidth*)  $\Delta f$  on kahe piirsageduse  $f_1$  ja  $f_2$  vahe:  $\Delta f = f_2 - f_1$ . Läbilaskeriba laiust tähistatakse ingliskeelses kirjanduses sageli lühendiga WHM (*width at half maximum*). **NB!** Jutt on võimsuse maksimumist. Pingeresonantsi olukorras  $Z = R$  ning  $P = P_m$ , aga piirsagedustel  $P = 0,5 P_m$  ja  $I = 0,707 I_m$  ehk  $I = I_m / 1,414$ . Seega peab impedants piirsagedustel olema 1,414 korda suurem impedantsist resonantskõvera maksimumis (aktiivtakistusest  $R$ ):  $Z(f_1) = Z(f_2) = 1,414 R$ . Kuna takistuskolmnurgast  $\cos \varphi = R/Z$ , siis piirsagedusel  $\cos \varphi = 1/1,414 = 0,707$  ja  $\varphi = \pm 45^\circ$ , mille põhjal kehtib seos  $|X_L - X_C| = R$ . Seega peab induktiivtakistus olema madalamal piirsagedusel  $f_1$  oma resonantsest väärtusest väiksem täpselt samapalju (mingi  $\Delta Z$  võrra) kui mahtuvustakistus on sel sagedusel resonantsest väärtusest suurem. Piirsagedusel  $f_2$  on aga vastupidi: induktiivtakistus on  $\Delta Z$  võrra oma resonantsest väärtusest suurem ning mahtuvustakistus on  $\Delta Z$  võrra väiksem. Induktiiv- ja mahtuvustakistuse niisugusest sümmeetriast tulenevalt  $\Delta Z = 0,5 R$ , kuna  $|X_L - X_C| = R$ . Seega  $2\pi f_2 L - 2\pi f_1 L = 2\pi \Delta f L = R$ , millest  $\Delta f = R / (2\pi L)$ . Kui jagame selle seose läbi resonantssagedusega  $f_r$ , siis saame  $\Delta f / f_r = R / (2\pi f_r L) = R / X_{L\text{ res}} = 1/Q$ . Lõpptulemusena saame, et  $\Delta f = f_r / Q$  või  $Q = f_r / \Delta f$ . Seega hüvetegur on võrdne resonantssageduse ja läbilaskeriba laiuse suhtega. Hüvetegur on seda suurem, mida kitsam on resonantskõver (sageduskoste funktsioon). Seega hüvetegur iseloomustab ahela selektiivsust (sobivust ühe kindla sagedusega signaali väljavalmimiseks paljude hulgast). Kui sageduskoste funktsioon omab teravat ja kitsast maksimumi, siis ahel selekteerib välja just maksimumile vastava sagedusega signaali, jättes kõrvale sellest erineva sagedusega signaalid (ajas muutuvad pinged või voolud).

**Ideaalset induktorit** sisaldava vooluresonantsi-ahela kompleksne admittants avaldub kujul  $\tilde{Y} = j(\omega C - 1/\omega L)$  (nurk haruvoolude vektorite vahel  $180^\circ$  ehk  $\pi$  rad); **reaalset induktorit** (aktiivtakistusega  $R_j$ ) sisaldava ahela admittants aga kujul  $\tilde{Y} = j\omega C + 1/(R_j + j\omega L)$ , millest tulenevalt on nurk haruvoolude vektorite vahel veidi väiksem kui  $180^\circ$ . Haruvoolude vektorite (ligikaudne) vastassuunalisus tingib selle, et koguvoolu (ahela toitevoolu) vektor on haruvoolude vektoritest oluliselt lühem. Vooluresonantsi olukorras on toitevool minimaalne, seega ka ahela admittants minimaalne ning impedants maksimaalne (vastupidiselt pingeresonantsile).

**Vooluresonantsi-ahela** ( $LC$ -rööpahela) **sageduskoste** on resonantsi kirjeldava parameetri ehk kondensaatorit sisaldavat rööpharu läbiva voolu tugevuse  $I_C$  funktsionaalne sõltuvus sagedusest:  $I_C(f)$ . Sageduskoste määratlemisel eelistatakse voolu läbi kondensaatori induktorit läbivale voolule põhjusel, et korras kondensaatoril puudub aktiivtakistus täielikult, reaalsel induktoril on aga mingisugune aktiivtakistus alati olemas.

**Reaalse induktori** (induktiivtakistusega  $X_j = \omega L$  jadamisi ühendatud aktiivset takistust  $R_j$  omava induktori) impedants  $Z_L = R_j + jX_j$  esitatakse sageli temaga samaväärse  $RL$ -rööpahela parameetrite  $R_r = Z^2/R_j$  ja  $X_r = Z^2/X_j$  kaudu, kus  $Z^2 = R_j^2 + X_j^2$ . Samaväärsus tähendab, et admittants  $Y_L = 1/Z_L = 1/R_r + 1/(jX_r)$ . Sellega taandatakse  $R_j$  ja  $X_j$  jadaühendust sisaldav  $RLC$ -segaahel puhtale (kolme rööpharu sisaldavale)  $RLC$ -rööpahelale, mille matemaatiline käsitlemine on lihtsam.

**RLC-rööpahela hüvetegur**  $Q$  näitab vooluresonantsi olukorras reaktiivvõimsuse  $P_Q$  või  $P_r$  ja aktiivvõimsuse  $P$  suhet:  $Q = (P_Q/P)_{\text{res}}$ . Kuna rööpahela kõikidele harudele rakendub üks ja seesama pinge  $U$ , siis suured voolud induktiivses ja mahtuvuslikus harus on võimalikud vaid juhul, kui aktiivharu takistus  $R_r$  on suur. Me saame, et  $Q = (U^2/X_{L\text{ res}}) / (U^2/R) = R_r/\omega_r L = R_r/Z_w = R_r/(L/C)^{1/2}$ . Seega tuleb hüveteguri leidmiseks aktiivharu takistus  $R_r$  jagada ahela lainetakistusega  $Z_w$ . Kui pingeresonantsi olukorras on vool ahela toitejuhtmetes maksimaalne, siis vooluresonantsi korral on ta minimaalne.

**Läbilaskeriba laius**  $\Delta f$  on ka vooluresonantsi korral kahe piirsageduse  $f_1$  ja  $f_2$  vahe:  $\Delta f = f_2 - f_1$ . Piirsagedused ise on jällegi määratud sagedustena, mille juures kasulik võimsus on vähenenud pooleni maksimaalsest. Samamoodi nagu pingeresonantsi korral, on hüvetegur ka vooluresonantsil võrdne resonants-sageduse ja läbilaskeriba laiuse suhtega:  $Q = f_r/\Delta f$ .

**Trafo** ehk **transformaator** (*transformer*) on elektromagnetilisel induktsioonil põhinev seade vahelduvpinge ja voolutugevuse muutmiseks konstantsel sagedusel. Trafo mähised on induktorid, mida enamasti läbib üks ja seesama magnetvoog. Trafo **primaarmähis** on see trafo mähis, millele rakendatakse trafole antav vahelduvpinge. Trafo **sekundaarmähis** on see trafo mähis, millelt võetakse trafo poolt muundatud vahelduvpinge. Trafo on pooljuhtseadmete kõrval peamiseks vahendiks erinevate vahelduvvooluahelate sidestamisel.

**Elektriahelate sidestamine** (*coupling*) on võimaluse loomine elektromagnetvälja energia ja selle välja poolt kantava info üleminekuks ühelt elektriahelalt teisele, ilma et tingimata toimuks laengukandjate üleminekut ühest ahelast teise. Trafosidestuse korral toimub energia ülekanne muutuva magnetvälja vahendusel.

**Trafo südamik** (*core*) on ferromagneetilisest materjalist (tavaliselt raudpleki lehtedest) koosnev kinnine kontuur, millele on keritud trafo mähised. Südamik kannab magnetvälja ühelt mähiselt teisele üle, moodustades sellega *magnetahela*. Südamiku materjali *magnetiline läbitavus* peab olema suur (reeglina üle 100), et vältida *puistevo* tekkimist.

**Ferromagneetik** on aine, mille magnetiline läbitavus  $\mu$  pole konstant vaid sõltub magnetvälja tugevusest  $H$  ja võib omandada väga suuri väärtusi (kuni  $10^6$ ). Seega ferromagneetikutel magnetinduktsiooni  $B$  sõltuvus magnetvälja tugevusest  $H$  pole lineaarne vaid selles sõltuvuses esineb hüsterees. Seda põhjustab ferromagneetiku domeenstruktuur. Ühe domeeni piires on ferromagneetiku aatomjääkide (ioonide) magnetmomendid kõik omavahel paralleelsed. Iga ferromagneetikut iseloomustab tema Curie temperatuur  $T_C$ , millest kõrgemal soojusliikumine lõhub domeenstruktuuri ja ferromagneetik muutub paramagneetikuks. Lihtainetena on toatemperatuuril ferromagneetikud raud, koobalt ja nikkel.

**Hüsterees** (kr *hysteresis* - hilinemine) on nähtus, mille korral sõltuvus kahe füüsikalise suuruse vahel ei ole üksühene, mistõttu sõltuvuse graafik moodustab nn hüstereesisilmuse. Kui näiteks alustame ferromagneetiku magneetimist demagneeditud seisundist ( $H = 0$ ,  $B = 0$ ), siis liigume piki magneetumise algkõverat kuni magnetinduktsiooni küllastusväärtuseni  $B_s$  (*saturation induction*), mille korral aine magnetväli enam ei kasva, sest magneetiva väljaga samasuunaline domeen on kõik teised "alla neelanud". See juhtub domeeniseinte liikumise tulemusena. Kui me seejärel vähendame ferromagneetikule mõjuva välise magnetvälja tugevust  $H$  kuni nullini, siis magnetinduktsioon kahaneb nn jääkväärtuseni  $B_r$  (*remanent induction*), kuna osades domeenides säilib kord omandatud magnetvälja suund. Magnetinduktsioon nullistub alles negatiivsel (esialgsele vastasuunalisel) magnetvälja tugevuse väärtusel  $-H_c$ , mida nimetatakse koertsitiivsuseks (*coercitivity*). Esialgsele vastasuunalise välja edasisel tugevdamisel jõuame  $B$  negatiivse küllastusväärtuseni  $-B_s$ . Selline liikumine  $B$  positiivsest küllastusväärtusest kuni negatiivseni annab hüstereesisilmuse  $B = f(H)$  vasakpoolse külje, vastupidine liikumine läbi parempoolse koertsitiivsuspunkti ( $B = 0$ ,  $H = +H_c$ ) aga silmuse parempoolse külje. Laia hüstereesisilmusega ferromagneetikuid nimetatakse kõvadeks, kitsa silmusega ferromagneetikuid aga pehmeteks.

**Magnetvoog** (*magnetic flux*)  $\Phi$  **trafo südamikus** on trafo kõigile mähistele ühine. See tõdemus on võtmeks trafo talitluse mõistmisel. Mistahes mähise iga keerd toimib vooluallikana, mille EMJ on Faraday induktsiooniseaduse kohaselt  $E_{1k} = -d\Phi/dt$ . Need vooluallikad on ühendatud jadamis, mistõttu nende elektromotoorjõud liituvad. Tulemusena on iga mähise otstel indutseeritav elektromotoorjõud  $E_i$  võrdeline keerdude arvuga  $N_i$  selles mähises:  $E_i = N_i E_{1k}$ . Sellest tuleneb trafo ülekandearvu  $a$  väärtus.

**Trafo ülekandearv** (*transformation ratio*)  $a$  näitab primaarmähises indutseeritud EMJ  $E_{pr}$  ja sekundaarmähises indutseeritud EMJ  $E_{sek}$  suhet. Ülaltoodud põhjustel võrdub see suhe primaar- ja sekundaarmähise keerdude arvude suhtega (suurus  $E_{1k} = -d\Phi/dt$  taandub). Niisiis  $a = E_{pr} / E_{sek} = N_{1(pr)} / N_{2(sek)}$ . Mõnikord nimetatakse trafo ülekandearvuks ka primaarmähisele rakendatud pinge  $U_{pr} = U_1$  ja sekundaarmähiselt võetava pinge  $U_{sek} = U_2$  suhet:  $a = U_1 / U_2 \approx E_{pr} / E_{sek} = N_1 / N_2$ . Pingete suhe võrdub keerdude arvude suhtega seda paremini, mida väiksemad on mähiste impedantsid võrreldes sekundaarmähise otstele ühendatud seadme impedantsiga (koormusimpedantsiga  $Z_k$ ). Ülekandearvu sellisest definitsioonist järeldub, et kui trafo pinget tõstab, siis ülekandearv  $a < 1$  ja kui trafo pinget langetab, siis  $a > 1$ .

**Puistevoog** (*leakage flux*)  $\Phi_p$  (Jacksoni õpikus  $\Phi_{leak}$ ) on see osa mingi induktori (näiteks trafo primaarmähise) poolt tekitatavast magnetvoost  $\Phi_1$ , mis ei toimi teistes mähistes. See tähendab, et mingi osa  $[(\Phi_p / \Phi_1) \cdot 100 \text{ protsenti}]$  primaarmähise keerdudest käitub nii nagu nad moodustaksid omate induktori, mis paikneb ainult primaarahelas ja ei mõjuta magnetiliselt sekundaarahelat. Magnetvoo puistumise põhjuseks on asjaolu, et magnetvälja jõujooned kulgevad ka õhus, mitte ainult südamiku raudplekis. Magnetvoogu puistav induktor käitub püsिमagnetina, mille põhjapoolusest jõujooned otseteed lõunapoolusesse suunduvad.

**Koormamata trafo** ehk trafo tühiseis (*open-circuit*) on olukord, mil sekundaarahel on avatud, koormus-impedants  $Z_k$  või  $Z_L$  (ingl *load impedance*) on lõpmata suur, seega sekundaarvool puudub ( $I_2 = 0$ ) ja primaarmähises kulgev magnetiv vool ( $I_{mag}$ ) on ainsaks südamik magnetvoogu põhjustavaks teguriks. Selle voolu tugevuse lubatav maksimaalne väärtus on määratud südamiku materjali (*core sheet-steel*) magnetumiskõvera tõusva osa piiriga, sest südamiku küllastumisel tekiks siinussignaali moonutus. Trafo raudplekil tekib küllastus ca  $B = 1,1$  T juures. Vastavalt loetakse maksimaalseks lubatavaks  $B$  väärtuseks reeglina 1 T, millele trafopleki korral vastab magnetvälja tugevus ca 420 amperkeerdude meetri kohta.

Primaarvoolu maksimaalne lubatav efektiivväärtus on arvutatav valemist  $I_{1(pr)} = H_m l / (\sqrt{2} N_1)$ , kus  $H_m = 420$  Ak/m,  $l$  on primaarmähise pikkus ja  $N_1$  – primaarmähise keerdude arv.

**Koormatud** (*loaded*) trafo (lõpliku  $Z_k$ ) korral on sekundaarvool olemas ( $I_2 \neq 0$ ) ja tekitab Lenzi reegli kohaselt primaarvoolu magnetvälja muutumist takistava magnetvoo. Seega tekib näiteks kasvava primaarvoolu  $I_1$  korral sellele vastupidise suunaga (peaaegu vastasfaasis paiknev) sekundaarvool tugevusega  $I_2$ . Magnetilised pinged  $U_m$  ehk amperkeerdude arvud trafo primaar- ja sekundaarmähises liituvad, nende summaks on trafo kui tervikliku magnetahela magnetomotoorjõud  $M$  (MMJ). See omakorda tekitab trafo südamik kogumagnetvoo  $\Phi = M / R_m$ , kus  $R_m$  on kõigi mähiste summaarne magnetiline takistus ehk relaktants. Kogumagnetvoo muutumine põhjustab mistahes mähise igas keerus elektromotoorjõu  $E_{1k} = -d\Phi/dt$ . **NB!** Magnetilised pinged primaaris ja sekundaaris liituvad vektoriaalselt (*phasor sum*). Kuna primaar- ja sekundaarvool on peaaegu vastassuunalised, siis on seda ka vastavad magnetilised pinged. Primaari ja sekundaari magnetilise pinge faasorid ei ole täiesti samasihilised, mistõttu MMJ kui nende faasorsumma on nullist erinev ja tekitab kogumagnetvoo  $\Phi$ . Primaari ja sekundaari magnetiliste pingete ligikaudsest võrdsusest  $N_1 I_1 \approx N_2 I_2$  tulenevalt on koormatud trafo korral voolude suhe ligikaudu võrdne keerdude arvude pöördsuhtega:  $I_2 / I_1 \approx N_1 / N_2 = a$  (ülekandearv).

**Peegel-impedants** (*reflected impedance*)  $Z_p$  on suurus, mille abil kirjeldatakse koormusimpedantsi  $Z_k$  mõju trafo primaarahelale. Peegel-impedantsiga võrduva koormuse ühendamise koormamata trafo primaarahelasse rööbiti trafo primaarmähisega on samaväärne koormatud trafoga, mille koormusimpedants on  $Z_k$ . Peegel-impedants  $Z_p$  on ligikaudu võrdne ülekandearvu  $a$  ruudu ja koormusimpedantsi  $Z_k$  korrutisega:  $Z_p \approx a^2 Z_k$ . **NB!** Pinget tõstva trafo korral teatavasti  $a < 1$  ja seega  $Z_p \ll Z_k$ , primaarahela kogutakistus väheneb ja primaarvool kasvab (on suurem sekundaarvoolust).

**Primaari puistereaktants** (*leakage reactance*)  $X_{p1}$  (Jacksoni õpikus  $X_p$ ) on selle kujuteldava, jadamisi primaarahelasse ühendatud induktori reaktants, mis ei mõjuta magnetiliselt sekundaarahelat ja põhjustab primaarmähises puistevoogu. Analooiliselt võime defineerida ka sekundaari puistereaktantsi  $X_{p2}$  (Jacksoni õpikus  $X_s$ ). See oleks siis kujuteldava, jadamisi sekundaarahelasse ühendatud induktori reaktants, mis ei mõjuta magnetiliselt primaarahelat ja põhjustab sekundaarmähises puistevoogu.

**Vastastikune voog** ehk **toimevoog**  $\Phi_t$  (*mutual flux*, Jacksoni õpikus  $\Phi_{mutual}$ ) on see osa mingi induktori (trafo mähise) poolt tekitatavast magnetvoost, mis toimib ka teistes mähistes (ei puistu). Toimevoogu tekitab see osa [ $(\Phi_t / \Phi_1) \cdot 100$  protsenti] primaarmähise keerdudest, mis mõjutavad magnetiliselt sekundaarahelat.

**Toimereaktants**  $X_t$  on ainult toimevoogu põhjustava kujuteldava induktori reaktants. Trafo primaarahelat võib vaadelda koosnevana: 1) primaarpinge allikast; 2) sellega jadamisi ühendatud takistist  $R_1$  (Jacksonil  $R_p$ ), mille takistus on ekvivalentne primaarmähise aktiivtakistusega; 3) trafo primaarmähisest, kui ideaalsest induktorist, millel puudub isegi reaktants; 4) viimasega rööbiti ühendatud toimereaktantsi imitaatorist induktiivsusega  $L_t$  (Jacksonil  $L_{mag}$ ) ja reaktantsiga  $X_t = \omega L_t$  ning 5) primaarmähisega rööbiti ühendatud takistist  $R_{Fe}$  (Jacksonil  $R_{CL}$ , *core loss*), mida läbiv vool imiteerib trafo rauaskadu.

**Rauaskadu** (*core loss*)  $P_{Fe}$  (Jacksonil  $P_{CL}$ ) on võimsuskadu, mis on põhjustatud pöörisvoolude (*eddy currents*) tekkimisest südamiku raudplekis, aga ka teistes trafo elektrit juhtivates detailides. Trafo tööga vältimatult kaasnev ajas muutuv magnetväli tekitab pööriselektrivälja, mille mõjul hakkavad laengukandjad juhtivas materjalis liikuma piki kinnisi kontuure ehk pööriseid. Samuti põhjustab rauaskadu trafo südamiku ümbermagnetimine, kuna hüstereesisilmuse pindala võrdub südamiku materjali ruumalaühikus ühekordsel ümbermagnetimisel tehtava tööga.

**Rauaskao vähendamiseks** tehakse trafo südamik omavahel elektriliselt isoleeritud õhukestest raudpleki lehtedest. Pöörisvoolu-kontuuride läbimõõt on sel juhul piiratud plekilehe paksusega ja tugevaid pöörisvoole südamik tekkida ei saa. Energiakao vältimiseks ümbermagnetimisel kasutatakse südamiku materjalina pehmet (väikese koertsitiivsusega) rauasulamit, mille hüstereesisilmus on kitsas ja seega silmuse pindala väike. Trafo aseskeemi aspektis on rauaskadu esitatav kujul  $P_{Fe} = I_{Fe}^2 R_{Fe}$ , kus  $I_{Fe}$  on see osa trafo primaarvoolust, mis kulgeb primaarahela harus takistusega  $R_{Fe}$ .

**Trafo aseskeemi primaarahela** osas paiknevad mõiste *toimereaktants* juures (1-5) kirjeldatud takistid ja induktorid. Sekundaarahelas paiknevad omavahel jadamisi ühendatult: 1) sekundaarmähis kui ideaalne induktor; 2) sekundaarmähise aktiivtakistust imiteeriv takisti  $R_2$  (Jacksonil  $R_s$ ); 3) sekundaari puistereaktantsi  $X_{p2}$  imiteeriv induktor ja 4) koormusimpedants  $Z_k$  või  $Z_L$  (*load impedance*). Raudsüdamikuga trafos on primaar ja sekundaarmähise puistereaktantside suhe reeglina üpris hästi võrdne vastavate mähiste keerude arvude suhtega, seega – trafo ülekandearvuga  $a$ . Järelikult avaldub terviklik peegel-impedants  $Z_p$  (Jacksonil  $Z_{ref}$ ) kujul  $Z_p = a^2 (R_2 + jX_{p2} + Z_L)$ . See võimaldab koormatud trafo aseskeemi veelgi lihtsustada, kuna primaarmähisega rööbiti paiknevates harudes takistustega  $R_{Fe}$  ja  $X_t$  kulgevad koormusvooluga võrreldes suhteliselt nõrgad voolud, mida võib mitte arvestada (vt allpool *trafo lihtsaim aseskeem*).

**Vaseskadu** (*copper loss*)  $P_{Cu}$  (Jacksonil  $I^2 R_e$ ) on võimsuskadu, mille põhjustab elektromagnetvälja energia üleminek soojuseks mähiste vaskjuhtmetes. Kui esitame vaseskao otseselt võimsuse valemi abil kujul  $I^2 R_e$ , siis mõtleme voolutugevuse  $I$  all trafo lihtsaimat aseskeemi läbiva voolu tugevust.

**Trafo kasutegur** (*efficiency*)  $\eta$  näitab, kui suure osa moodustab koormusel eralduv kasulik võimsus  $P_k$  (nn väljundvõimsus  $P_{välj}$ ) primaari toiteallika poolt arendatavast võimsusest (sisendvõimsusest  $P_{sis}$ ). Väljundvõimsus on esitatav aktiivvõimsuse üldise valemi  $P = I U \cos \varphi$  abil kujul  $P_k = I_2 U_2 \cos \varphi$ , kus  $I_2$  on voolutugevus sekundaarmähises,  $U_2$  – sekundaarmähise otstel (koormusel) tekkiv pinge ning  $\varphi$  on faasi-nihe nende vahel. Jacksoni õpikus on väljundvõimsus esitatud kujul  $S_L \cos \varphi$ , kus  $S_L$  on näivvõimsus ( $I U$ ) koormusel. Sisendvõimsus on väljundvõimsuse ning vaseskao ja rauaskao summa:  $P_{sis} = P_k + P_{Cu} + P_{Fe}$ . Seega ühtekokku:  $\eta = P_k / (P_k + P_{Cu} + P_{Fe})$ . Kasuteguri määramiseks kasutatakse tühiseisu- ja lühisetesti. Mõlema juures on vajalik vahelduvvoolu vattmeeter.

**Tühiseisu-test** (*open-circuit test*) on meetod trafo rauaskao määramiseks. Pinget tõstvas režiimis ( $a < 1$ ) töötava trafo primaarahelasse ühendatakse primaarmähisega jadamisi ampermeeter ning rööbiti vattmeeter. Samuti ühendatakse sinna ülalkirjeldatud viisil vattmeeter. Primaari toidetakse reguleeritava (*adjustable*) pingeallika abil konkreetse primaarina toimiva mähise taluvust mitte ületava pingega. Sekundaarmähise otsad jäetakse lahti (koormamata trafo). **NB!** Sekundaarmähise otste vahel tekib ohtlikult kõrge pinge! Kuna primaarmähisele rakendatav pinge on väike, siis on väike ka primaarvool ning avatud sekundaarahelas puudub vool üldse. Seetõttu on vaseskadu tühine. Voolud tühiseisul trafo aseskeemis kulgevad läbi primaarmähisega rööbiti paiknevate harude takistustega  $R_{Fe}$  ja  $X_t$  (kuna  $Z_L = \infty$ , siis koormusvool puudub). Suurem vool läbib toimereaktantsi imitaatorit  $X_t$ , aga see vool on pingest faasis  $\pi/2$  võrra taga, mistõttu ta ei kajastu vattmeetri näidus. Vattmeeter näitab rauaskadu imiteerival takistil  $R_{Fe}$  eralduvat võimsust.

**Lühisetest** (*short-circuit test*) on meetod trafo vaseskao määramiseks. Mõõteriistad ühendatakse samamoodi nagu tühiseisu-testis, kuid seekord pinget langetavas režiimis ( $a > 1$ ) töötava trafo primaarahelasse. Trafo sekundaarahel on lühistatud ( $Z_L = 0$ ). Primaarahelasse ühendatud muudetava takisti (reostaadi) abil reguleeritakse primaarpinge selliseks, et ta moodustaks vaid väikese osa tühiseisu-testil samal mähisel tekkinud pingest (siis oli see mähis sekundaarmähiseks!). Kuna trafo pinget langetab, siis on primaarpinge sekundaarpingest suurem ja primaarvool on väike. Seega läbib ka rauaskadu imiteerivat takistit  $R_{Fe}$  väga nõrk vool  $I_{Fe}$  ja rauaskadu on väike. Vattmeeter näitab vaseskadu imiteerival takistil  $R_e$  eralduvat võimsust.

**Koormatud trafo lihtsaim aseskeem** on jadaahel, mis sisaldab: 1) primaarpinge allikat; 2) primaar- ja sekundaarmähiste summaarset efektiivset aktiivtakistust  $R_e = R_1 + a^2 R_2$ , mis kirjeldab summaarset vaseskadu; 3) primaar- ja sekundaarmähiste summaarset efektiivset reaktiivtakistust  $X_e = X_{p1} + a^2 X_{p2}$  ja 4) efektiivset koormusimpedantsi  $a^2 Z_L$ . Lihtsaima aseskeemi juures kasutame ära fakti, et primaarmähisega rööbiti paiknevates harudes takistustega  $R_{Fe}$  ja  $X_t$  kulgevad koormatud trafo korral tühiselt nõrgad voolud (nii rauaskao-vool  $I_{Fe}$ , kui ka toimereaktantsi imitaatorit läbiv ja südamikku magneetiv vool  $I_{mag}$ ).

**Koormatud trafo maksimaalne kasutegur** saavutatakse olukorras, kus vaseskadu ja rauaskadu on võrdsed. Ühe vähendamine viib vältimatult teise suurenemisele, kusjuures suureneb ka summaarne kadu.

**Koormuse sobitamine trafo abil** on võtte, mida rakendatakse maksimaalse võimsusülekanne saavutamiseks toiteallikalt koormusele. Teatavasti on peegel-impedantsiga  $Z_p$  võrduva koormuse ühendamine koormamata trafo primaarahelasse rööbiti trafo primaarmähisega on samaväärne koormatud trafoga, mille koormusimpedants on  $Z_k$ . Peegel-impedants  $Z_p$  on ligikaudu võrdne ülekandearvu  $a$  ruudu ja koormusimpedantsi  $Z_k$  korrutisega:  $Z_p \approx a^2 Z_k$ . Kui toiteallika sisetakistus  $r$  on väike (mõned oomid), koormus on puhtaktiivne ( $R_k$ ) ja trafo on vaadeldav ideaalsena (kasutegur  $\eta \rightarrow 100\%$ ), siis tähendab sobitamine sellise ülekandearvu  $a$  valimist, mille korral  $r \approx R_p$  (peegel-takistus)  $\approx a^2 R_k$ . Näiteks  $r = 2 \Omega$  ja  $R_k = 32 \Omega$  korral  $a^2 = r / R_k = 1/16$  ja  $a = 1/4$ .

**Autotrafo** (*autotransformer*) on trafo, mille primaar- ja sekundaarmähiseks on ühe ja sellesama induktori erinevad osad. Autotrafot kasutatakse juhul, kui primaar- ja sekundaarmähise elektriline lahutus pole vajalik. Primaarpinge rakendatakse pinget langetava autotrafo mähise kogupikkusele, sekundaarpinge aga võetakse vaid mingilt mähise osalt. Autotrafo sisaldab liugkontakti, mille abil saab muuta sekundaaris paiknevate keerdude arvu ja sellega reguleerida sekundaarpinget. Niisiis meenutab autotrafo pingejagurit, erinedes aga viimasest selle poolest, et: 1) pinged tekivad mitte aktiivsetel vaid induktiivsetel takistustel; 2) vool vaid primaarossa jäävates mähise keerdudes ning vool primaari ja sekundaari ühistes keerdudes pole koormatud autotrafo korral mitte ainult suuruselt erinevad vaid need voolud on reeglina ka vastandlike suundadega (nagu trafo primaar- ja sekundaarvool ikka). **Autotrafo on ülimalt ohtlik seade!** Kui primaar talitleb võrgupingel, siis saab elektrilöögi trafo mistahes klemmilt, sõltumata liuguri asendist.

**Sidestusahel** (*coupling network*) on elektriabel, mis paigutatakse kahe elektriseadme vahele, tagamaks elektrienergia või infot kandvate signaalide optimaalset ülekannet ühelt seadmelt teisele. Sidestusahel on üldjuhul **neliklemm** (*four-terminal network*), sisaldades kahte sisend- ja kahte väljundklemmi. Sageli on nii sisendis kui väljundis üks klemm maandatud. Sel juhul osutub sidestusahel kolmklemmiks ("täht" või "kolmnurk"). Omavahel sidestatavateks seadmeteks võivad olla nii vahelduva pinge (EMJ) allikad, kui ka lihtsalt koormused (takistitest, induktoritest ja kondensaatoritest koosnevad ahelad).

**Sidestusparameetrid** (*coupling network parameters*) on suurused, mis kirjeldavad sidestusahela reageerimist sidestatavate seadmete omaduste muutumisele. Sidestusparameetrite abil saab kirjeldada mistahes sidestusahelat, sh ka tundmatu sisuga ahelat. Neliklemmi korral eristatakse z-parameetreid ehk tühiseisu impedantsi parameetreid, y-parameetreid ehk lühise admittantsi parameetreid ning h-parameetreid ehk hübriidparameetreid. z-parameetrite kasutamine seisneb sidestusahela kui neliklemmi vaatlemises koosnevana kahest vastastikku sõltuvast Thevenin'i generaatorist. y-parameetrite kasutamine taandab sidestusahela analoogiliselt kahele vastastikku sõltuvale Nortoni generaatorile. h-parameetrite korral paikneb sisendis (primaar-ahelas) Thevenin'i generaator ja väljundis (sekundaaris) Nortoni generaator (selles seisnebki hübriidsus).

**Tühiseisu impedantsi parameetrid** (*open-circuit impedance parameters*) ehk z-parameetrid on tühiseisu (TS) sisend-impedants (*input impedance*)  $z_{11} = E_1 / I_1$  (kus  $I_2 = 0$ ); TS tagasikande-impedants (*reverse-transfer impedance*)  $z_{12} = U_1 / I_2$  (kus  $I_1 = 0$ ); TS ülekande-impedants (*forward-transfer impedance*)  $z_{21} = U_2 / I_1$  (kus  $I_2 = 0$ ) ja TS väljund-impedants (*output impedance*)  $z_{22} = E_2 / I_2$  (kus  $I_1 = 0$ ). Eesti keeles räägitakse sageli lihtsalt vastavatest takistustest (*impedants* = vahelduvvooluahela kogutakistus). Siin on  $E_1$  ja  $E_2$  vastavalt primaaris ja sekundaaris talitlevate pingeallikate elektromotoorjõud (**J**, Fig. 27.2);  $I_1$  ja  $I_2$  – neisse ahelatesse ühendatud ampermeetrite näidud ning  $U_1$  ja  $U_2$  – voltmeetrite näidud. Sisendparameetrite  $z_{11}$  ja  $z_{21}$  määramisel on avatud (ehk tühiseisus) väljund, väljundparameetrite  $z_{12}$  ja  $z_{22}$  määramisel aga sisend. Väiketähti kasutame z-parameetrite tähistena põhjusel, et nad kirjeldavad sidestusahelat tervikuna. Juhul, kui nii primaaris kui sekundaaris kulgeb vool, siis kehtivad seosed  $z_{11}I_1 + z_{12}I_2 = E_1$  ja  $z_{21}I_1 + z_{22}I_2 = E_2$ .

**Neliklemmi vastastikune impedants** (*mutual impedance*)  $Z_m$  on primaarile ja sekundaarile ühise ahelaosa impedants juhul, kui me võime käsitleda neliklemmi T-kujulise tähtühendusena (**J**, Fig. 27.2).  $Z_m$  on tekkiva T-tähe vertikaallõigu takistus,  $Z_p$  on sõlmest vasakule jääva (primaari-poolse) lõigu takistus ning  $Z_s$  on sõlmest paremale jääva (sekundaari-poolse) lõigu takistus. Kehtivad seosed  $z_{12} = z_{21} = Z_m$ ;  $z_{11} - z_{12} = Z_p$  ning  $z_{22} - z_{21} = Z_s$ .

**Sidestusimpedants** (*coupled impedance*)  $Z_C$  on suurus, millega kirjeldatakse sidestusahelat primaaris paikneva allika  $E_1$  ning sekundaaris paikneva passiivse koormuse  $Z_k$  vahel. Sidestusimpedants avaldub vastastikuse impedantsi  $Z_m$ , väljund-impedantsi  $z_{22}$  ja koormusimpedantsi  $Z_k$  kaudu kujul  $Z_C = Z_m^2 / (z_{22} + Z_k)$ .

**Neliklemmi admittantsi parameetrid** on mõtet kasutada siis, kui neliklemmi saab vaadelda  $\Pi$ -kujulise kolmnurkühendusena (**J**, Fig. 27.7).  $Y_m$  on tekkiva  $\Pi$ -tähe horisontaallõigu kompleksne kogujuhtivus ehk admittants,  $Y_p$  on sellest vasakule jääva (primaari-poolse) vertikaallõigu admittants ning  $Y_s$  on paremale jääva (sekundaari-poolse) vertikaallõigu admittants. Kuna mõlema vertikaallõigu alumised punktid on kokku ühendatud, siis on tegemist kolmnurkühendusega (*delta*).

**Lühise admittantsi parameetrid** (*short-circuit admittance parameters*) ehk y-parameetrid on lühise sisend-admittants (*SC input admittance*)  $y_{11} = I_1 / E_1$  (kus  $E_2 = 0$ ); lühise tagasikande-admittants (*SC reverse-transfer admittance*)  $y_{12} = I_1 / E_2$  (kus  $E_1 = 0$ ); lühise ülekande-admittants (*SC forward-transfer admittance*)  $y_{21} = I_2 / E_1$  (kus  $E_2 = 0$ ) ja lühise väljund-admittants (*SC output admittance*)  $y_{22} = I_2 / E_2$  (kus  $E_1 = 0$ ). Kui nii primaar- kui sekundaarahelas toimib EMJ, siis kehtivad seosed  $y_{11}E_1 + y_{12}E_2 = I_1$  ja  $y_{21}E_1 + y_{22}E_2 = I_2$ . Sidestusahela y-parameetrite ning tema  $\Pi$ -aseskeemi parameetrite  $Y_m$ ,  $Y_p$  ja  $Y_s$  vahel kehtivad seosed  $Y_m = -y_{12} = -y_{21}$ ;  $Y_p = y_{11} + y_{12}$  ning  $Y_s = y_{21} + y_{22}$ . (SC tähendab *short-circuit*).

**Hübriidparameetrid** (*hybrid parameters*) on lühise sisend-impedants (*SC input impedance*)  $h_{11} = U_1 / I_1$  (kus  $U_2 = 0$ ); pingevähendustegur tühiseisu korral (*open-circuit reverse-voltage ratio*)  $h_{12} = U_1 / U_2$  (kus  $I_1 = 0$ ); vooluvõimendustegur lühise korral (*SC forward-current ratio*)  $h_{21} = I_2 / I_1$  (kus  $U_2 = 0$ ) ning väljund-admittants sisendi tühiseisu korral (*open-circuit output admittance*)  $h_{22} = I_2 / U_2$  (kus  $I_1 = 0$ ). Hübriidparameetrid kirjeldavad võrdselt hästi nii trafot kui võimendit (J, Fig. 27.11, 27.12). Seepärast leiavad nad elektroonikas kõige rohkem kasutamist.

**Südamikuta trafot** (*air-core transformer*) kasutatakse peamiselt juhtudel, mil induktorite tugev omavaheline sidestamine pole soovitatav või siis on sagedus nii kõrge, et elektromagnetväli skin-efekti tõttu nagunii ei tungiks südamiku sisse (näiteks FM-raadioseadmetes). Südamikuta trafodes on puistevoog  $\Phi_p$  (*leakage flux*) reeglina suur ja vastastikune voog (toimevoog)  $\Phi_t$  (*mutual flux*) suhteliselt väike.

**Sidestustegur** (*coefficient of coupling*)  $k$  näitab, kui suure osa mingi induktori poolt tekitatud kogumagnetvoost  $\Phi$  moodustab teistele induktoritele mõjuv voog ehk toimevoog  $\Phi_t$ :  $k = \Phi_t / \Phi$ . Kui kaks induktorit on omavahel magnetiliselt sidestatud ( $k \neq 0$ ), siis tuleb kasutada vastastikuse induktiivsuse mõistet.

**Vastastikune induktiivsus**  $M_{12}$  (*mutual inductance*) kahe induktori (1 ja 2) korral on suurus, mis näitab, kui suur induktiooni EMJ tekib teises induktoris, kui voolutugevust esimeses muuta kiirusega 1 A/s. Kui vaadeldavateks induktoriteks on trafo primaar- ja sekundaarmähis, siis  $E_2 / I_1 = 2\pi f M_{12} = X_M$ , kus  $I_1$  on voolutugevus primaarmähises,  $E_2$  – indutseeritud EMJ sekundaarmähises ning suurus  $X_M$  nimetatakse primaar- ja sekundaarmähise vastastikuseks reaktantsiks (*mutual reactance*). Kuna kahe sidestatud induktori korral  $M_{12} = M_{21}$ , siis kasutatakse enamasti ühtset tähist  $M_{12} = M_{21} = M$ . Kui primaar- ja sekundaarmähis omavad vastavalt induktiivsusi  $L_1$  ja  $L_2$ , siis võib näidata, et sidestustegur  $k = M / \sqrt{L_1 L_2}$ .

**Kahe jadamise ühendatud induktori koguinduktiivsus** on esitatav kujul  $L = L_1 + L_2 \pm 2M$ , kus  $L_1$  ja  $L_2$  on kummagi induktori induktiivsused sõltumatute suurusena (kui teist ei oleks) ja  $M$  on nende vastastikune induktiivsus. Märk "+" tekib juhul, kui kahe induktori magnetväljad on samasuunalised, märk "–" aga juhul, kui nad on vastassuunalised.

**Trafosidestus-ahela sisendtakistus** (*input impedance*)  $Z_{in} = E_1 / I_1$  koormatud olukorras on esitatav kujul  $Z_{in} = Z_1 + (\omega M)^2 / (Z_2 + Z_k)$ , kus  $Z_1$  on primaarahela impedants,  $Z_2$  – sekundaarahela impedants ilma koormuseta,  $Z_k$  – koormusimpedants ning  $M$  – primaar- ja sekundaarmähise vastastikune induktiivsus, kusjuures vastastikune reaktants  $\omega M$  osutub puhtreaalseks (ei pööra faasi). Suurus  $Z_C = (\omega M)^2 / (Z_2 + Z_k)$  on antud juhul sidestus-impedants (*coupled impedance*), mis avatud sekundaarahela korral on null, aga aktiivkoormusega trafo korral osutub mahtuvuslikuks, kuna  $Z_2$  on peamiselt induktiivne.

**Pooljuht** on aine, milles laengukandjate arv on reguleeritav (sõltub temperatuurist, pealelangevast valgusest jne.). Pooljuhid paiknevad oma elektriijuhtivuse poolest juhtide ja mittejuhtide vahel. Puhtas (lisandeid mitte sisaldavas) pooljuhis on vabade laengukandjate arv aatomite üldarvust väiksem ca  $10^6$ – $10^9$  korda. Puhta pooljuhi eritakistus on kuni  $10^3 \Omega \cdot m$ , lisandeid sisaldavas) pooljuhis aga  $10^{-3} \Omega \cdot m$  ja vähemgi. Tähtsaim pooljuhti iseloomustav parameeter on keelutsooni laius  $E_g$ .

**Keelutsoon** on pooljuhis selline elektroni energia väärtuste piirkond, millele vastavad elektronolekud pole võimalikud, sest vastav elektronilaine hakkaks interferentsil iseennast kustutama. Keelutsooni laius  $E_g$  (ingl - *energy gap*), (korrektsemalt: energia kasvamisel viimasele täidetud tsoonile järgneva keelutsooni laius) on minimaalne energia, millega saab ühe sidemeelektroni muuta juhtivuselektroniks.

**Energiatsoonid** on elektroni energia lubatud väärtuste piirkonnad pooljuhis. Energiatsoonid tekivad üksiku aatomi kitsaste energiatasemete laienemisel, kui aatomid üksteisele lähenevad. Energiatasemete olemasolu ise tuleneb elektronide laineomadustest (dualismiprintsiip). Ainult kindla energiaga olekutes elektronilaine ei kustuta vaid tugevdab iseennast (tekib seisulaine). Energiatasemete laienemise põhjustab tõrjutusprintsiip: elektronil on "personaalne ruum" mitte ainult koordinaadi vaid ka lainepikkuse ja energia aspektis.

**Pooljuhi lisandjuhtivus** on elektriijuhtivus, mida põhjustavad lisandite (*doonorite* või *aktseptorite*) siseseviimisel pooljuhis tekitatud vabad laengukandjad (vt *elektronjuhtivus* ja *aukjuhtivus*).

**Pooljuhi omajuhtivus** on elektriijuhtivus, mida põhjustavad puhtas pooljuhis termiliselt või optiliselt tekitatud vabad laengukandjad. Ühe elektron-auk-paari tekitamiseks puhtas pooljuhis vajalik minimaalne energia on keelutsooni laius. Mida suurem on pooljuhi keelutsooni laius, seda kõrgemat temperatuuri või suurema kvandi energiaga valgust on vaja omajuhtivuse tekitamiseks selles pooljuhis.

**Elektronjuhtivuse** ehk **n**-juhtivuse korral on enamus-laengukandjateks *pooljuhis* elektronid. Elektronjuhtivus tekib *doonorlisandi* sisseviimisel pooljuhti.

**Doonor** on põhiaainest ühe võrra suurema valentsiga lisand *pooljuhis*, näiteks viievalentne arseen (As) või fosfor (P) neljavalentses ränis (Si). Doonorlisandi aatomil jääb üks valentselektron üle keemilise sideme moodustamisel põhiaine aatomitega. Doonori ioniseerumiseks nimetatakse protsessi, mille käigus see liigne elektron lahkub doonori aatomi juurest ja muutub juhtivuselektroniks. Ioniseerunud doonoril on positiivne laeng (aatomjäägil laeng  $+5e$ , neljal sideme-elektronil kokku  $-4e$ ).

**Aukjuhtivuse** ehk **p**-juhtivuse korral on enamus-laengukandjateks augud. **Auguks** nimetatakse elektroni puudumise seisundit pooljuhi keemilises sidemes. Auk käitub positiivse laenguga osakesena, augu liikumine realiseerub valentselektronide järjestikuste ülehüpetena ühest keemilisest sidemest teise. Aukjuhtivus tekib *aktseptorlisandi* sisseviimisel pooljuhti.

**Aktseptor** on põhiaainest ühe võrra väiksema valentsiga lisand *pooljuhis*, näiteks kolmevalentne indium (In) või gallium (Ga) neljavalentses ränis (Si). Aktseptorlisandi aatomil jääb üks valentselektron puudu keemilise sideme moodustamisel põhiaine aatomitega. See tähendab *augu* olemasolu pooljuhis. Aktseptori ioniseerumiseks nimetatakse protsessi, mille käigus aktseptori juures paiknev auk täidetakse elektroniga kahe põhiaine aatomi vahelisest keemilisest sidemest. Sellega on põhiaines tekitatud positiivne laengukandja – vaba auk. Ioniseerunud aktseptoril on negatiivne laeng (aatomjäägi laeng  $+3e$ , sideme elektronidel kokku  $-4e$ ).

**pn-siire** on pooljuhi piirkond, milles üks juhtivustüüp asendub teisega. n-piirkonnas on enamus-laengukandjateks (negatiivsed) elektronid, p-piirkonnas aga (positiivsed) *augud*. p-piirkonna ioniseeritud *aktseptorite* negatiivne ruumlaeng ja n-piirkonna ioniseeritud *doonorite* positiivne ruumlaeng moodustavad elektrilise kaksikkihi, mille elektriväli on suunatud n-piirkonnast p-piirkonda ja seega takistab enamus-laengukandjate läbimineku siirdest (hoiab enamus-laengukandjaid lahus). Siirde piirkonnas on ioniseeritud doonorite ja aktseptorite laeng tasakaalustamata, sest vabad elektronid ja augud on omavahel rekombineerunud (elektronid on augud ära täitnud). Siirde laengukandjatest vaesunud ala ehk vaegala (ingl *depletion region*) takistus määrab kogu pooljuhitüki takistuse. Siirde kasutamisel muudetakse siirdele pinge rakendamise teel vaegala paksust. Päripingestamisel (vt *diod*) rakendatakse siirdele kaksikkihi väljale vastupidise suunaga täiendav elektriväli, sellega surutakse p- ja n-osade enamus-laengukandjaid omavahel kokku (soodustatakse nende rekombineerumist siirdes). See teeb vaegala kitsamaks (siirde takistus väheneb). Vastupingestamisel rakendatakse siirdele kaksikkihi välja suhtes samasuunaline elektriväli, mis viib enamus-laengukandjad veelgi rohkem lahku ja teeb vaegala laiemaks (siirde takistus suureneb).

**Diod** on seade, mis juhib elektrivoolu ainult ühes suunas. Pooljuhtdiod sisaldab ühtainsat *pn-siiret*. Välise vooluallika **plussklemmi** ühendamist diodi **p**-piirkonnaga (*p* ja *p*) ning **negatiivse** klemmi (miinusklemmi) ühendamist **n**-piirkonnaga nimetatakse diodi või siirde päripingestamiseks, vastupidist ühendust (*p* ja *n* kokku) nimetatakse aga vastupingestamiseks. Päripingestamisel siire juhib elektrivoolu, vastupingestamisel ei juhi (siirde "päri-" ja "vastulülituse" takistused erinevad tuhandeid kordi).

**Valgusdiod** (ingl LED – *light emitting diode*) on päripingestatav *diod*, mille *pn-siirde* alas toimub voolu läbiminekul diodist elektronide ja aukude rekombinatsioon ja elektron-auk-paaride energia vabaneb valgusena. Selle valguse kvandi energia on määratud kasutatava pooljuhi keelutsooni laiussega.

**Fotodiod** on *diod*, mis valgustamisel hakkab elektrivoolu juhtima, sest footonite energia arvel tekivad *pn-siirde* alas elektron-auk-paarid. Enamasti kasutatakse läbilöögi-alani vastupingestatud *pn-siirdega* fotodioode (ingl *Avalanche Photodiode*), sest neis toimub vabade laengukandjate arvu laviinilaadne kasv. See võimaldab registreerida väga nõrku valgussignaale.

**Stabilitron** ehk **Zeneri diod** töötab *pn-siirde* läbilöögi režiimis, kus juba väga väike vastupinge muutus tekitab vastuvoolu suure muutuse. Diodile rakenduv pinge on voolutugevuse muutusele negatiivselt tagasisidestatud – voolutugevuse kasvuga kaasneb otsekohe pinge vähenemine. Seetõttu stabilitron stabiliseerib pinget, säilitades ühte kindlat ette antud pinge väärtust.

**Varikap** (ingl *variable capacity*) on *pn-siirde* omadustel põhinev muudetava mahtuvusega *kondensaator*, mille kateteks on p- või n- piirkonna *dopeeritud* (hästi juhtiv) pooljuhtmaterjal. Siirde päripingestamisel õheneb vabadest laengukandjatest vaesunud ala, mis täidab katetevahelise dielektriku rolli. Selle tulemusena katete vahekaugus väheneb ja seadme mahtuvus suureneb (vt *plaatkondensaator*). Analooiliselt kutsub siirde vastupingestamine esile vaegala paksenemise ning mahtuvuse vähenemise.

**Bipolaartransistor** on pooljuhtseade, mis sisaldab kahte pn-siiret. Need eraldavad omavahel kolme piirkonda, mida nimetatakse vastavalt **emitteriks**, **baasiks** ja **kollektoriks**. Emitter ja kollektor on ühesuguse juhtivusega, baas aga õhuke teistsuguse juhtivusega piirkond nende vahel. Vastavalt saab bipolaartransistor olla kas **pn**- või **npn**-transistor. Emitteri ja baasi vaheline pn-siire on tööolukorras päripingestatud (takistus väike), baasi ja kollektori vaheline siire aga vastupingestatud (takistus suur). Baasivoolu ehk emitter-baas siirdes kulgeva voolu suurenemise tulemusena tungivad emitteri enamuse-laengukandjad baasi ja baas minetab ajutiselt oma emitterist ja kollektorist erineva juhtivustüübi. Selle tulemusena baas-kollektor-siire avaneb ja tekib kollektorivool, mis on reeglina palju tugevam baasivoolust. Bipolaartransistor on vooluga juhitav seade sest baasivool on transistori tööks olemuslikult vajalik. Teadmised bipolaartransistori kohta on eelkõige ajaloolise väärtusega, sest kogu kaasaegne elektroonika baseerub väljatransistoride (eelkõige MOP-transistoride) ja nende baasil moodustatud operatsioonvõimendite rakendamisel.

**Kiip** (ingl *chip*) ehk integraallülitus on seade, mis koosneb paljudest ühel ja samal pooljuhitükil (nn. “kivil”) paiknevatest pn-siiretest, takistitest ja kondensaatoritest (seetõttu nimetatakse ka kiipi ennast elektroonikute erialaslangis sageli “kiviks”). Kiipide valmistamisel kasutatakse planaartehnoloogiat: puhtast pooljuhist (enamasti ränist) alusplaat (nn. *wafer*) kaetakse mingi metalli kui *juhi* ja sellesama metalli oksiidi kui *dielektriku* (mittejuhi) – kihtidega. Kõikide skeemidetallide paiknemine ühel ja selleksama alusplaadil tagab nende ühesuguse temperatuuri.

**Väljatransistor** (ingl FET – *field effect transistor*) on transistor, mis sisaldab ainult ühte, kindla juhtivustüübiga pikerguse pooljuhitüki keskel paiknevat *pn-siiret*. See siire lahutab transistori põhiosast teistsuguse juhtivustüübiga osa, mida nimetatakse **paisuks** (ingl *gate*). Vool transistori põhiosas kulgeb **lättest** (*source*) **neelu** (*drain*) poole. Paisusiirde vastupingestamise teel saab tekitada pooljuhitüki keskel laengukandjatest vaesunud ala ning seeläbi katkestada ühendus pooljuhitüki otste (lätte ja neelu) vahel. Seda nimetatakse väljatransistori sulgumiseks. Paisusiirde päripingestamisel väljatransistor avaneb. Väljatransistor on elektriväljaga (siit ka nimi!) juhitav seade, sest vool paisusiirdes pole transistori tööks vajalik ja on koguni ebasoovitav.

**MOP-transistor** (metall-oksiid-pooljuht-transistor, ingl *MOSFET – Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor*) on väljatransistor, mille **paisuks** (*gate*) on metallelektrood. See asetseb dielektriku (enamasti oksiidi) kihiga isoleeritult mingi kindla juhtivustüübiga pooljuhtplaadil, mille otstes paiknevad teistsuguse juhtivustüübiga piirkonnad: **lätte** (*source*) ja **neel** (*drain*). Kui näiteks MOP-transistori alusplaat (*substrate*) on p-juhtiv, lätte ja neel aga n-juhtivad, siis antakse transistori avamiseks paisule aluse suhtes positiivne pinge. Positiivne paisuelektrood tõmbab aluse vähemuse-laengukandjad (konkreetselt elektronid) paisulähedasse piirkonda, tekitades nii n-juhtiva lätte ja neelu vahel ajutiselt n-juhtiva kanali. MOP-transistori paisu isoleeriv oksiidikiht peab olema võimalikult suure dielektrilise läbitavusega ja õhuke, et vastava kondensaatori mahtuvus ja seega kanalis indutseeritud laeng oleksid suured. Samas ei tohi see kiht olla juhtiv. Arvutikomponendid (protsessorid ja muutmälud) koosnevad pea eranditult MOP-transistoridest.

**Alaldi** on seade, mis muudab vahelduvvoolu alalisvooluks. Poolperioodalaldi toimib juba üksainus pooljuhtdiod, mis laseb läbi alaldatava vahelduvvoolu ainult positiivset poolperioodi (negatiivne lõigatakse lihtsalt ära). Reeglina on kaasaegne alaldi siiski täisperioodalaldi, mis muudab voolu suuna negatiivses poolperioodis vastupidiseks ja sisaldab kahte diodi või sildskeemi lülitatud nelja diodi. Diodide poolt tekitatud pulseerivat alalisvoolu silutakse kondensaatorite abil (kasutatakse RC-filtreid).

**AC/DC adapter** on seade, mis muudab elektrienergia jaotusvõrgu vahelduvpinge (Euroopas 230 V, 50 Hz) pooljuhtseadmetele sobivaks kuni 12 V alalispingeks. Adapter sisaldab pinget langetavat trafot, mille sekundaarahelas paikneb alaldi. Adapteri trafo primaarmähis sisaldab väga palju keerdusid ning see valmistatakse reeglina nii peenikesest traadist, et sekundaari lühistamisel primaarmähis veel maha ei põleks. Primaarmähise suur takistus parandab ka toiteallika sobitust koormusega, kuna pinget langetaval trafol ülekandearv  $a \gg 1$  ja seega peegel-impedants  $Z_p \approx a^2 Z_k$  osutub suureks.

**Kolmefaasiline vool** on vahelduvvool, mille korral kasutatakse kolme faasijuhtmet ning Maa potentsiaalil paiknevat neutraali. Neutraali suhtes mõõdetavad pinged faasijuhtmetes on omavahel ajas nihutatud 1/3 võnkeperioodi võrra. Sellele vastab faasinihe  $2\pi/3$  radiaani ehk 120 kraadi. Faasijuhtmed on kolmefaasilises generaatoris, asünkroonmootoris või trafos ühendatud kas täht- või kolmnurklülitusse. Neljajuhtmelise tähtlülituse (*four wire wye*) korral on neutraal (“nulljuhe”) ühendatud “tähe” keskpunkti, seadme faasimähised paiknevad “tähe” otste ja keskpunkti vahel.