

I peatükk

1. Elektriahelate elemendid ja põhilised omadused

1.1 Põhimõisted elektriahelatest (EA)

Elektriahelaks nimetame (kokkuleppeliselt) sellist seadiste ja elementide terviklikku kogumit, mis on ette nähtud elektrivoolu läbilaskmiseks. Üldjuhul koosneb elektriahel energiaallikatest, muunduritest, tarbijatest ja neid kõiki ühendavatest juhtmetest, mis ühendatuna moodustavad suletud tee elektrivoolule.

Elektriahelaid kasutatakse elektrienergia jaotamiseks, aga samuti elektrienergia muundamiseks mõneks teiseks energialiigiks või vastupidi.

Energiaallikates (galvaanielemendid, akumulaatorid, elektromehaanilised generaatorid, MHD-generaatorid jne) saadakse elektrienergiat teiste energialiikide muundamise teel (keemiline, mehaaniline, soojuslik jne).

Elektrienergia allikat iseloomustatakse **elektromotoorjõu** (emj) või **vooluallika** suuruse ja suunaga ning sisetakistuse või -juhtivuse suurusega. Energiaallikad on elektriahela **aktiivsed** elemendid.

Elektritarbijates toimub vastupidine protsess – elektrienergia muundatakse teisteks energialiikideks (elektrilambid, -soojendusriistad, -mootorid jne). Tarbijad on elektriahela **passiivsed** elemendid.

Tarbijaid grupeerides jaotame need vastavalt nende tarbitava energialiigi iseloomule resistiivseteks, induktiivseteks ja mahtuvuslikeks elementideks.

Linearseks nimetame sellist elektriahelat, mille kõikide elementide parameetrid on sõltumatud pingest ja voolust. Vastupidisel juhul, kui kasvõi ühe ahela elemendi parameetrid sõltuvad pinge u või voolu i suurusest, on ahel **mittelineaarne**.

Elektrilisi protsesse igas elektrotehnilises seadmes iseloomustatakse mõningate elektriliste suuruste kaudu. **Põhisuurusteks** on elektrivool i , elektriline potentsiaal φ , elektriline pinge u , aga samuti energeetilised suurused.

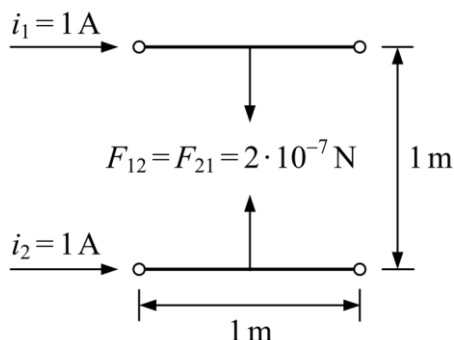
Elektrivool – see on elektrilaengute suunatud liikumine elektriahelas. Voolu **suuna** all mõistame **positiivsete** laengute liikumissuunda. **Voolutugevus** on määratud elektrilaengute hulga, mis voolavad läbi ahela ristlõike ajaühikus:

$$i = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{dq}{dt}. \quad (1.1)$$

Seega, elektrivool i kujutab endast elektrilaengu muutumise kiirust ajas. Ühikud SI-süsteemis:

$$q [\text{C}]; t [\text{s}]; i [\text{A}].$$

Siin vool i on **skalaarsuurus**.



Voolu ühikut **1 A** defineeritakse jõu kaudu – kui **1 m** pikkust ja **1 m** vahekaugusega juhtme paari läbib vool **1 A**, siis tekib juhtmete vahel jõud $F = 2 \cdot 10^{-7} \text{ N}$.

Joonis 1.1. Vooluühiku iseloomustamine vooluga juhtmete vahelise jõu kaudu.

Elektripotentsiaal EA mingis punktis on suurus, mis iseloomustab selles punktis asuva **laengu q potentsiaalset energiat W** selle laengu väärtuse suhtes:

$$\varphi = W/q. \quad (1.2)$$

Laengu potentsiaalne energia – see on energia, mille laeng q kulutaks antud EA punktist sellisesse punkti minekuks, kus potentsiaal on 0. Elektrotehnikas on selliseks EA punktiks maandussõlm. Ühikud SI-süsteemis

$$\varphi [\text{V}]; \quad W [\text{J}].$$

Elektriline pinge u EA kahe punkti vahel on võrdne nende punktide potentsiaalide erinevusega (vahega)

$$u_{12} = \varphi_1 - \varphi_2. \quad (1.3)$$

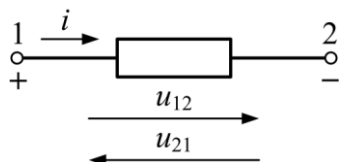
Kui see **pinge** tekib voolu läbiminekuks vaadeldavate ahelapunktide vahel asuvatest EA elementidest, siis seda nimetatakse ka **pingelanguks**. Pinge ja pingelangu ühik SI-süsteemis: $u [\text{V}]$.

Elektripinge ja vool võivad olla alalise või vahelduva iseloomuga. **Alalisvool ja -pinge** on ajast sõltumata väärtusega $U = U = \text{const}$ ja $i = I = \text{const}$.

Vahelduvvoolu ja -pinget sõltuvana ajast iseloomustatakse funktsioonidega $u(t)$ ja $i(t)$. **Siinusvool ja -pinge** on erijuhtum vahelduvvoolust ja -pingest

$$u(t) = U_m \sin(\omega t + \psi_u).$$

Voolu ja pinge üheseks määratlemiseks märgi poolest toimitakse nii, et jälgitakse nende omavahelist suunda ja vastavust noolega märgitud oodatavale suunale (need on skalaarsuurused, märk "+" või "-"). Märk omab mõtet siis, kui tegelikku voolu või pinge suunda võrrelda ettevalitud (nn arvutusliku) suunaga.



Joon 1.2. Pinge ja voolu arvutuslike suundade valik ja tähistamine.

EA lõigul punktide 1 ja 2 vahel antakse ühele punktile tinglikult "+"-polaarsus, teisele "-"-polaarsus. Siis voolu suund on p. 1 $\rightarrow$ p. 2. Siinjuures pinge (või pingelangu) märk sõltub vaatlussuunast:

$$u_{12} = \varphi_1 - \varphi_2;$$

$$u_{21} = \varphi_2 - \varphi_1 = -(\varphi_1 - \varphi_2) = -u_{12}.$$

Soovitav on valida nii pinge kui ka voolu suund ühesugune, see väldib vigu arvutustes. Kuid suunad võivad olla ka erinevad (i ja u_{21}).

Elektrilisi protsesse elektrialais iseloomustavad ka energeetilised suurused. Näiteks joon. 1.1 vastavalt toimigu punktide 1 ja 2 vahel pinge $u = u(t)$. Siis elementaarlaengu dq ($dq \rightarrow 0$) viimiseks punktist 1 punkti 2 tehakse elementaartööd ehk kulutatakse energiat dW , mis on määratav seoste (1.2) ja (1.3) kaudu:

$$dW = u_{12}dq = u dq = u i dt. \quad (1.4)$$

Sellest avaldisest, kasutades ka avaldist (1.1), määrame **kogu ahelas kulutatud energia** kuni vaatlus- hetkeni t , kui ahelas vool avaldub $i = i(t)$ ja tekib pinge $u = u(t)$ toimetel:

$$\omega = \omega(t) = \int_{-\infty}^t u dq = \int_{-\infty}^t u i dt = \int_{-\infty}^t p dt. \quad (1.5)$$

Siin on energia muutuse kiirus

$$p = p(t) = \frac{dW(t)}{dt} = u \cdot i \quad (1.6)$$

hetkvõimsus, mida kulutatakse elektriahelas, kui sealt pinge u toimel läheb läbi vool i . Võimsuse ühik SI-süsteemis: p [W].

Siinjuures elektriahela vool i ja pinge u võivad ajafunktsioonina olla suvalise kujuga. Erijuhtumil on u ja i alalisuurused või perioodilised suurused.

Integreerimisel summeeritakse kogu energiamuutuse protsess alates ajamomendist $t = -\infty$, mil energia loeti võrdseks nulliga ($W_{t=-\infty} = 0$).

Võimsus p on algebraline suurus, märgiga "+" või "-". Kui voolu ja pinge suunad langevad kokku, siis "+" (energiatarbimine, $p > 0$), kui u ja i suunad erinevad, on märk "-" (ahelalõik toimib energiaallikana).

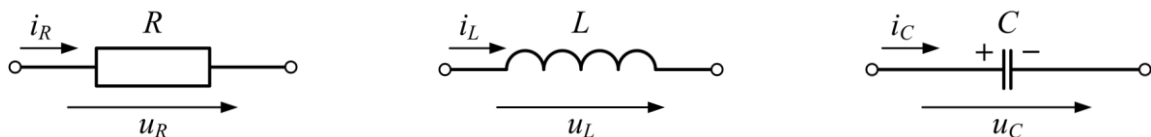
1.1.2 Elektriahela elemendid

Füüsikast on teada, et **elektrivool** on lahutamatus seoses magnet- ja elektriväljaga, s.o elektromagnetilise väljaga. Voolu muutumisel ajas ka see väli muutub ajas. **Magnetvälja** muutumine tekitab EA kontuurides emj-d, **elektrivälja** muutumisega kaasneb EA juhtmetes laengute muutumine. Juhtivelementides, aga sageli ka neid ümbritsevas keskkonnas muundub elektrimagnetilise välja energia **soojuseks**. Mitmesugustes seadmetes (tarbijates) elektromagnetvälja energia muundub teisteks energialiikideks (mehaaniline, keemiline). Osa elektromagnetvälja energiast võib kiirguda elektriahelast välja. Vaadeldava EA piires pole ühtki lõiku, kus need nähtused aset ei leiaks.

Praktikas esinevad enamasti **jaotatud parameetritega elektriahelad**. Sellepärast **täpne** protsesside analüüs EA-s on üsna keeruline ja nõuab elektrimagnetilise välja teooria kasutamist.

Et **lihtsustada reaalses** EA-s toimuvate protsesside uurimist, asendatakse see ideaalse EA-ga või arvutusskeemiga. Selline idealiseeritud elektriahel koosneb üksikutest elementidest, millest igaüks arvestab ainult **üht** külge ahelas **reaalselt** toimivatest elektromagnetilistest protsessidest.

Sellisteks passiivseteks EA elementideks on: resistiivne element ehk takisti **R**, induktiivne element ehk induktiivsus **L**, mahtuvuslik element ehk mahtuvus **C**. Nende tinglik tähistamine elektriahela skeemis on näidatud joonisel 1.3.



Joonis 1.3. Elektriahela passiivsed elemendid.

Resistiivne element R ehk aktiivtakisti – see on idealiseeritud element, milles toimub pöördumatult elektromagnetilise energia muundumine soojuslikuks energiaks. R asendab ligikaudselt reostaate, süsitakisteid, hõõglampe.

EA elemente iseloomustab nende volt-amperkarakteristik, s.o pinge sõltuvus voolust, mis on määratud Ohmi seadusega

$$u = R \cdot i, \quad (1.7)$$

$$i = G \cdot u. \quad (1.7a)$$

Siit resistiivset elementi iseloomustav suurus on **elektriline takistus**

$$R = \frac{u}{i}, \quad (1.8)$$

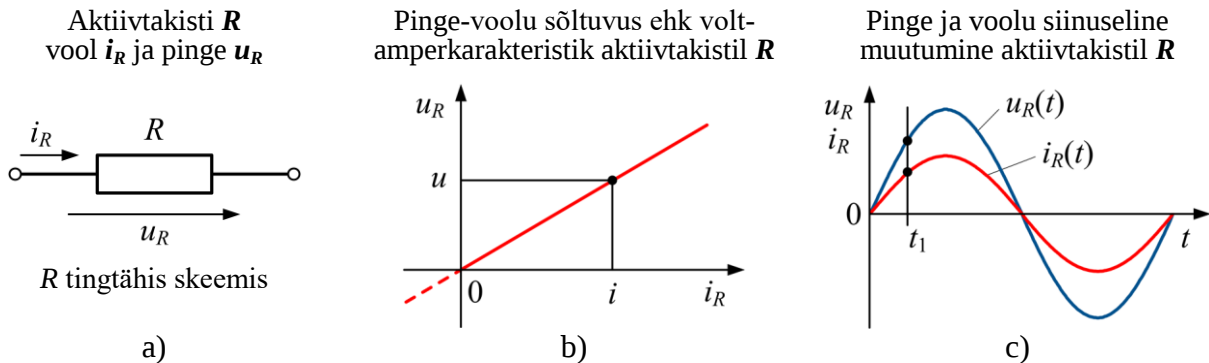
selle pöördsuuruseks on **elektrijuhtivus**

$$G = \frac{i}{u} = \frac{1}{R}. \quad (1.9)$$

Lineaarsetes ahelates

$$R = \frac{1}{G} = \text{const}.$$

Graafiliselt võib seoseid (1.7) ja (1.7a) kujutada sirgena, mis läbib koordinaatide 0-punkti (joon. 1.4b) ja mille tõusutegurit iseloomustab takistus R . Vastavalt ühe suuruse (u või i) ajalise sõltuvuse kujule peab **R korral** teine kõver (i või u) muutuma temaga võrdeliselt (joon. 1.4c).



Joon. 1.4. Elektriavala resistiivne element ehk aktiivtakisti R .

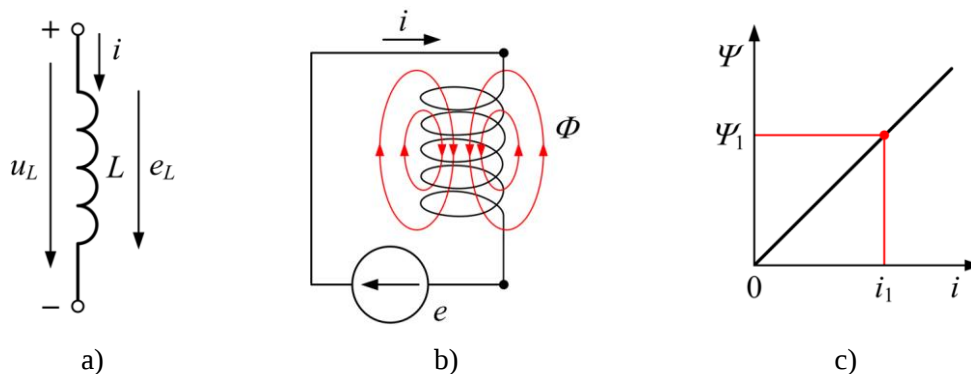
Resistiivsel elemendil eralduv soojuslik energia vastavalt Joule-Lenzi seadusele

$$p = \frac{dW}{dt} = u \cdot i = R \cdot i^2 = G \cdot u^2. \quad (1.10)$$

Matemaatiliselt on näha, et p on ruutfunktsioon i -st või u -st, seega alati $p > 0$ ja energia suundub elektrienergia allikalt resistiivsele elemendile ja seal pöördumatu protsessina eraldub soojusena.

Induktiivne element – selline EA idealiseeritud element, mis arvestab ainult voolu läbimisel $W_L = Li^2/2$ **magnetvälja energia** salvestamine (soojuslikud kaod ja elektrivälja energia salvestamine puuduvad). Tingtähis – joonis 1.5a.

Induktiivsus – nii sellise elemendi nimetus kui ka selle elemendi parameetrist väärtust iseloomustav suurus. **Reaalselt** on sellisele elemendile kõige lähemal induktiivpool, mille traadi resistiivne takistus on suhteliselt väike (jätme traat, hea erijuhtivusega materjal) – joonis 1.5b.



Joon. 1.5. Elektriavala induktiivne element ehk induktiivsus L .

Voolu i läbimisekul induktiivpoolist tekitatakse magnetvoog Φ [Wb], mis moodustab suletud kontuuri ümber teda tekitava juhtme (aheldub juhtmega või juhtmetega) – näitlikult vt joonis 1.5b. Sealjuures magnetvoo joonte arv ümber erinevate juhtmete on erinev. Sellepärast tuuakse sisse magnetilise omainduktsiooni **aheldusvoo** mõiste, mis kujutab endast summat kõigist magnetvoogudest, mis erinevate mähiskeerdudega ahelduvad ja on tekitatud seda mähist läbivast voolust i :

$$\Psi = \sum_{k=1}^N \Phi_k, \quad (1.11)$$

kus N – mähise keerdude arv.

Induktiivsus on võrdeteguriks omainduktsiooni aheldusvoo ja seda tekitanud voolu väärtuse vahel

$$L = \frac{\Psi}{i}. \quad (1.12)$$

Induktiivsuse ühik SI-süsteemis on henri [H].

Induktiivsust loeme ideaalsel juhul konstantseks suuruseks, s.o sõltumatuks ajast ja voolust. Õhk-südamikuga mähispoolide korral on see tõesti peaaegu nii.

Induktiivse elemendi voolu ja pinge vahelise seose saame **elektromagnetilise induktiooni seadusest** – omainduktsiooni aheldusvoo Ψ muutumine tekitab (indutseerib) induktiivsuse klemmide vahel **omainduktsiooni emj**

$$e_L = -\frac{d\Psi}{dt} = -L \frac{di}{dt}. \quad (1.13)$$

Märk “–” iseloomustab ahela elektromagnetilist inertsit, st indutseeritav emj töötab vastu aheldusvoo muutumisele, püüab säilitada magnetvälja energiat muutumatuna. Kui $di/dt > 0$, siis on ka $d\Psi/dt > 0$ ja e_L suund on vastupidine voolu suunale.

Et vool i läbiks induktiivsust L , tuleb talle rakendada pinge

$$u_L = e_L = \frac{d\Psi}{dt} = L \cdot \frac{di}{dt}. \quad (1.14)$$

Siinjuures e_L ja u_L **arvutuslikud** suunad on ühesugused, suuna suhtes tuleb tulemusele võtta vastavalt märk “+” või “–”. Vool läbi induktiivsuse avaldub (1.14) põhjal

$$i = \frac{1}{L} \int u_L dt = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^t u_L dt. \quad (1.15)$$

Integreerimise algthetk $t = -\infty$ alustab uuringut hetkest, kus elektromagnetilised protsessid induktiivsusel polnud veel alanud, tema magnetvälja energia $W_M|_{t=-\infty} = 0$.

Hetkel $t = 0$ oli vool induktiivsusel

$$i(0) = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^0 u_L dt. \quad (1.16)$$

Ajahetkel $t > 0$ avaldub vool seega

$$i = i(0) + \frac{1}{L} \int_0^t u_L dt. \quad (1.17)$$

Induktiivsuse hetkvõimsus avaldub voolu ja pinge hetkväärtuse korrutisena

$$p_L = u_L \cdot i = Li \frac{di}{dt}. \quad (1.18)$$

NB! $0 > p_L > 0$. See on seotud magnetvälja energia suurenemise või vähenemisega. Ajahetkel t on see magnetvälja energia induktiivsusel määratav

$$W_L = \int_{-\infty}^t p_L dt = \int_0^i Li di = \frac{Li^2}{2}. \quad (1.19)$$

Energia induktiivsusel on määratud **voolu i** väärtusega antud hetkel, on võrdeline **voolu ruuduga i^2** ja on seega alati positiivne ($w_L > 0$).

Mahtuvus C on selline idealiseeritud EA element, mis arvestab ainult elektrivälja energiat

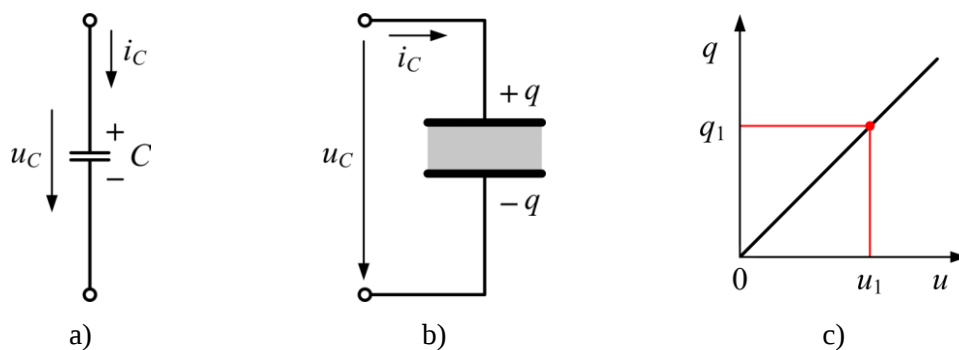
$$W_C = \frac{Cu_C^2}{2}. \quad (1.20)$$

Terminit "mahtuvus" kasutame nii sellise elemendi nimetusena kui ka sellise elemendi parameetriselise väärtuse iseloomustamiseks, s.o laengu q ja pingel u_C suhte väärtusena:

$$C = \frac{q}{u_C}, \quad (q = C \cdot u). \quad (1.21)$$

Kui ühikuteks on laengul q [C] ja pingel u_C [V], siis mahtuvuse ühik C [F]. Sealjuures on laengul ja pingel alati ühesugune märk, sest $C > 0$.

Mahtuvuslik element asendab EA skeemis küllaltki täpselt **lineaarse** volt-amperkarakteristikuga kondensaatorit, millel ka laengu ja kondensaatorile rakendatud pingel sõltuvus on lineaarne (joon. 1.6c). Üldjuhul see karakteristik ei ole alati lineaarne – pingel töstmisel kondensaatori plaatide vahel laeng ei kasva proportsionaalselt (joon. 1.9).



Joon. 1.6. Elektrienergia mahtuvuslik element ehk kondensaator C.

Meie vaatleme järgnevas kursuse osas lineaarseid mahtuvusi. Vaatleme näiteks mahtuvust, mis moodustub kahest rööpselt metallplaadist, mille vahel on dielektrik. Rakendatud pingel u_C mõjul koonduvad plaatidele võrdsed vastasmärgilised laengud $+q$ ja $-q$; kõrgema potentsiaaliga plaat saab "+"-laengu, madalama potentsiaaliga plaat "-"-laengu, $q = C \cdot u_C$.

Kui plaatide vahel pingel muutub, kaasneb sellega plaatide laengute muutus. Plaadile, mille potentsiaal tõuseb, tuleb täiendav "+"-laeng juurde; madalduva potentsiaaliga plaadile **voolab juurde** täiendav "-"-laeng ehk sealt **lahkub** sama suur "+"-laeng.

Vool avaldub laengu muutusena ajaühikus. Seega kondensaatori plaatidega jadamisi ühendatud EA osas tekitab kondensaatori pingemuutus voolu

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du_C}{dt}. \quad (1.22)$$

Mahtuvusliku elemendi külge ühendatud **juhtivate elementide** jaoks on see **juhtivusvool**, aga kondensaatori plaatide vahelise **dielektriku seisukohalt** on see kondensaatori dielektriku nihkevool.

Elektrinihkevoolu mõistet kasutatakse tavaliselt väljateoorias, kus see kirjeldab suurust, mis on võrdeline elektrivälja tugevuse muutumise kiirusega. Nihkevoolu ühikuks nagu juhtivusvoolulgi on amper [A]. Tänu nihkevoolu mõiste sissetoomisele moodustub voolu jaoks läbi mahtuvuse ja temaga jadamisi töötavate elementide suletud kontuur, vooluahel sulgub läbi dielektriku.

Pingel mahtuvusel u_C avaldub (1.22) põhjal

$$u_C = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i dt = u_C(0) + \frac{1}{C} \int_0^t i dt, \quad (1.23)$$

kus $u_C(0) = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^0 i dt$ on mahtuvuse algpinge hetkel $t = 0$.

Seega mahtuvuse pinge ajavahemikul $0 \rightarrow t$

$$u_C = \frac{1}{C} \int_0^t i dt$$

on määratud **pindalaga**, mis on piiratud selles ajavahemikus voolu i kõveraga.

Mahtuvuse hetkvõimsus avaldub

$$p_C = u_C i = C u_C \frac{du_C}{dt}. \quad (1.24)$$

Hetkvõimsus on seotud mahtuvusel **elektrivälja energia** salvestumise või vähenemisega, seega **elektrilaengu** salvestumisega või vähenemisega.

Kui laeng kondensaatori plaatidel kasvab, on vool ahelas positiivne ja mahtuvuse energia kasvab välisahela energia arvel. Kui aga laeng plaatidel väheneb, seega vool ahelas on negatiivne, siis antakse mahtuvuselt varem salvestatud elektrivälja energia tagasi välisahelasse.

Olgu kondensaatorile rakendatud pinge u_C . Siis elektrivälja energia mingil ajahetkel on määratav valemiga

$$W_C = \int_{-\infty}^0 p_C dt = \int_0^{u_C} C u_C du_C = \frac{C u_C^2}{2}.$$

Siinjuures on arvestatud, et algpinge kondensaatoril hetkel $t = -\infty$ oli 0, s.o $u_C(-\infty) = 0$.

1.2.1 Reaalsete elektrotehniliste seadmete asendamine ideaalelementidest koosneva elektriabelaga

Ettekujutus resistiivsetest, induktiivsetest ja mahtuvuslikest elektriabelade ideaalelementidest põhineb eeldusel, et aktiivvõimsuskao, magnet- ja elektrivälja energiad on koondunud vastavatele üksik-elementidele ahelas. Need ahela elemendid asuvad ja toimivad üksteisest sõltumatult.

Paljude reaalsete elektriabelate korral võib sellise eelduse teha, sest **magnet-** ja **elektrivälja** energia on koondatud eraldiasuvatele ahelaosadele. Näiteks kondensaatorite osas on **esmatähtis** ja iseloomulik neis salvestuv elektrivälja energia. Induktiivpoolidel aga on magnetvälja energia domineeriv ja oluline on arvestada nähtusi, mis võivad tekkida magnetvälja muutumise tulemusena. Samuti on tihti elektromagnetvälja energia muundamine soojuseks koondatud ahela ühele või mõnele elemendile.

Reaalset reostaati iseloomustab põhiliselt tema resistiivne takistus R , millel elektromagnetvälja energia muundub soojuseks. Kuid peale aktiivtakistuse iseloomustab reostaati teatud **induktiivsus**, aga ka mõningane keerdudevaheline **mahtuvus**. Täpsel analüüsil peaks neid arvestama.

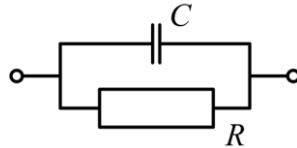
Kui aga vool reostaadis muutub ajas küllalt aeglaselt (madal sagedus), siis omainduktsiooni elektromotoorjõud reostaadis on **tähtsusetult väike** võrreldes toitepingega, seda võib mitte arvestada. Kaduvvähikesed on nihkevoolud dielektrikus mähisekeerdude vahel, ka need võib kõrvale jätta. Nii võimegi võtta **reostaadi matemaatilise mudeli** jaoks eelduseks idealiseeritud parameetrid suuruselt vastavalt $L = 0$, $C = 0$ ja $R \neq 0$.

Realse induktiivpooli korral võime samuti keerdudevahelises dielektrikus nihkevoolud kõrvale jätta, kui voolu muutumise kiirus pole eriti kõrge (mitte kõrgel sagedusel), seega me ei arvesta keerdudevahelise mahtuvuse mõju.

Samal ajal kui sagedus on suhteliselt kõrge, siis võime pingelangu pooli aktiivtakistusel ($u_R = R \cdot i$) lugeda palju väiksemaks induktiivsusel indutseeritavast emj-st $e_L = -L di/dt$, st lugeda pooli

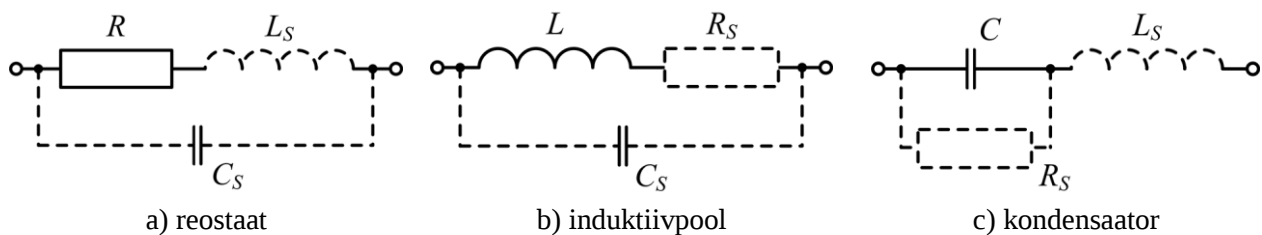
aktiivtakistuse võrdseks nulliga (ülijuhtiv pool). Madalatel sagedustel võib ka arvestada aktiivtakistust, ühendades aseskeemis ideaalse induktiivsusega L , millel aktiivtakistus puudub, jadamisi reostaadi, mille takistus võrdub reaalse induktiivpooli aktiivtakistusega.

Realse kondensaatori korral võib küllalt kõrge sageduseni mitte arvestada tema induktiivsusega L ja arvestada ainult tema mahtuvust C . Kondensaatori dielektrikukihis võivad selle kihi mõningase juhtivuse tõttu tekkida soojuslikud energiakaod, mis kasvavad sageduse tõustes. Soojuskadude arvestamiseks võib aseskeemi sisse tuua aktiivtakistuse R rööbiti mahtuvusega C :

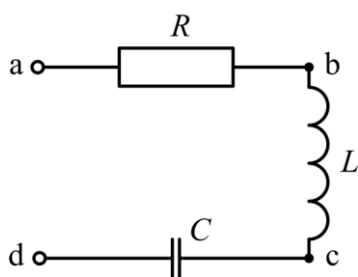


Nii võime tavaliste sageduste korral enamasti vaadelda piisava täpsusega analüüsi tegemiseks **reostaati**, **induktiivpooli** ja **kondensaatorit** ideaalsete elementidena parameetritega vastavalt R , L ja C . Kuid mõnel juhul tuleb arvestada ka nende seadmete kõrvalomadusi kajastavate parameetritega (parasiitparameetritega), näiteks eriti madalatel või kõrgetel sagedustel, peenest traadist paljude keerdudega induktiivpooli korral jne.

Vastavalt antud seadme konstruktsiooni omapärale ja toimiva elektromagnetilise välja sõltuvusele sagedusest, aga ka konstruktsioonist ja geomeetristest mõõtmetest, võib **reaalset reostaati**, **induktiivpooli** ja **kondensaatorit** kujutada matemaatiliste mudelitena, mida iseloomustavad põhi- ja parasiitparameetrid (indeksiga S), vt joonis 1.7.



Joonis 1.7. Elektriahela reaalse elementide põhi- ja parasiitparameetrid.



Joonis 1.8. Koondparameetriline R , L ja C jadaahela skeem.

Vaatleme jadaahelat, mis koosneb reostaadist, induktiivpoolist ja kondensaatorist (joonis 1.8). Siin võime eeldada, et **elektromagnetilise välja energia** muundamine **soojusenergiaks** toimub **ainult reostaadis** (lõigul ab), **magnetväli** indutseerib emf ainult induktiivsusel (lõigul bc) ja **elektriväli** ning nihkevoolud esinevad ainult kondensaatoris.

Sellise eeldusega me koondame kogu aktiivtakistuse R elektriahela aseskeemis lõigule ab , induktiivsuse L järgmisele lõigule bc ja mahtuvuse ahela lõpuossa lõigule cd . Niisuguseid elektriahelaid, kus me saame parameetrid R , L ja C selliselt ahela eraldiasuvatele lõikudele koondada, nimetatakse **koondparameetritega** elektriahelateks.

Koondparameetritega elektriahelate hulka võime lugeda kõik tavalised elektriahelad alalisvoolude ning tööstus- ja helisageduste korral, **välja arvatud** pikad **energiaülekande-** ja **sideliinid**.

Selliseid ahelaid, kus iseloomulike parameetrite koondamine üksikutele ahela lõikudele annab suure või märgatava vea ahela arvutamisel ja analüüsil, nimetatakse **hajaparametritega ahelateks** (varem ka jaotatud parameetritega ahelateks). Niisuguseid ahelaid vaatleme ETA kursuse eripeatükis. Mujal vaatleme koondparameetrilisi ahelaid.

Tähtis on omada ettekujutust, milline lihtsustus elektriahela parameetrite määramisel annab väikese ebatäpsuse, milline aga võib põhjustada suure vea. Üks ja sama reaalne ahel käitub erinevalt, kui

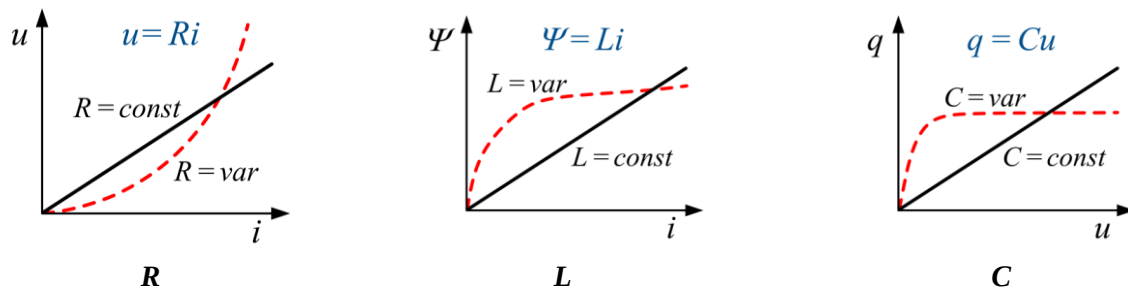
muutub toitepinge **sagedus**. Näiteks alalisvoolu korral tuleb induktiivpooli vaadelda kui skeemi-elementi, mida iseloomustab ainult juhtmematerjali aktiivtakistus R .

Elektriahelat võib vaadelda **koondparameetrilisena** tavaliselt siis, kui elektromagnetilise välja lainetel kulub ahela läbimiseks nii vähe aega, et selle aja vältel on voolud ja pinged muutunud oma väärtuselt väga vähe võrreldes algväärtusega.

1.2.2 Lineaarsed ja mittelineaarsed ahelad

Elektriahela elementide parameetrid R , L ja C on sageli sõltuvuses voolust i ja pingest u . Reostaadi **takistus** R muutub tema materjali temperatuuri muutudes voolu mõjul. Ferromagnetilise südamikuga induktiivpoolide **induktiivsus** L sõltub magnetvälja tugevusest südamikus, see tähendab mähist läbivast voolust. Mõnda liiki kondensaatorite **mahtuvus** C sõltub elektrivälja tugevusest dielektriku kihis, st kondensaatorile rakendatud pingest.

Paljudel juhtudel avalduvad need sõltuvused väga nõrgalt, nii et neid võib mitte arvestada, lugedes parameetrid R , L ja C konstantseteks – sõltumatuteks u ja i väärtustest. Sellisel juhul on elektriahela elementide karakteristikud $u = f_1(i)$, $\Psi = f_2(i)$ ja $q = f_3(u)$ diagrammil kujutatavad sirgjoontena, vt joonis 1.9.



Joonis 1.9. Elektriahela koondparameetriliste elementide R , L ja C lineaarsed ja mittelineaarsed karakteristikud.

Selliste karakteristikutega elemente elektriahelas nimetame **lineaarseteks**, ainult neist koosnevaid elektriahelaid samuti lineaarseteks.

Kui aga elektriahela elementide parameetrid on sõltuvad u või i väärtusest, seega karakteristikud on kõverjoonelised, nimetame neid elemente **mittelineaarseteks**. Kui elektriahelas on kasvõi üks selline element, siis nimetame ka seda **ahelat mittelineaarseks**.

1.3 Energiaallikad – pinge- ja vooluallikad

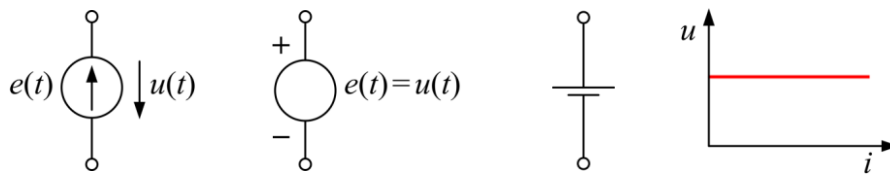
Elektriahelate teoorias kasutatakse kahesuguseid idealiseeritud elektrienergiaallikaid: **emj-allikas** (või pingeallikas) ja **vooluallikas**. Vaatleme nende omadusi.

Elektromotoorjõu(pinge-)allikas kujutab endast sellist idealiseeritud energiaallikat, mille klemmi-pinge on antud teatud ajafunktsioonina $u(t)$ ja ei sõltu ahela voolust, mis läbib allikat; energiaallika sisetakistus võrdub nulliga. Kuna energiaallikal sisetakistus puudub, siis klemmipinge allikal on võrdne tema emj-ga $e(t)$, s.o

$$u(t) = e(t).$$

Sellest ka nimetus – emj- ehk pingeallikas. Ideaalse emj-allika (pingeallika) tingtähis skeemides on näidatud joonisel 1.10. Siinjuures on noolega või polaarsusega "+" ja "-" ära näidatud emj suund või klemmide polaarsus, st potentsiaali kasvamise suund ajahetkedel, mil funktsioon $e(t)$ on positiivse väärtusega.

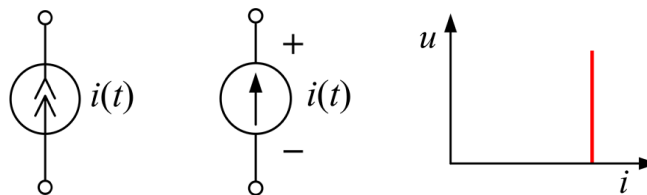
Allika klemmipinge sõltumatust koormusvoolust iseloomustab volt-amperkarakteristik, mis on horisontaalne sirge.



Joonis 1.10. Elektromotoorjõu tähistamine skeemis ja idealiseeritud emj-allika volt-amperkarakteristik.

Vooluallikas on selline idealiseeritud energiaallikas, mille ajafunktsioonina antud vool $i(t)$ ei sõltu tema klemmipingest, aga allika sisetakistus on lõpmatult suur. Vooluallika tingtähis skeemis on näidatud joonisel 1.11. Siin nool allikal või klemmide polaarsus "+" ja "-" näitab voolu positiivset suunda allikal ajahetkel, mil funktsioon $i(t) > 0$.

Vooluallika voolu i sõltumatust pingest u väljendab ka volt-amperkarakteristik, mis kujutab endast vertikaalset sirget:



Joonis 1.11. Ideaalse vooluallika tähistamine skeemis ja volt-amperkarakteristik.

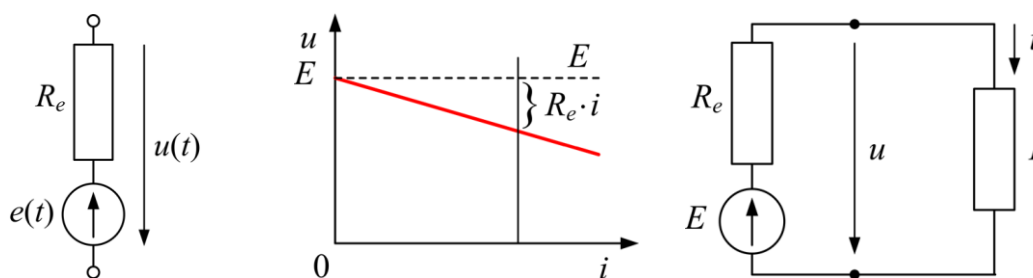
Reaalne energiaallikas, mida iseloomustab teatud emj väärtus $e(t)$ ja sisetakistus R_e , asendatakse arvutusliku aseskeemiga kahel viisil.

1. Emj-allikas jadamisi ühendatud takistusega R_e , mis on võrdne reaalse allika sisetakistusega (joon. 1.12). Allika emj võrdub reaalse allika emj-ga. Reaalse allika klemmipinge $u(t)$ on sõltuv allikat läbivast voolust i ja allika sisetakistusest R_e .

Lihtsaimal juhul, alalis-emj $e(t) = E = \text{const}$ korral avaldub reaalse energiaallika klemmipinge aseskeemi põhjal:

$$u = E - R_e \cdot i, \quad (1.26)$$

millele vastav volt-amperkarakteristik on näidatud joonisel 1.12.



Joonis 1.12. Reaalne sisetakistusega elektromotoorjõud, vastav volt-amperkarakteristik ja elektri ahela skeem koormustakistiga R .

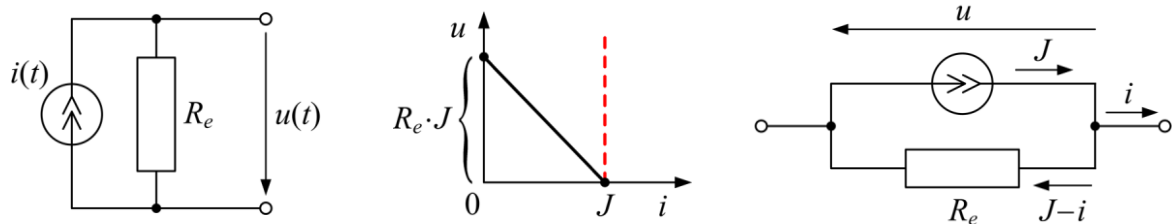
Sõltuvust (1.26) on lihtne saada näiteks lihtsaima ahela korral, mis koosneb reaalsest energiaallikast ja ühest tarbijatakistist R . Kirchoffi II seaduse põhjal (füüsika kursuse põhjal)

$$R_e \cdot i + R \cdot i = E, \quad u = R \cdot i,$$

millest

$$R_e \cdot i + u = E \quad \text{ja} \quad u = E - R_e \cdot i.$$

2. Ideaalne vooluallikas rööbiti ühendatud takistiga R_e , kusjuures R_e võrdub reaalse allika sisetakistusega ja ideaalse vooluallika vool võrdub reaalse energiaallika **lühisvooluga** (joonis 1.13).



Joonis 1.13. Reaalne sisetakistusega (sisejuhtivusega) vooluallikas ja sellele vastav volt-amperkarakteristik.

Jagades avaldise (1.26) suurusega R_e , saame

$$\frac{u}{R_e} = \frac{E}{R_e} - i, \quad (1.27)$$

kust reaalse allika koormusvool avaldub

$$i = \frac{E}{R_e} - \frac{u}{R_e} = \frac{E}{R_e} - \frac{1}{R_e} u$$

või siit

$$i = J - G_e \cdot u. \quad (1.28)$$

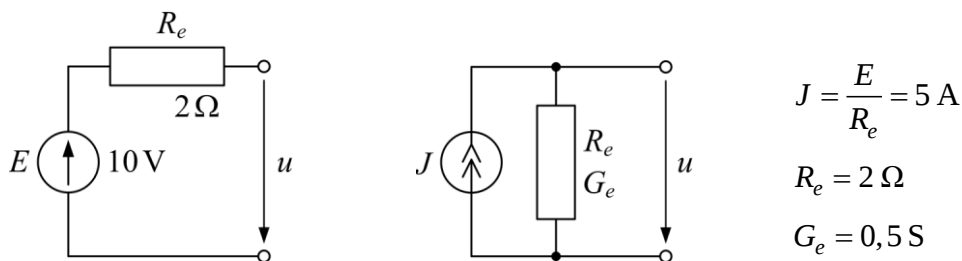
Siinjuures

$$J = \frac{E}{R_e} = G_e \cdot E \quad \text{– reaalse energiaallika lühisvool;}$$

$$G_e = \frac{1}{R_e} \quad \text{– reaalse energiaallika sisejuhtivus;}$$

$$J \quad \text{– ideaalse vooluallika vool.}$$

Avaldisest (1.28) selgub, et ideaalse vooluallika korral $G_e = 0$, s.o $R_e = \infty$ ja $J = E/R_e$.



Joonis 1.14. Sisetakistusega elektromotoorjõu asendamine vooluallikaga ja vastupidine asendus.

Toodud kaks energiaallika aseskeemi on **võrdväärsed**, kuid **ainult välisahela suhtes**. Mõlemad skeemid annavad välisahelasse võrdse voolu i ja ühesuguse võimsuse $p = ui$. Kuid **võimsuskaod sisetakistusele R_e** on erinevad:

$$p_e = R_e \cdot i^2$$

ja

$$p_i = G_e u^2 = \frac{u^2}{R_e}.$$

Sellepärast on erinevad ka **ideaalallikate** poolt arendatavad võimsused:

$$p_E = e \cdot i, \quad p_i = u \cdot i, \quad \text{s.o } p_i > p_e.$$

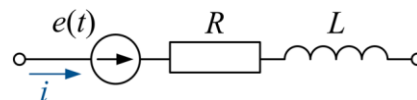
Kui reaalse energiaallika võimsus on piiratud suurus, siis ideaalsete (emj- ja voolu-)allikate võimsus on lõpmatult suur, s.o $p \rightarrow \infty$. See tuleneb nende allikate VA-karakteristikutest. Ideaalsete allikate skeemid on teineteisega asendatavad:

$$E = R_e J; \quad R_e = \frac{E}{J}; \quad J = \frac{E}{R_e}.$$

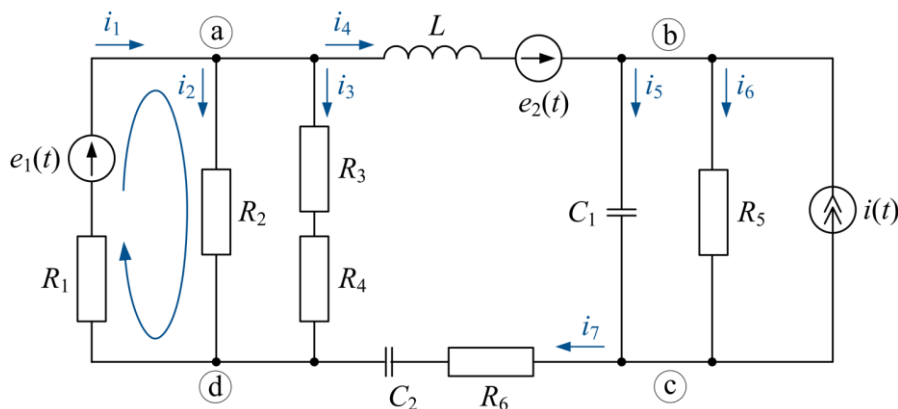
1.4 Elektriահela skeem

Elektriskeem kujutab endast reaalse elektriահela graafilist kujutist. **Elektriskeem** näitab, **kuidas** on omavahel ühendatud elektriահela elemendid. Skeemi "**elektrilised**" elemendid võivad olla **aktiivsed** või **passiivsed**. Elektriskeemi "geomeetrilisteks" elementideks on **harud** ja **sõlmed**.

Haru moodustub ühest või mitmest jadamisi ühendatud ahela elemendist, mida **läbib üks ja seesama vool** (ilma vahepealsete hargnemisteta skeemi osa).



Sõlm on skeemi punkt, millest väljuvad **kolm** või enam haru (joonis 1.15, sõlmed a, b, c, d). Kui väljub **kaks** haru, siis on **lihtsõlm**. Selliseid harusid, mis on ühendatud ühe ja sama sõlmedepaari vahele, nimetatakse **rööpharudeks** (R_2 ja R_3 - R_4).



Joonis 1.15. Elektriահela skeemi näide.

Kontuur on suvaline **suletud** teekond läbi skeemi harude (näiteks läbi elementide $e_1(t) \rightarrow R_2 \rightarrow R_1$). Skeemid võivad olla ühe- või mitmekontuurilised. Kontuuri kirjeldamiseks võrrandiga valitakse kontuuri läbimise suund ja tähistatakse see noolega.

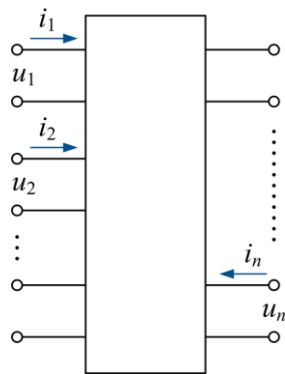
Elektriահela analüüsi eesmärk on **määrata** voolude ja pingete väärtused ahela harudes eeldusel, et **teada on** elektriահela **skeem** ja skeemielementide **parameetrid** ning ahelas toimivate energiaallikate parameetrid.

Kasutatakse ka terminoloogiat, kus **energiaallikate** teadaolevaid pingeid ja voolusid nimetatakse **signaalideks**, aga analüüsi tulemusena **määratavaid** voolusid ja pingeid vastavalt **reaktsioonideks**.

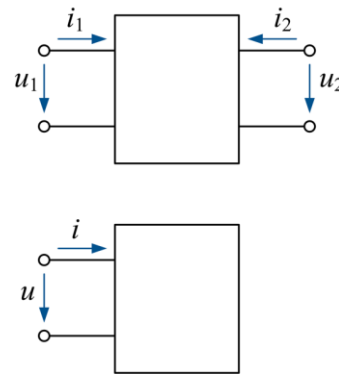
Klemmid (sõlmed või harud), mille **reaktsioone** arvutatakse, on nimetatud **väljundklemmideks**. Need klemmid, mille külge ühendatakse determineeritud energiaallikad, nimetatakse **sisendklemmideks**. Tihti nimetatakse ka otseselt **reaktsioone** ja **signaale** vastavalt ahela **väljundiks** ja **sisendiks**.

ETA kursuse üks eesmärk – omandada oskused, mis on vajalikud suvalise konfiguratsiooniga ja kuitahes suurest arvust elementidest koosneva lineaarse elektriահela analüüsiks. **Tinglikult** võib mõnel juhul suvalise kujuga (konfiguratsiooniga – struktuuriga) elektriահelat kujutada "musta kastina", mis sisaldab suvalise arvu elemente, mille struktuuri ja elementide parameetreid me ei pruugi teada. Meid huvitavad vaid **teatud signaalidele** vastavad **reaktsioonid** ehk ülekanded.

Näiteks olgu n sisend- ja väljundklemmiga **hulkklemm** (n -poolusega hulkklemm), vt joonis 1.16.



Joonis 1.16. Elektri ahela kujutamine hulkklemmina.



Joonis 1.17. Neliklemm ja kaksiklemm kui hulkklemmi erijuhtumid.

Kuigi üldjuhul võib hulkklemmile määrata kõikide väljundite **reaktsioonid** (voolud, pinged), on sageli eesmärgiks leida vaid **ühe või kahe** haru või väljundklemmide reaktsioonid. Sealjuures sageli toidab elektri ahelat vaid **üks** signaallik. Sellisteks erijuhtumiteks hulkklemmist on **neliklemm** ja **kaksiklemm** (joonis 1.17).

Neliklemmil on **kaks paari** klemme:

sisendklemmipaar, millele rakendub **signaal** u_1 või i_1 ;

väljundklemmipaar meid huvitavate reaktsioonidega u_2 või i_2 .

Kaksiklemm omab vaid **üht** klemmipaari, kus meid huvitavaks **reaktsiooniks** on sisendvool i , kui toitesignaalliks on toitepinge u või on **reaktsiooniks** pinge u juhul, kui toitesignaalliks on sisendvool i .

1.5 Kirchhoffi I ja II seadus elektri ahelate analüüsiks

Et määrata elektri ahela otsitavaid reaktsioone (harude pinged ja voolud), tuleb vastavalt elektri ahela skeemile koostada võrrandisüsteem **2 tüüpi võrranditest**.

1. Elementide võrrandid, mis seovad iga elemendi voolu ja pinget. Sellisteks võrranditeks on **resistiivsete**, **induktiivsete** ja **mahtuvuslike** elementide **volt-amper-karakteristikud**, aga samuti **toiteallikate** pinged ja voolud. **Elementide võrrandid** ei sõltu skeemist ega ahela geomeetrisest konfiguratsioonist, kuhu elemendid on ühendatud.

2. Ühenduste võrrandid, mis on määratud **ainult** elektri ahela geomeetrisest konfiguratsioonist ja elektri harude ühendusviisiga, **ei sõltu** aga elementidest elektriskeemis ega nende iseloomust. **Ühenduste võrrandid** loovad **seosed** üksikute ahelasse kuuluvate elementide **voolude** ja **pingete** vahel.

Ühenduste võrrandid koostatakse **Kirchhoffi I ja II seaduse** põhjal, mis seovad vastavalt **sõlmega** ühendatud harude **voolusid** ja **kontuure** moodustavate harude **pingeid**. **Kontuuriks** nimetame skeemi harusid ja sõlmi ühekordselt läbivat suletud teekonda.

Kirchhoffi I seadus (K-I), mis sisuliselt väljendab **laengu muutumatuse printsiipi**, annab voolude tasakaalu võrrandi ahela sõlmes:

igal ajahetkel on elektri ahela sõlmega ühendatud harude voolude algebraline summa võrdne nulliga:

$$\sum \pm i_k = 0. \quad (1.29)$$

Voolu **märk**: sõlmest väljuv vool märgiga "+", sõlme sisenev vool märgiga "-" (kuna lähtume laengute märgist, mis voolu tekitab: "+"-laeng tekitab väljuva voolu).

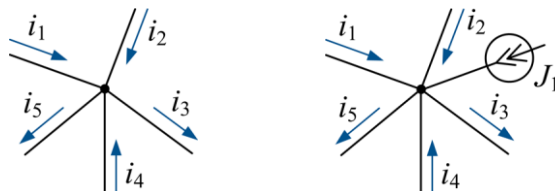
Näiteks joonise 1.18 vasakpoolse sõlme kohta:

$$-i_1 - i_2 + i_3 - i_4 + i_5 = 0. \quad (1.30a)$$

Kui sõlmega on ühendatud vooluallikas (joon. 1.18 parempoolne sõlm), siis K-I võrrand:

$$-i_1 - i_2 + i_3 - i_4 + i_5 = J_1 \quad (1.30b)$$

ehk üldjuhul $\sum i_k = \sum J_k$, kusjuures **sisenev vooluallika vool** on märgiga "+".

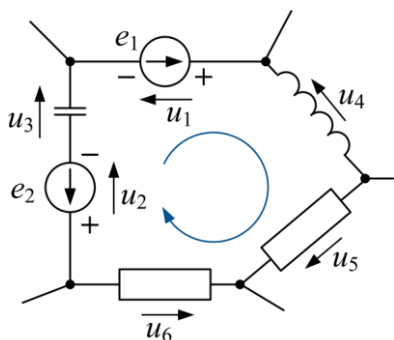


Joonis 1.18. Kirchhoffi I seaduse rakendamine vooluallikata ja vooluallikaga sõlme korral.

Kirchhoffi II seadus (K-II), mis väljendab **energia** muutumatus printsiipi, annab elektri ahelas **kontuuri pingete tasakaalu** võrrandi ja on formuleeritav:

igal ajahetkel on elektri ahela kontuuris pingete algebraline summa võrdne nulliga:

$$\sum \pm u_k = 0. \quad (1.31)$$



Joonis 1.19. Kirchhoffi II seaduse rakendamine skeemi kontuuri kohta.

K-II võrrandis pinge **märgi** määramiseks valitakse eelnevalt kontuuri läbimise suund (ja tähistatakse noolega). Kui kontuuri positiivses suunas läbimisel liigume vaadeldaval elemendil potentsiaali langemise suunas (pingelangu suund langeb kokku kontuuri suunaga), tuleb see pinge kirjutada märgiga "+"; pingelangu ja kontuuri suundade erinevuse korral kasutame märki "-".

Näiteks joonisel 1.19 valime kontuuri **suuna**, sellele vastavalt:

$$-u_1 + u_2 + u_3 - u_4 + u_5 - u_6 = 0. \quad (1.32a)$$

Kui avaldises (1.32a) viia **emj-alikate pinged** paremale poole võrdusmärgi ja asendada vastavate emj-de väärtustega, saame K-II seadusele vastava võrrandi veidi teisel kujul:

$$u_3 - u_4 + u_5 - u_6 = e_1 - e_2$$

ehk üldkujul

$$\sum u_k = \sum e_k, \quad (1.32b)$$

mis väljendab kontuuri piires passiivsete elementide pingete ja elektromotoorjõudude **algebraliste summade** võrdsust. Siinjuures emj kirjutatakse võrrandi paremasse poolde märgiga "+", kui emj e_k suund langeb kokku kontuuri suunaga.

Kirchhoffi I ja II seaduse põhjal saab koostada võrrandeid kokku:

K-I põhjal kokku N_s võrrandit, kus N_s on elektri ahela sõlmede arv; kuid **sõltumatute** võrrandite arv on $N_{K-I} = N_s - 1$, st ühe võrra väiksem skeemi sõlmede arvust. Sõlmede valik vaba. Viimane võrrand – **sõltuv**.

K-II põhjal on sõltumatute võrrandite arv (sõltumatute kontuuride arv) võrdne

$$N_{K-II} = N_h - (N_s - 1) - N_y,$$

kus N_h – harude arv;

N_y – sõltumatu vooluallikaga harude arv.

Kirchhoffi I ja II seaduse põhjal koostatud võrrandisüsteem koosneb $N_K = N_{K-I} + N_{K-II}$ sõltumatust lineaarvõrrandist, mille lahendamisel saadakse sama arv tundmatuid otsitavaid **reaktsioone** (voolud ja pinged) – võrrandisüsteem laheneb üheselt.

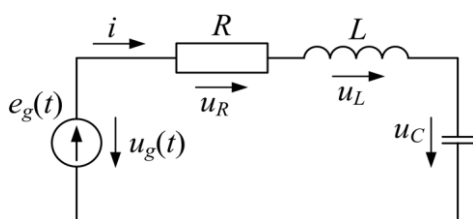
Kui lineaarne elektriabel sisaldab ainult üht liiki elemente, **näiteks resistiivseid**, siis seda ahelat iseloomustab **lineaarsete algebraliste** võrrandite süsteem.

Kui aga lineaarne elektriabel sisaldab mitut liiki passiivseid elemente (neid nimetame dünaamilisteks ahelateks), siis iseloomustab ja kirjeldab seda ahelat **lineaarsete integraal-diferentsiaalvõrrandite** süsteem. Näiteks vaatleme elektriabelat, mis sisaldab R -, L - ja C -elemente ja mille kohta koostame teda kirjeldavad võrrandid.

1. Elektriabel jadamisi ühendatud R -, L - ja C -elementidest

Kirchhoffi I ja II seaduse põhjal koostame ahela ühenduste kohta võrrandid. **K-I** kohaselt ahela suvalises punktis (nii R -l, L -l kui ka C -l) on voolud võrdsed (vaatleme **lihtsõlmi**):

$$i_L = i_C = i_R = i. \quad (1.33a)$$



Joonis 1.20. RLC -jadaahela kirjeldamine Kirchhoffi I ja II seaduse alusel.

K-II seaduse põhjal ainsas kontuuris

$$u_R + u_L + u_C = u_g(t) = e_g(t). \quad (1.33b)$$

Siinjuures **elementide võrrandid** avalduvad

$$u_L = L \frac{di}{dt}; \quad u_C = \frac{1}{C} \int_0^t i dt; \quad u_R = R \cdot i.$$

Elementide võrrandite kaudu avaldub kontuuri võrrand (1.33b):

$$R \cdot i + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^t i dt = u_g(t). \quad (1.34a)$$

Et määrata tundmatu vool i , on otstarbekas avaldist (1.34a) diferentseerida. Nii saadakse ahela kohta **ekvivalentne teist järku diferentsiaalvõrrand**

$$L \frac{d^2 i}{dt^2} + R \frac{di}{dt} + \frac{i}{C} = \frac{du_g}{dt}, \quad (1.34b)$$

mille lahendamisel saadakse vool i .

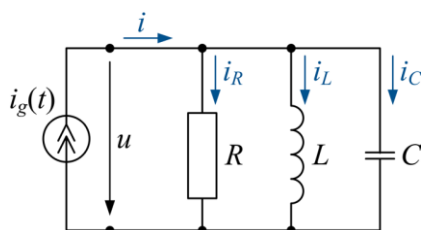
2. Elektriabel rööpselt ühendatud R -, L - ja C -elementidega

Kirjutame ahela **ühenduste võrrandid**:

K-I põhjal: $i_R + i_L + i_C = i_g(t). \quad (1.35a)$

K-II alusel saame 3 kontuuri, nende kohta ühiselt

$$u_R = u_L = u_C = u. \quad (1.35b)$$



Joonis 1.21. RLC -rööpahela kirjeldamine Kirchhoffi I ja II seaduse alusel.

Sealjuures **elementide võrrandid**:

$$i_R = G \cdot u; \quad i_L = \frac{1}{L} \int_0^t u dt; \quad i_C = C \frac{du}{dt}. \quad (1.35c)$$

Asendame need elementide võrrandid avaldisse (1.35a):

$$G \cdot u + \frac{1}{L} \int_0^t u dt + C \frac{du}{dt} = i_g(t). \quad (1.36a)$$

Et avaldada otsitavat suurust, s.o sõlmedevahelist pinget u , tuleks avaldist (1.36a) diferentseerida, saades nii lineaarse II järku diferentsiaalvõrrandi, mille lahendiks on otsitav pinge u :

$$C \frac{d^2 u}{dt^2} + G \frac{du}{dt} + \frac{u}{L} = \frac{di_g}{dt}. \quad (1.36a)$$

Siit määratava pinge u kaudu võib omakorda määrata elementide võrranditest (1.35c) harude voolud i_R , i_L ja i_C .

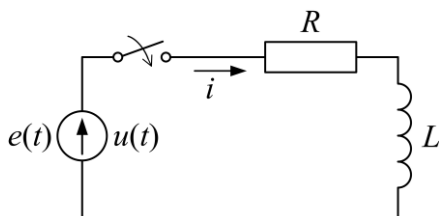
Näidetest selgub, et vaid siis, kui elektriabel sisaldab energiat salvestavaid elemente (C , L), peame ahelat kirjeldama diferentsiaalvõrrandite abil.

1.6 Ahela võrrandite lahendite üldised omadused

Elektriabelate (lineaarsete) analüüsi meetodite korral kasutatakse laialdaselt lahendite üldomadusi, mis tulenevad **võrrandite lineaarsusest**.

Vaatleme neid omadusi näite põhjal lihtsa R - L jadaühenduse korral (joon. 1.22). K-II seaduse põhjal kirjeldab selles skeemis toimuvaid protsesse järgmine avaldis:

$$R \cdot i + L \frac{di}{dt} = u(t). \quad (1.37)$$



Joonis 1.22. Elektriabelate lahendite üldised omadused RL -jadaahela näitel.

Esimene omadus – kui nullalgttingimuste korral muuta kõigi ahelale toimivate energiaallikate signaale (voolusid või pingeid) k korda, muutuvad ahela reaktsioonid (voolud või pinged) samuti k korda:

signaal $\rightarrow$ reaktsioon
 $k \times$ signaal $\rightarrow k \times$ reaktsioon

Kuna avaldis (1.37) on lineaarne, siis viib tema parema ja vasaku poole korrutamise konstandiga k ka ahela reaktsiooni (voolu) korrutamisele selle konstandiga:

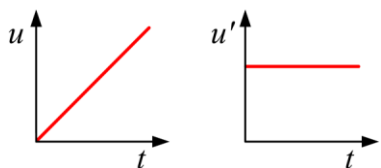
$$R \cdot (k \cdot i) + L \frac{d(k \cdot i)}{dt} = k \cdot u(t). \quad (1.38)$$

See omadus lubab lineaarsete ahelate arvutamisel kasutada sobivat mastaapi pingetele või vooludele, aga ka ahela takistustele. Vaid **lõpptulemus** tuleb taandada tegelikule toitesignaali (voolu või pinge) tasemele. Selle omaduse põhjal võib näiteks praktilistes ülesannetes mugavuse pärast anda elementide parameetritele ühikulise väärtuse.

Teine omadus – kui ahelale rakendada voolu või pinge asemel tema tuletis või integraal, siis reaktsioon võrdub lähtereaktsiooni tuletise või integraaliga.

Seda tõestab näite varal analoogia lähtevõrrandi (1.37) ja selle tuletise vahel:

$$R \cdot i' + L \frac{di'}{dt} = \frac{du(t)}{dt}. \quad (1.39)$$



Joonis 1.23. Elektriabelate lineaarselt kasvava pinge ja pinge tuletise aegsõltuvuse võrdlus.

See avaldis erineb lähtevõrrandist vaid selle poolest, et siin esinevad nii voolude kui pingete tuletised. Vastavalt teisele omadusele võib näiteks lineaarselt kasvava pingega (emj-ga) allika mõju teadasaamiseks kasutada selle pinge integreerimist ning sel viisil saadud alalispinge abil määrata **ahela reaktsiooni**.

Kolmas omadus (superpositsiooni printsiip) – lineaarses elektrialhelas mitme energiaallika koostmõjul tekkiv reaktsioon on võrdne summaga üksikute reaktsioonidest, mida need allikad tekitaksid ühekaupa ahelat toites.

Olgu näiteks toitepinge avaldatav kahe komponendi summana

$$u(t) = u_1(t) + u_2(t). \quad (1.40)$$

Siis eraldi kummagi toitepinge komponendi poolt põhjustatud reaktsioonid peavad rahuldama võrrandeid

$$\begin{aligned} R \cdot i_1 + L \frac{di_1}{dt} &= u_1(t), \\ R \cdot i_2 + L \frac{di_2}{dt} &= u_2(t). \end{aligned} \quad (1.41)$$

Nende kahe avaldise summeerimine tõestab eespool öeldut:

$$R(i_1 + i_2) + L \frac{d(i_1 + i_2)}{dt} = u_1(t) + u_2(t) = u(t). \quad (1.42)$$

Superpositsiooniprintsiip on ahelate teoorias üpris olulisel kohal, seda kasutatakse laialdaselt.

Kui näiteks lineaarset elektrialhelat toidab keeruka kujuga (ajafunktsiooniga) signaal, siis on otsustav see signaal matemaatiliselt komponentideks lahutada ja esitada näiteks reana. Seejärel toimub ahela analüüs üksikute lihtsalt kirjeldatavate komponentide kaupa. Ahela otsitav summaarne reaktsioon algsignaalile on kirjeldatav üksikute määratud reaktsioonikomponentide summana.