

## Alalisvool elektrialhelates. Põhimõisted.

**Elektrialhel** (*electric circuit*) on *elektrivoolu* juhtiv süsteem, mis koosneb vooluallikatest/pingeallikatest, tarvititest ja ühendusjuhtmetest. Allikad ja tarvitid võivad olla elektrialhelasse ühendatud jadamisi (järjestikku) või rööbiti (paralleelselt).

**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 vabade laengukandjate suunatud liikumine. **Voolu** (kokkuleppeliseks) **suunaks** on positiivsete laengukandjate liikumise suund (vooluringis plussilt miinusele). Elektrinähtuste kirjeldamisel ei ole üldreeglina tähtis, kumma märgiga 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  $10^{14} \Omega \cdot \text{m}$ ). Iga dielektrikut iseloomustab labilöögi-väljatugevus. See on niisuguse elektrivälja tugevus, mille korral dielektrikus tekib elektrivool. Kuival õhul on see  $3 \cdot 10^6 \text{ V/m} = 3 \text{ kV/mm}$ .

**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  $10^3 \Omega \cdot \text{m}$ , lisandeid sisaldavas pooljuhis aga alla  $10^{-3} \Omega \cdot \text{m}$ .

**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 elektriväli 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).

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

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

**Takistus**  $R$  (resistance) 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  $\rho$ :  $R = \rho l / S$ . Võrdeteguriks Ohmi seaduses pinge kui põhjuse (argumendi) ja voolutugevuse kui tagajärje (funktsiooni) vahel on mitte juhi takistus vaid tema pöördväärtus, mida nimetatakse **juhtivuseks** (conductance).

**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 ( $1 \Omega \cdot \text{m}$ ). 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).

**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.

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

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

**Takistuse tekkemehhanism**: kõigi heade elektrijuhtide takistuse temperatuuritegurid on ca  $0,005 (^\circ\text{C})^{-1}$ . 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.

**Kahe takisti** (takistustega  $R_1$  ja  $R_2$ ) **rööpühenduse kogutakistus** on takistuste korrutis jagatud nende summaga:  $R_r = R_1 \cdot R_2 / (R_1 + R_2)$ . Kui tegemist on rohkem kui kahe rööpharuga, siis on mõtet seda valemit rakendada korduvalt.

**Muudetav takisti** (variable resistor) on seade, mille takistust muudetakse juhi efektiivse pikkuse muutmise teel. Tuntuimad näited sellisest seadmest 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 pinge-jagurina, 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".

**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). Kõik pn-siirdeid sisaldavad pooljuhtseadmed on 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  $\mathcal{E} = I R + I r$ , voolutugevus ahelas on võrdeline elektromotoorjõuga ja pöördvõrdeline kogutakistusega (välistakistuse  $R$  ja sisetakistuse  $r$  summaga).

**Elektromotoorjõud** (EMJ, ingl *electromotive force, EMF*, tähis  $\mathcal{E}$ , loe: ümmargune E) on suurim pinge, mida antud (voolu-)allikas on üldse suuteline tekitama (pinge väljalülitatud olukorras, *off-switched voltage*). EMJ nimetatakse mõnikord ka tühipingeks või allikapingeks. 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).

**Allika sisetakistus** (ingl *internal resistance*)  $r$  iseloomustab allika sees laengukandjate suunatud liikumist pidurdavate jõudude toimet. Pinge sisetakistusel  $U_s = I r$  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.

**Allikas** (*source*) [ka: vooluallikas või pingeallikas] on seade, mis muundab mitteelektriliste jõudude ehk kõrvaljõudude energiat elektrienergiaks. Elektrijõud saab erimärgilisi laenguid viia ainult kokku. Kõrvaljõud aga viivad neid lahku (tekitavad allika 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 energiaks.

**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 ja laetavateks.

**Mittelaetavas allikas** (*primary cell or source*) 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 soola. Tsink lahkub soola koostisesse ioonina  $Zn^{2+}$ , jättes oma elektronid kesta maha. Selle tagajärjel laadub kesta negatiivselt ning silindri teljel paiknev elektrood positiivselt. Veel kasutatakse mangaanleelismetalli (*manganese-alkaline*), tsink-kloriid (*zinc-chloride*) ja hõbe-oksiid (*silver-oxide*) elemente. Liitium-element (*lithium cell*) omab EMJ väärtust ca 3 V ja see püsib pikaajaliselt konstantsena.

**Laetava keemilise allika** (*secondary source*) 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 ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) vesilahuses paiknevateks negatiivseteks elektrodideks on plii (Pb) koosnevad plaadid, positiivseteks elektrodideks aga plii-dioksiidid ( $\text{PbO}_2$ ) plaadid. Happeaku töö põhineb plii lahkumisel negatiivselt elektrodilt ionina  $\text{Pb}^{4+}$ , 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*, EMJ 3,6 V) tüüpi laetavaid allikaid. Just liitium-ioon-elemente eelistatakse laptop-arvutite ja mobiiltelefonide akudes.

**Akumulaator** ehk **aku** on *laetav keemiline allikas*. Aku võimaldab elektrienergiat ajutiselt muundada keemilise sideme energiaks (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  $I_l = \varepsilon / r$ . 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 toimel juhis 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.  $1 \text{ kW} \cdot \text{h} = 1000 \text{ W} \cdot 3600 \text{ s} = 3,6 \text{ MJ}$ .

**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 reaalselt 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 konkreetse 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 allika 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  $10\ \Omega$ . Analoogiliselt võib ka mitut pingeallikat asendada üheainsa ekvivalentse allikaga.

**Allikate jadaühendusel** tekkiva ekvivalentallika EMJ on üksikute allikate elektromotoorjõudude summa:  $\mathcal{E}_j = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \dots$  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  $\mathcal{E}_n$  ja sisetakistus  $r_n$  kujul  $\mathcal{E}_n = n \mathcal{E}_1$  ja  $r_n = n r_1$ , kus  $\mathcal{E}_1$  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 elektrilaengu 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.

**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 üksühelt 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**: Vaatluseluses 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 summaks 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 (oletus oli väär).

**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 tekiksid siis, 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 klemmiping on konstantne ja võrdub allika elektromotoorjõuga. Mistahes reaalsel allikat ( $r \neq 0$ ) 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 allikat ( $r \neq 0$ ) 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.

**Norton'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 elektriabehela 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 takistustumõõturi 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.

**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 kaks-klemmidest. 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  $R_Z = (R_A R_B + R_B R_C + R_C R_A) / R_C$ .

**Sõlmpotentsiaalide meetod** (*nodal analysis*) seisneb Kirchhoffi vooluseaduse rakendamises viisil, kus ahela ühe sõlme potentsiaal defineeritakse nulliks ja teiste sõlmede potentsiaalid  $\varphi_i$  esitatakse pingetena  $U_i$  nullsõlme 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 supersõlmene (*supernode*).

**Kontuurvoolude meetod** (*mesh analysis*) seisneb Kirchhoffi pingeseaduse rakendamises viisil, kus hargnev ahel jagatakse vähimateks võimalikeks kontuurideks või võrgusilmadeks (*mesh*). Allikad esitatakse pinge-generaatoritena. 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 algebriline 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).