

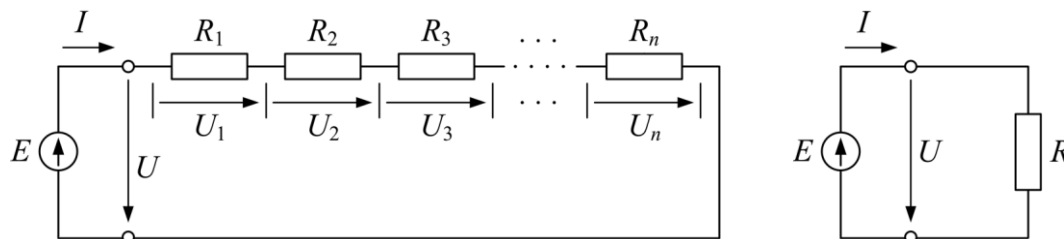
II peatükk

LINEAARSETE RESISTIIVSETE AHELATE ANALÜÜS (alalisvooluahelate analüüs)

2.1 Takistuste jada-, rööp- ja segaühendus

2.1.1 Jadaühendus (järjestikühendus)

Elektriahela jadaühendus – ahelaelementide selline ühendusviis, kus läbi kõigi elementide voolab üks ja seesama vool.



Joonis 2.1. Takistite jadaühenduse teisendamine.

Vaatleme elektriahelat, mis moodustub mitmest (n) jadamisi ühendatud resistiivsest elemendist R_i ja mida toidab alaliselektromotoorjõud (joon. 2.1). Eeldame, et toitev emj on ideaalne, s.o $U = E$ ($R_e = 0$). Siis Kirchhoffi II seaduse alusel võime kirjutada

$$E = U = R_1 I + R_2 I + R_3 I + \dots + R_n I \quad (2.1)$$

ehk teisiti, kuna $U_k = I \cdot R_k$, siis

$$U = U_1 + U_2 + U_3 + \dots + U_n \quad | : I ;$$

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n$$

ehk üldkujul

$$R = \sum_{k=1}^n R_k . \quad (2.2)$$

Pinge ahela mingil jadaelemendil avaldub (kuna $I = U/R$):

$$U_n = R_n \cdot I = \frac{R_n}{R} U = K_{U_n} \cdot U ,$$

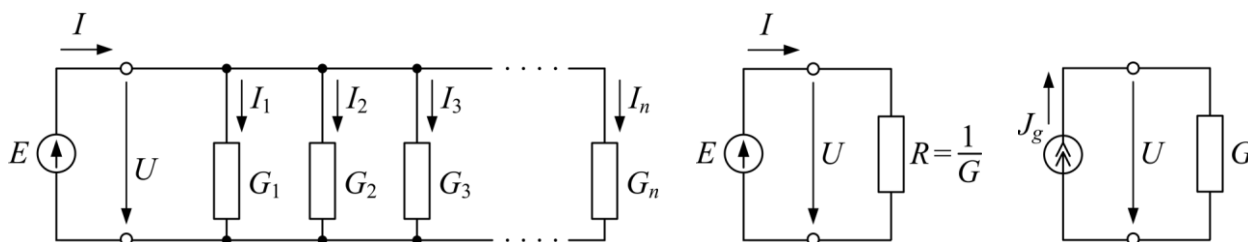
kus $K_{U_n} = U_n/U$ on pinge ülekandetegur (toitepingest n -nda elemendi pingeks);

$1/K_{U_n} = U/U_n$ – pinge jagamistegur.

Järelikult sellise **elektriahela kogutakistus**, mis koosneb jadamisi ühendatud üksikutest takistustest, avaldub **kõigi takistuste summana**. Sealjuures on jadaahela üksikute lõikude pingete omavaheline proportsioon samasugune, nagu vastavate lõikude takistuste suhe.

2.1.2 Rööpühendus (paralleelühendus)

Elektriahela rööpühendus on ahelaelementide selline ühendusviis, kus kõigile elementidele langeb üks ja seesama pinge.



Joonis 2.2. Takistite rööpühenduse teisendamine.

Vaatleme elektrialelat, mis moodustub mitmest rööbiti ühendatud resistiivsest elemendist juhtivusega $G_i = 1/R_i$ ja mida toidab alalispingeallikas $E = U$ (joon. 2.2). Kirchhoffi I seaduse põhjal sisendvool

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n = G_1 U + G_2 U + G_3 U + \dots + G_n U \\ = (G_1 + G_2 + G_3 + \dots + G_n) U = G U ,$$

kus

$$G = G_1 + G_2 + G_3 + \dots + G_n \quad (2.4)$$

ja arvestades, $G_i = 1/R_i$, avaldub rööpharude kogujuhtivus

$$G = \sum_{i=1}^n G_i .$$

Seega rööpelementide kogujuhtivus on võrdne üksikute rööpsete juhtivuste summaga.

Sisendklemmide vahel pinge

$$U = \frac{J_g}{G} = J_g \cdot R . \quad (2.5)$$

Haruvoolud avalduvad:

$$I_n = U \cdot G_n = J_g \cdot \frac{G_n}{G} = J_g \cdot K_{In} ,$$

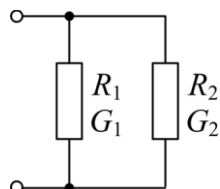
kus

$$K_{In} = \frac{G_n}{G} = \frac{I_n}{J_g} \quad (2.6)$$

on **voolu ülekanalitegur** ahelas, väljendab n -nda elemendi voolu suhet ahela sisendvoolu.

Voolu **ülekanaliteguri pöördväärtus** $1/K_{In} = J_g/I_n$ kannab nimetust **voolu jagamistegur** ja väljendab **ahela sisendvoolu** suhet vaadeldava haruvoolu I_n väärtusesse.

Erijuhtumid rööpühendusest on joonisel 2.3.

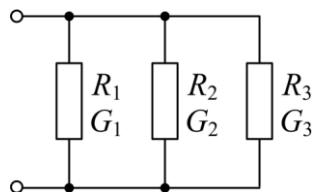


2 takistust rööbiti

$$G = G_1 + G_2 ,$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{R_2 + R_1}{R_1 \cdot R_2} ,$$

$$R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} . \quad (2.7)$$

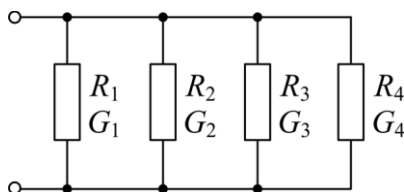


3 takistust rööbiti

$$G = G_1 + G_2 + G_3 ,$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_1 R_3}{R_1 R_2 R_3} ,$$

$$R = \frac{R_1 R_2 R_3}{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1} . \quad (2.8)$$



4 takistust rööbiti

$$G = G_1 + G_2 + G_3 + G_4 ,$$

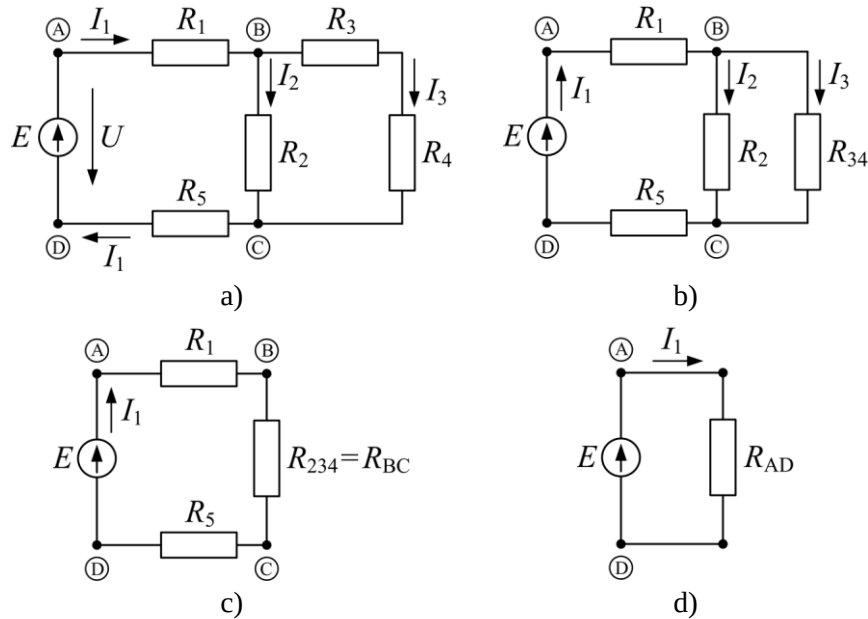
$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} = \frac{R_2 R_3 R_4 + R_1 R_3 R_4 + R_1 R_2 R_4 + R_1 R_2 R_3}{R_1 R_2 R_3 R_4} ,$$

$$R = \frac{R_1 R_2 R_3 R_4}{R_1 R_2 R_3 + R_2 R_3 R_4 + R_3 R_4 R_1 + R_4 R_1 R_2} . \quad (2.9)$$

Joonis 2.3. Takistite rööpühendused kahe, kolme ja nelja rööptakisti korral.

2.1.3 Segaiühendus

Elektriahela segaiühendus on ahelaelementide selline ühendusviis, kus esineb nii jadamisi kui ka rööpselt ühendatud elementide kooslusi. Vaatleme näiteks segaiühenduses elektriahelat joonisel 2.4a. Ekvivalentse sisendtakistuse määramist alustame emj-allikast kaugeima ahelaosa teisendamise.



Joonis 2.4. Takistite segaiühendusega skeemi teisendamine.

Jadamisi töötavate takistuste R_3 ja R_4 asemel toome sisse neid mõlemaid asendava takistuse $R_{34} = R_3 + R_4$ (joon. 2.4b). See takistus toimib rööbiti takistusega R_2 , seega neid mõlemaid asendav ekvivalentne takistus avaldub sõlmede B ja C vahel

$$R_{234} = R_{BC} = \frac{R_2 \cdot R_{34}}{R_2 + R_{34}}. \quad (2.10)$$

Seejärel määrame ekvivalentse ahela sisendtakistuse, mis R_1 , R_5 ja R_{BC} jadaühenduse tõttu avaldub sõlmede A ja D vahel

$$R_{AD} = R_1 + R_{BC} + R_5. \quad (2.11)$$

Kui nüüd on teada toiteallika emj väärtus E , saab määrata voolujaotuse elektriahelas:

$$I_1 = \frac{E}{R_{AD}} = \frac{E}{R_1 + R_{BC} + R_5}; \quad U_{BC} = I_1 \cdot R_{BC} = I_1 \frac{R_2 R_{34}}{R_2 + R_{34}}. \quad (2.12)$$

Voolujaotusseaduse erikuju

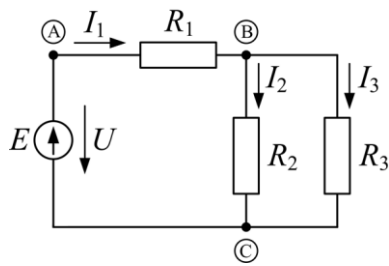
$$I_2 = \frac{U_{BC}}{R_2} = I_1 \cdot \frac{R_{34}}{R_2 + R_{34}}; \quad I_3 = \frac{U_{BC}}{R_{34}} = I_1 \frac{R_2}{R_2 + R_{34}}.$$

Segaiühenduses elektriahelas voolude leidmiseks on mõnel juhul mugav kasutada voolujaotusvalemit. Selle seaduspära väljatoomiseks vaatleme skeemi joonisel 2.5. Siin saame avaldada ahela sisendvoolu I_1 :

$$I_1 = \frac{U}{R} = \frac{U}{R_1 + \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3}} = \frac{U}{D} (R_2 + R_3), \quad (2.13)$$

kus

$$D = R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1. \quad (2.14)$$



Joonis 2.5. Voolujaotusvalemi kasutamise näide takistite segaühenduse korral.

Voolude I_2 ja I_3 määramiseks leiame alguses pinge U_{BC} sisendtakistuse R_{BC} kaudu:

$$U_{BC} = R_{BC} \cdot I_1 = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3} \cdot \frac{U}{D} \cdot (R_2 + R_3) = \frac{U}{D} R_2 R_3. \quad (2.15)$$

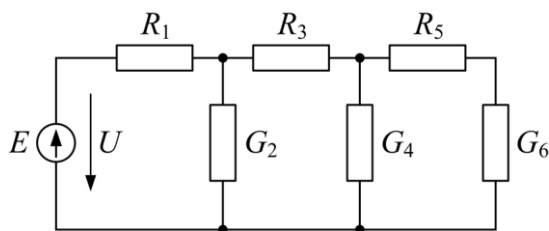
Sealt omakorda voolud hargnemiskohast:

$$I_2 = \frac{U_{BC}}{R_2} = \frac{U}{D} \cdot R_3; \quad I_3 = \frac{U_{BC}}{R_3} = \frac{U}{D} \cdot R_2. \quad (2.16)$$

Seega kahe takistuste rööpühenduse korral on ühe haru vool võrdeline selle haruga **rööpse teise haru** takistusega.

Valemid (2.13)...(2.16) kirjeldavad rööpharude voolujaotusreeglit.

Elektriahela segaühenduse erijuhtumiks on **ahellülitus**.



Joonis 2.6. Ahelskeem kui takistite segaühenduse erijuhtum.

Sellise ahellülituses elektriahela **sisendtakistus** avaldub:

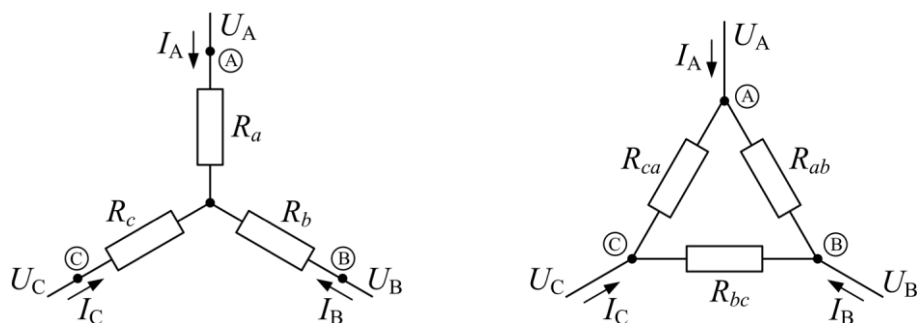
$$R = R_1 + \frac{1}{\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3 + \frac{1}{\frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5 + \frac{1}{R_6}}}}}. \quad (2.17)$$

2.2 Tähtühenduse teisendamine kolmnurkühenduseks ja pöördteisendus

Praktikas elektriahelate analüüsis kohtame küllaltki sageli takistuselementide **täht-** või **kolmnurkühendusi** (joon. 2.7).

Tähtühendus – see on kolme takistuselemendi selline ühendusviis, kus takistuselemente sisaldavad kolm haru lähtuvad **kiirtena ühest** ja samast punktist.

Kolmnurkühendus – takistuselemente sisaldavad harud moodustavad elektriahelas suletud **kolmnurga** kujulise kujundi.



Joonis 2.7. Elektriahela skeem tähtühenduses ja kolmnurkühenduses.

Selliste hargnevate lineaarsete ahelate analüüs võib mõnel juhul oluliselt lihtsustada, kui mõnes selle ahela osas **kolmnurkühendus** asendada **ekvivalentse tähtühendusega** või vastupidi.

Kolmnurk- ja tähtühenduse ekvivalentsuse tarvilikuks ja piisavaks tingimuseks on, et resulteeruv takistus iga klemmipaari suhtes on ühesugune nii kolmnurk- kui tähtühenduse korral. Sel juhul välisahela voolujaotus (I_A ; I_B ; I_C) konstantsete sõlmepotentsiaalide korral ei muutu.

Takistuste ekvivalentse teisenduse valemid:

$Y \rightarrow \Delta$ (joon. 2.7)

$$\left. \begin{aligned} R_{ab} &= R_a + R_b + \frac{R_a \cdot R_b}{R_c} \\ R_{bc} &= R_b + R_c + \frac{R_b \cdot R_c}{R_a} \\ R_{ca} &= R_c + R_a + \frac{R_c \cdot R_a}{R_b} \end{aligned} \right\} . \quad (2.18)$$

$\Delta \rightarrow Y$

$$\left. \begin{aligned} R_a &= \frac{R_{ab} \cdot R_{ca}}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}} \\ R_b &= \frac{R_{ab} \cdot R_{bc}}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}} \\ R_c &= \frac{R_{bc} \cdot R_{ca}}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}} \end{aligned} \right\} . \quad (2.19)$$

Kui Y või Δ on sümmeetriline ($R_i = \text{const}$), siis

$$R_Y = \frac{R_{\Delta}}{3} \quad \text{või} \quad R_{\Delta} = 3 \cdot R_Y . \quad (2.20)$$

Sisendtakistused sõlmepaaride a-b, b-c ja c-a suhtes:

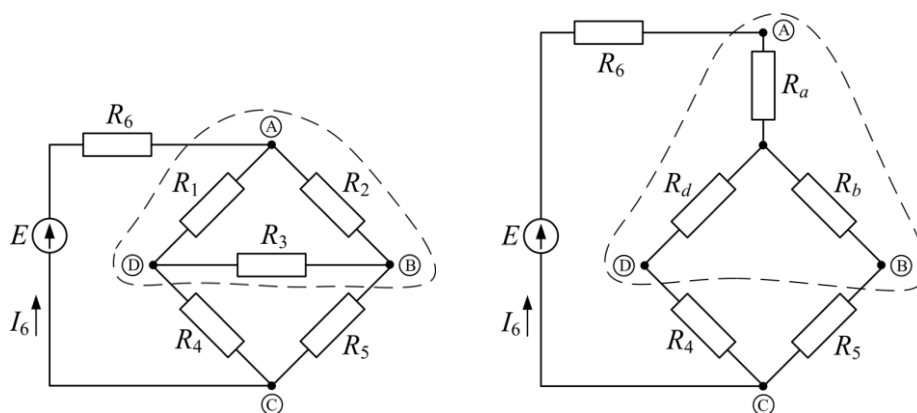
$$\text{sõlmed a-b:} \quad R_a + R_b = \frac{R_{ab} (R_{bc} + R_{ca})}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}} ,$$

$$\text{sõlmed b-c:} \quad R_b + R_c = \frac{R_{bc} (R_{ca} + R_{ab})}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}} ,$$

$$\text{sõlmed c-a:} \quad R_c + R_a = \frac{R_{ca} (R_{ab} + R_{bc})}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}} .$$

Siit edasi valemid (2.18) ja (2.19).

Näide 1: Sildühendusskeem, $\Delta \rightarrow Y$ teisendus.



Joonis 2.8. Elektriavala sildühenduses skeemi teisendamine.

Teisendame, asendades $\Delta - R_1 R_2 R_3 \rightarrow Y - R_a R_b R_c$:

$$R_a = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2 + R_3}; \quad R_b = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_1 + R_2 + R_3}; \quad R_d = \frac{R_1 \cdot R_3}{R_1 + R_2 + R_3}.$$

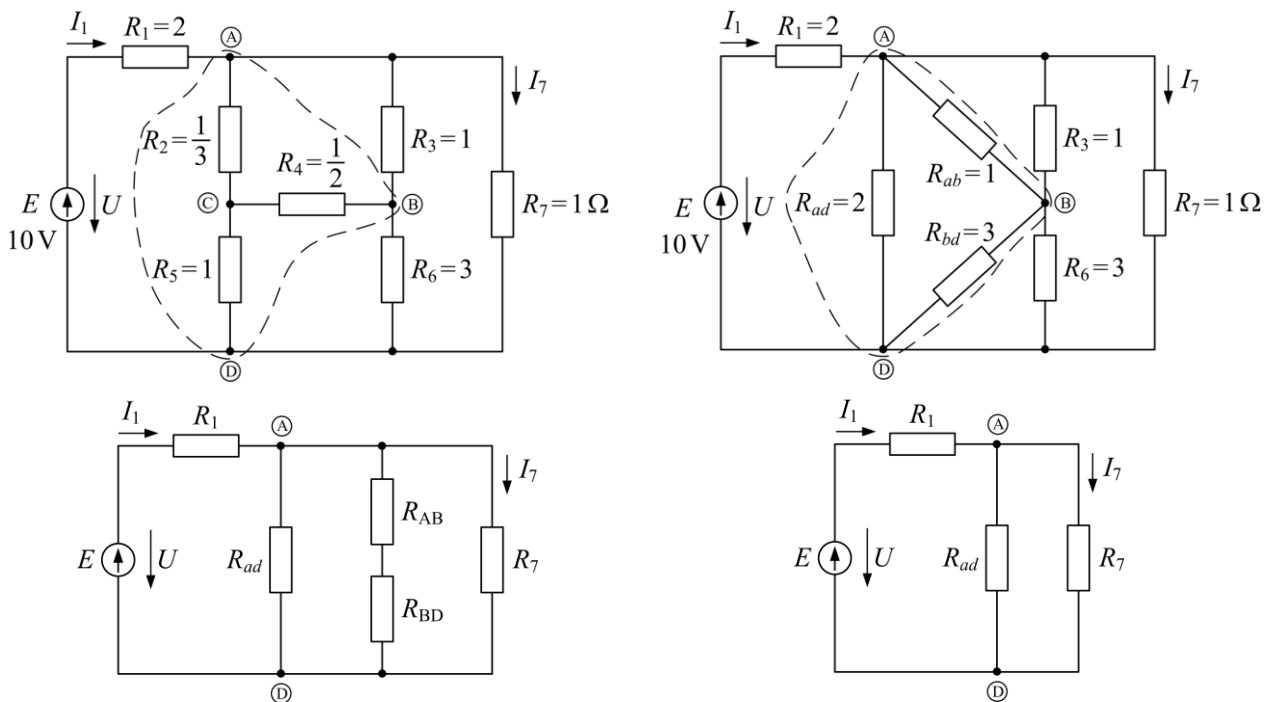
Siis kogu ahela sisendtakistus

$$R_{ekv} = R_b + R_a + \frac{(R_b + R_5)(R_d + R_4)}{R_b + R_5 + R_d + R_4};$$

$$I_6 = \frac{E}{R_{ekv}} \quad \text{jne.}$$

Näide 2: Sildühenduskeem, $Y \rightarrow \Delta$ teisendus.

Leida: $R_{ekv}; I_1; I_7; K_{U7} = \frac{U_7}{U} = \frac{U_{AD}}{U}$



Joonis 2.9. Takistite segühenduses skeemi korral täht-kolmnurk teisenduse kasutamine.

Teisendamine ei tohi puudutada R_7 -haru, sest seal on vaja vool I_7 leida. Kasutame teisendust R_2, R_4 ja R_5 osas:

$$R_{ab} = R_2 + R_4 + \frac{R_2 R_4}{R_5} = \frac{1}{3} + \frac{1}{2} + \frac{\frac{1}{3} \cdot \frac{1}{2}}{1} = 1 \Omega;$$

$$R_{bd} = R_4 + R_5 + \frac{R_4 \cdot R_5}{R_2} = \frac{1}{2} + 1 + \frac{\frac{1}{2} \cdot 1}{\frac{1}{3}} = 3 \Omega;$$

$$R_{ad} = R_5 + R_2 + \frac{R_5 \cdot R_2}{R_4} = 1 + \frac{1}{3} + \frac{1 \cdot \frac{1}{3}}{\frac{1}{2}} = 2 \Omega.$$

Edasi leiame

$$R_{AB} = \frac{R_{ab} \cdot R_3}{R_{ab} + R_3} = \frac{1 \cdot 1}{1 + 1} = \frac{1}{2} \Omega; \quad R_{BD} = \frac{R_{bd} \cdot R_6}{R_{bd} + R_6} = \frac{3 \cdot 3}{3 + 3} = 1,5 \Omega;$$

$$R_{AD} = \frac{R_{ad} \cdot (R_{AB} + R_{BD})}{R_{ad} + R_{AB} + R_{BD}} = \frac{2 \cdot (0,5 + 1,5)}{2 + 0,5 + 1,5} = 1 \Omega.$$

Kogutakistus $R_{ekv} = R$ avaldub seega:

$$R = R_1 + R_{AD} = R_1 + \frac{R_{AD} \cdot R_7}{R_{AD} + R_7} = 2 + \frac{1 \cdot 1}{1 + 1} = 2,5 \Omega;$$

$$I_1 = \frac{U}{R} = \frac{10}{2,5} = 4 \text{ A};$$

$$D = R_1 R_{AD} + R_{AD} \cdot R_7 + R_7 \cdot R_1 = 2 \cdot 1 + 1 \cdot 1 + 1 \cdot 2 = 5;$$

$$I_7 = \frac{U}{D} \cdot R_{AD} = \frac{10}{5} \cdot 1 = 2 \text{ A};$$

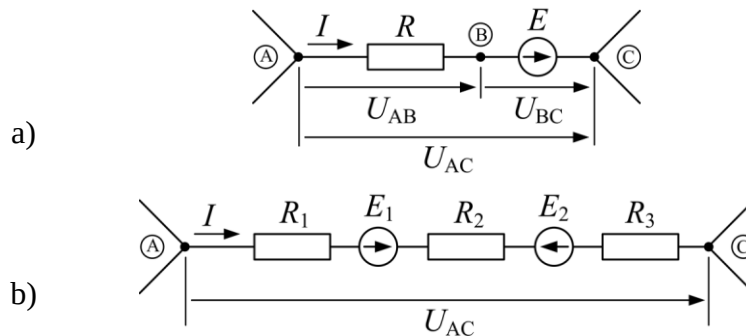
$$U_7 = R_7 \cdot I_7 = 2 \text{ V}.$$

Pinge ülekandetegur sisendist väljundisse (7-ndale harule):

$$K_{U7} = \frac{U_7}{U} = \frac{2}{10} = 0,2.$$

2.3 Ohmi seadus aktiivses ahelaosas

Vaatleme elektriiahela osa, mis koosneb takistusest R ja emj-allikast E jadamisi ahelaharus A-C (joon. 2.10a).



Joonis 2.10. Elektriiahela aktiivharude kirjeldamine Ohmi seaduse alusel.

Valime arvutuslikud suunad I , U_{AC} ja E jaoks kõik ühes suunas. Tähistame punktide A, B ja C potentsiaalid vastavalt φ_A ; φ_B ; φ_C .

Nagu teada, pinge lõigul A-C

$$U_{AC} = \varphi_A - \varphi_C = U_{AB} + U_{BC}.$$

Selle avaldise komponendid:

$$U_{AB} = \varphi_A - \varphi_B = R \cdot I,$$

kuna emj tekitab potentsiaali tõusu:

$$U_{BC} = \varphi_B - \varphi_C = -(\varphi_C - \varphi_B) = -E,$$

seega

$$U_{AC} = R \cdot I - E. \quad (2.20)$$

Kui lahendada avaldis (2.20) voolu I suhtes, saame

$$I = \frac{U_{AC} + E}{R} = G(U_{AC} + E). \quad (2.21)$$

Kui ahela harus on mitu energiaallikat ja takistust (joon. 2.10b), on üldavaldis järgmine:

$$I = \frac{U_{AC} + \sum_{k=1}^n E_k}{\sum R_k}, \quad (2.22)$$

siin $\sum_{k=1}^n E_k$ – elektromotoorjõudude algebraline summa;

$\sum R_k$ – jadaahela takistuste summa.

Vastavalt joonisele 2.10b avaldub vool

$$I = \frac{U_{AC} + E_1 - E_2}{R_1 + R_2 + R_3}$$

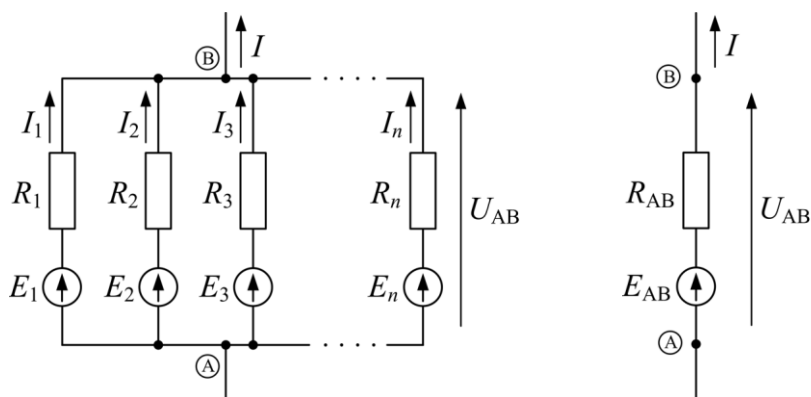
ja

$$U_{AC} = I(R_1 + R_2 + R_3) - E_1 + E_2.$$

Kui $\sum E_k = 0$, siis on **passiivne haru**.

2.4 Aktiivsete rööpharude teisendamine

Kui keeruka elektriahela korral leidub grupp rööpseid harusid, mis sisaldavad elektromotoorjõude ja takistuselemente R_i , siis arvutuse lihtsustamiseks saab selle harude grupi asendada **ühe ekvivalentse aktiivharuga**, s.o ühe emj ja takistuse R_{AB} jadaühendusega (joon. 2.11).



Joonis 2.11. Rööpsete aktiivharude asendamine ühe ekvivalentse aktiivharuga.

Valime arvutuslikud voolu- ja pingesuunad. Avaldise (2.21) alusel haruvoolud avalduvad:

$$I_k = G_k (U_{AB} + E_k), \quad k=1, 2, 3, \dots, n.$$

Kirchhoffi I seaduse põhjal kogu sisendvool on

$$I = \sum_{k=1}^n I_k = \sum_{k=1}^n G_k (U_{AB} + E_k).$$

Esitame selle võrrandi teisel kujul:

$$I = \sum_{k=1}^n I_k = U_{AB} \sum_{k=1}^n G_k + \sum_{k=1}^n G_k \cdot E_k = U_{AB} \cdot G_{AB} + G_{AB} \cdot E_{AB} = G_{AB} (U_{AB} + E_n). \quad (2.23)$$

Siin avaldises G_{AB} on ekvivalentne sisendjuhtivus lõigule A-B:

$$\boxed{G_{AB} = \sum_{k=1}^n G_k = \sum_{k=1}^n \frac{1}{R_k}}; \quad R_{AB} = \frac{1}{G_{AB}}. \quad (2.24)$$

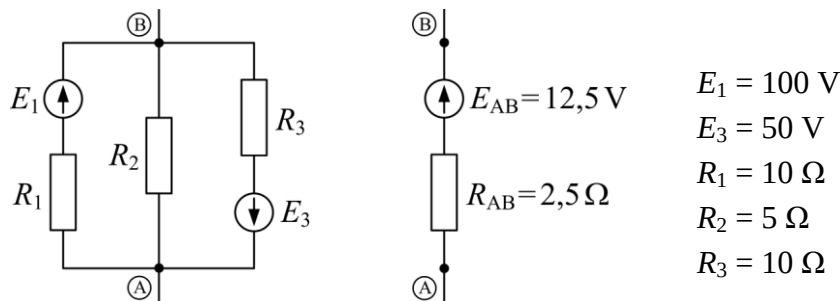
Siin G_{AB} avaldis langeb kokku rööpharude ekvivalentse sisendjuhtivuse määramise avaldisega passiivsete harude rööpühenduse korral. Elektriahela rööpharude elektromotoorjõude asendava ekvivalentse emj avaldis tuleb:

$$\boxed{E_{AB} = \frac{\sum_{k=1}^n G_k \cdot E_k}{G_{AB}}}. \quad (2.25)$$

Juhul, kui harude elektromotoorjõudude suunad on erinevad klemmide A-B suhtes, tuleb kasutada **algebraalist summat** (sõlme B suunas "+" märk, sõlme A suunas "-" märk).

Kui mõnes harus emj puudub, paneme avaldisse "0".

Näide:



Joonis 2.12. Mitme aktiivse rööpharu asendamine ühe ekvivalentse aktiivharuga.

$$G_{AB} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{1}{10} + \frac{1}{5} + \frac{1}{10} = \frac{4}{10} = 0,4 \text{ S};$$

$$R_{AB} = \frac{1}{G_{AB}} = 2,5 \Omega.$$

$$E_{AB} = \frac{\frac{1}{R_1} \cdot E_1 - \frac{1}{R_3} \cdot E_3}{G_{AB}} = \frac{\frac{1}{10} \cdot 100 - \frac{1}{10} \cdot 50}{0,4} = \frac{5}{0,4} = 12,5 \text{ V}.$$

Kui rööpsete harude grupp sisaldab ka harusid vooluallikaga J_{gk} , siis üldvoolu avaldis muutub:

$$I = \sum_{k=1}^n I_k + \sum_{k=1}^l J_{gk} = U_{AB} \sum_{k=1}^n G_k + \left(\sum_{k=1}^n G_k \cdot E_k + \sum_{k=1}^l J_{gk} \right).$$

Siit ekvivalentne emj avaldub:

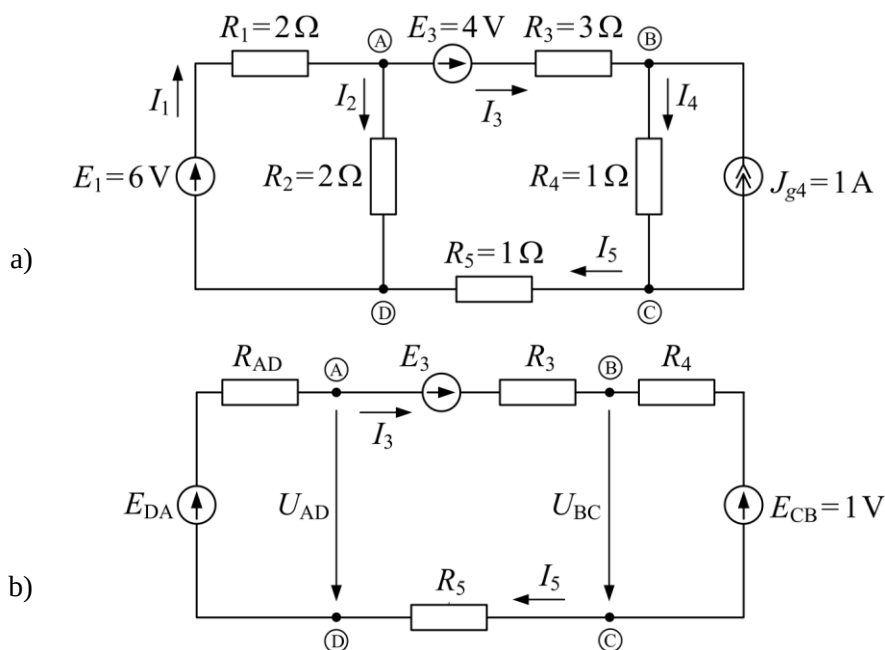
$$\boxed{E_{AB} = \frac{\sum_{k=1}^n G_k E_k + \sum J_{gk}}{G_{AB}}}. \quad (2.26)$$

(Sisuliselt iga korrutis $G_k \cdot E_k = E_k / R_k = I_{kk}$ on k-nda haru **lühisvool**. Aga vooluallika vool J_{gk} on tegelikult reaalse allika lühisvool. Seega iga I_{kk} väljendab sisuliselt ka mingi ekvivalentse vooluallika voolu $I_{kk} = G_k \cdot E_k$).

Näide elektriahela arvutuse kohta aktiivharude korral (joon. 2.13a).

Määrame voolujaotuse selles elektriakelas.

1. Teisendame ahelaosa A-D:



Joonis 2.13. Elektriakelas voolude arvutamine aktiivharude teisendamise meetodil.

$$G_{AD} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} = 1, \quad R_{AD} = \underline{\underline{1\Omega}},$$

$$E_{DA} = \frac{\frac{1}{R_1} E_1}{G_{AD}} = \frac{\frac{1}{2} \cdot 6}{1} = \underline{\underline{3\text{ V}}}.$$

2. Teisendame lõigul B-C vooluallika emj-allikaks:

$$E_{CB} = R_4 \cdot J_{g4} = 1 \cdot 1 = 1\text{ V}.$$

Selle tulemusena moodustub hargnemisteta ahel (joon. 2.13b). Selles ahelas on algsel, teisendamata kujul vaid elemendid E_3 , R_3 ja R_5 , nende voolu saame leida:

$$I_3 = \frac{\sum E_k}{\sum R_k} = \frac{E_{DA} + E_3 - E_{CB}}{R_{AD} + R_3 + R_4 + R_5} = \frac{3 + 4 - 1}{1 + 3 + 1 + 1} = \frac{6}{6} = \underline{\underline{1\text{ A}}};$$

$$U_{AD} = E_{DA} - I_3 \cdot R_{AD} = 3 - 1 \cdot 1 = 2\text{ V}.$$

$$I_2 = \frac{U_{AD}}{R_2} = \frac{2}{2} = 1\text{ A};$$

$$I_1 = I_2 + I_3 = 2\text{ A}$$

või

$$I_1 = \frac{E_1 - U_{AD}}{R_1} = \frac{6 - 2}{2} = 2\text{ A};$$

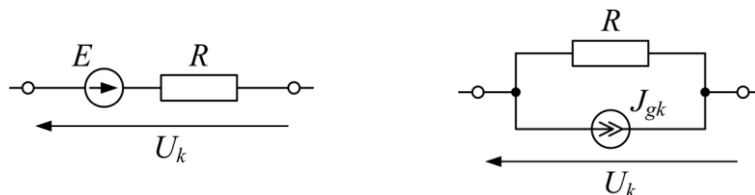
$$I_4 = I_3 + I_{g4} = 1 + 1 = 2\text{ A};$$

$$I_5 = I_3 = 1\text{ A}.$$

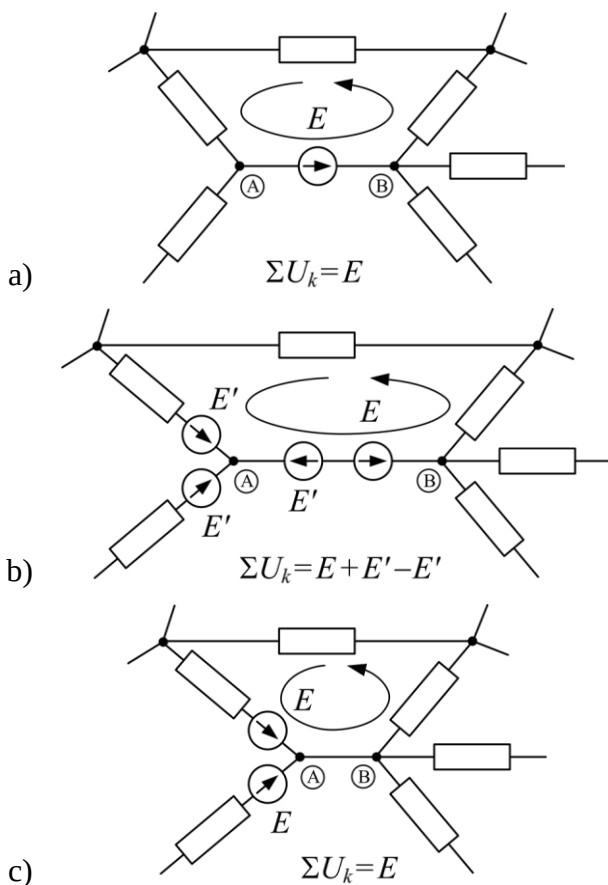
2.5 Energiaallikate ülekanne

a) Asendus emj $\rightarrow$ vooluallikas või emj $\rightarrow$ emj

Hargnevate elektriahelate arvutamise lihtsustamiseks on mõnel juhul tarvilik teisendada haru (jadaühenduses emj ja takistusega) teiseks ekvivalentseks haruks, milles on vooluallikas rööbiti takistusega (joon. 2.14). Siin $J_{gk} = E/R$. Kui ahelas $R \rightarrow 0$, siis üleminek on võimatu, sest $J_{gk} \rightarrow \infty$.



Joonis 2.14. Elektromotoorjõu asendamine ekvivalentse vooluallikaga.



Joonis 2.15. Elektromotoorjõudu sisaldava haru teisendamine.

b) Asendus vooluallikas $\rightarrow$ emj allikas

Sageli on selline asendus otstarbekas skeemi lihtsustamiseks. Sõlme kohta vooluallika olemasolul peab kehtima Kirchhoffi I seadus

$$\sum_{k=1}^n I_k = \sum_{k=1}^l J_{gk}.$$

Seega võib vooluallikaid meeleepäraselt ümber paigutada nii, et säiliks $\Sigma J_{gk} = \text{const}$. Sel juhul ka harude voolud ei muutu.

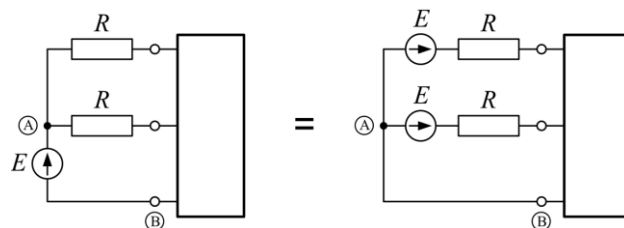
Vastavalt Kirchhoffi II seadusele $\Sigma U_k = \Sigma E_k$ suvalise kontuuri jaoks võib elektromotoorjõude **üle viia teistesse harudesse**, aga nii, et ükskõik millise kontuuri jaoks säiliks seos $\Sigma E_k = \text{const}$ muutumatuna. Seda saab ära kasutada vaid emj sisaldava haru teisendamiseks (joon. 2.15a).

Seega võib kõigisse ühise sõlme külge ühendatud harudesse viia sisse võrdsed elektromotoorjõud nii, et nad on sõlme suhtes ühtmoodi suunatud (joon. 2.15b) – sõlm A.

Kui valida $E' = E$, siis harus A-B nad kompenseerivad teineteist ja $\varphi_A = \varphi_B$ ning sõlmed A ja B võib omavahel ühendada ühiseks punktiks AB (joon. 2.15c):

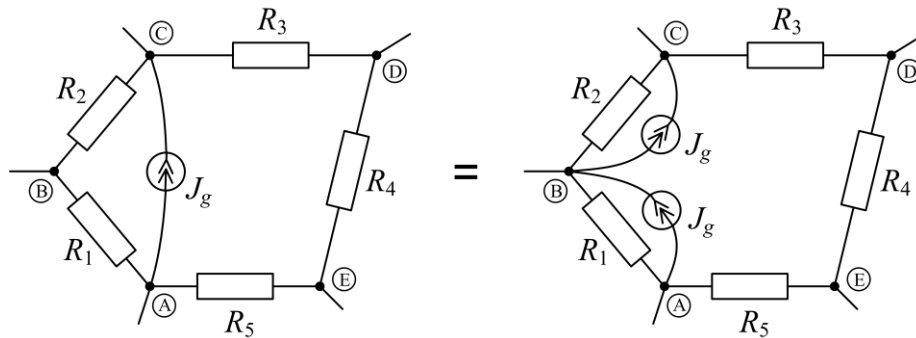
Sel viisil on skeemi **struktuur** lihtsustunud – on elimineeritud haru A-B.

Näide: Elektromotoorjõuga haru teisendamine vähendab sõlmede arvu ühe võrra.



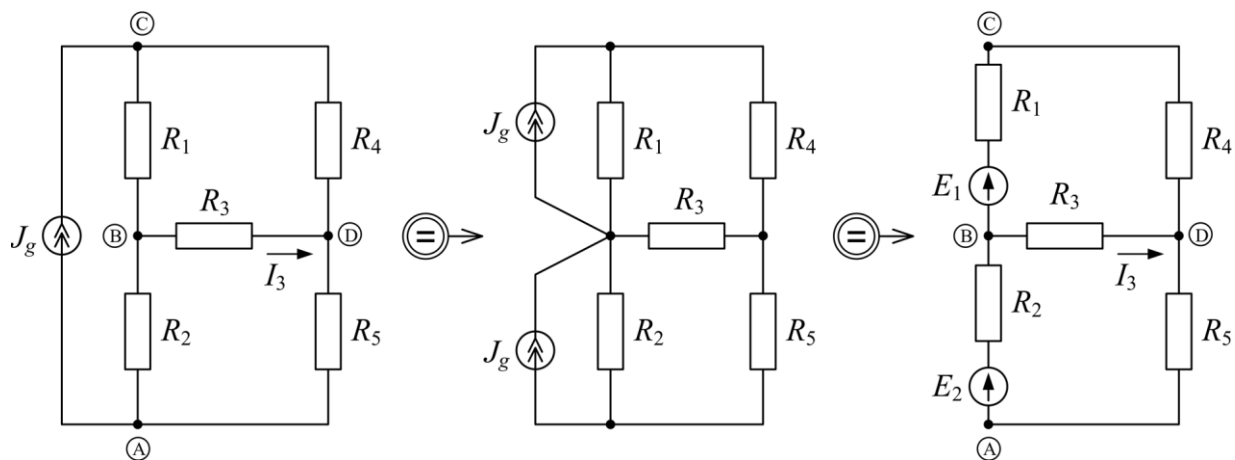
b) Asendus vooluallikas $\rightarrow$ emj allikas

Vaatleme skeemi joonisel 2.16. Siit järeldub, et **vooluallikas** võib olla asendatud mitme vooluallikaga, mis on ühendatud rööbiti kõigi takistustega, mis moodustavad kontuuri antud vooluallikaga (sõlmedega A ja C).



Joonis 2.16. Vooluallika mõju jaotamine teekonna harudele.

Näide: Leida vool I_3 .



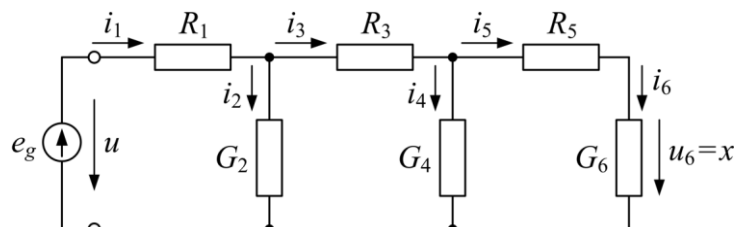
Joonis 2.17. Elektri ahela voolude arvutamine vooluallika teisendamise meetodil.

Siinjuures $E_1 = R_1 \cdot J_g$ ja $E_2 = R_2 \cdot J_g$. Siit on juba lihtne määrata I_3 .

2.6 Võrdeliste suuruste meetod

Selle meetodi aluseks on lineaarsete võrrandite lahendite **1. omadus**, millest oli juttu p. 1.6 (kui signaali suurendada K korda, st $e_g \rightarrow K \cdot e_g$, siis muutuvad ka reaktsioonid K korda).

Vaatleme võrdeliste suuruste meetodit näite alusel takistuste ahellülituse korral (skeem joon. 2.18).



Joonis 2.18. Elektri ahela skeem võrdeliste suuruste meetodi rakendamiseks.

Alustame analüüsi energiaallikast kõige kaugemal asuvast harust, millel tähistame otsitava pinge $u_6 = x$, ja liigume mööda ahelat voolude ja pingete avaldise välja tuues toiteallika suunas. Seega on:

$$u_6 = x; \quad i_6 = G_6 \cdot x;$$

$$i_5 = i_6 = G_6 \cdot x;$$

$$u_4 = R_5 \cdot i_5 + u_6 = (R_5 \cdot G_6 + 1) \cdot x;$$

$$\begin{aligned}
i_4 &= G_4 \cdot u_4 = G_4 (R_5 \cdot G_6 + 1) \cdot x; \\
i_3 &= i_4 + i_5 = [G_4 (R_5 \cdot G_6 + 1) + G_6] \cdot x; \\
u_2 &= R_3 \cdot i_3 + u_4 = \{R_3 [G_4 (R_5 \cdot G_6 + 1) + G_6] + (R_5 \cdot G_6 + 1)\} x \\
&= [(R_3 \cdot G_4 + 1)(R_5 \cdot G_6 + 1) + R_3 \cdot G_6] x; \\
i_2 &= G_2 \cdot u_2 = G_2 [(R_3 \cdot G_4 + 1)(R_5 \cdot G_6 + 1) + R_3 \cdot G_6] x; \\
i_1 &= i_2 + i_3 = \{G_2 [(R_3 \cdot G_4 + 1)(R_5 \cdot G_6 + 1) + R_3 \cdot G_6] + G_4 (R_5 \cdot G_6 + 1) + G_6\} x; \\
u &= R_1 \cdot i_1 + u_2 = R_1 \{G_2 [(R_3 \cdot G_4 + 1)(R_5 \cdot G_6 + 1) + R_3 \cdot G_6] + G_4 (R_5 \cdot G_6 + 1) + G_6\} x \\
&\quad + [(R_3 \cdot G_4 + 1)(R_5 \cdot G_6 + 1) + R_3 \cdot G_6] x \\
&= \{[(R_3 \cdot G_4 + 1)(R_5 \cdot G_6 + 1) + R_3 \cdot G_6] (R_1 \cdot G_6 + 1) + R_1 [G_4 (R_5 \cdot G_6 + 1) + G_6]\} x.
\end{aligned}$$

See on **sisendpinge** üldavaldis, sealjuures **sisendtakistus**:

$$\begin{aligned}
R &= R_{ekv} = \frac{u}{i_1} = R_1 + \frac{u_2}{i_1} \\
&= R_1 + \frac{(R_3 \cdot G_4 + 1)(R_5 \cdot G_6 + 1) + R_3 \cdot G_6}{G_2 [(R_3 \cdot G_4 + 1)(R_5 \cdot G_6 + 1) + R_3 \cdot G_6] + G_4 (R_5 \cdot G_6 + 1) + G_6}.
\end{aligned}$$

Üldistatud pinge ülekanategur:

$$K_U = \frac{u_i}{u_{toide}}; \quad K_{U6} = \frac{u_6}{u}; \quad U_6 = K_{U6} \cdot u = K_{U6} \cdot e$$

ehk meie tähiste korral $x = K_{U6} \cdot e$, aga pinge ülekanategur avaldub takistuste-juhtivuste kaudu, vt valem $u = R_1 \cdot i_1 + u_2 = \{ \dots \} \cdot x = \frac{1}{K_{U6}} \cdot x$.

Seega saame leida $x = K_{U6} \cdot e$ ja edasi x kaudu avaldada kõik ülejäänud voolud ja pinged (nende avaldistes on x sees).

Teine variant – selle meetodi kohaselt antakse ette $u_6' = x = 1$ V (näiteks) või $i_5' = i_6' = 1$ A (näiteks), mille kaudu leitakse skeemi toitepinge u' (vastavana valitud u_6' või i_5' väärtusele). Kuna tegelikult $u \neq u'$, saadakse võrdelisustegur $K = u/u' = e/u'$, millega tuleb läbi korrutada kõik varem leitud voolud ja pinged ($i_i = i_i' \cdot K$ ja $u_j = u_j' \cdot K$).

Kui vajame ainult **ahellülituse sisendtakistuse** väärtust (joon. 2.18), võime kasutada valemit:

$$R = R_{sis} = R_{ekv} = R_1 + \frac{1}{G_2 + \frac{1}{R_3 + \frac{1}{G_4 + \frac{1}{R_5 + \frac{1}{G_6}}}}}. \quad (2.27)$$

Lugedes seda valemit lõpust alguse suunas, näeme vastavust segaühenduses (jada-rööpühendused) ahela teisendusreeglitele.

2.7 Hargnevate ahelate arvutamine Kirchhoffi I ja II seaduse abil

Kui elektrialhel ei ole teisendatav lihtsaks segaühenduseks, võib ahela analüüsi teha Kirchhoffi seaduste alusel koostatud **võrrandisüsteemi** lahendamise teel.

Võrrandite arv võrrandisüsteemis peab olema sama suur, kui on tundmatute **voolude** arv, s.o skeemi **harude** arv ($N_{ix} = N_h$).

Kui elektriahelas on harud **ideaalsete vooluallikatega** – nendes on vool sõltumatu, teadaolev suurus –, siis nende harude arvu võrra on võrrandisüsteemi võrrandite arv väiksem ($N_{ix} = N_h - N_J$).

Sõltumatute võrrandite arv Kirchhoffi I ja II seaduse põhjal:

$$N_{KI} = N_s - 1 \quad (\text{ühe võrra väiksem sõlmede arvust})$$

$$N_{KII} = N_h - (N_s - 1) - N_J$$

$$N_{KI} + N_{KII} = N_{ix}$$

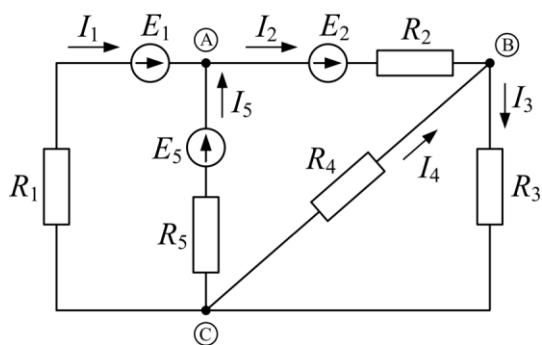
Kuidas koostada võrrandisüsteemi Kirchhoffi võrranditest?

- Valida haruvoolude **arvutuslikud positiivsed suunad** ja tähistada need skeemil nooltega.
- Jättes ühe sõlme vaatluse alt välja (**baassõlm**), koostada ülejäänud sõltumatute sõlmede kohta Kirchhoffi I seaduse põhjal võrrandid $\sum_{k=1}^n i_k = 0$.
- Valime skeemis N_{KII} sõltumatut kontuuri ja tähistame nende suunad nooltega; **vooluallikatega harud ei kuulu** kontuuridesse, **kõik ülejäänud harud** peavad kuuluma igaüks vähemalt ühte kontuuri.
- Kirchhoffi II seaduse põhjal kirjutada välja valitud kontuuride kohta Kirchhoffi II seaduse alusel võrrandid, arvestades **pingelangude ja elektromotoorjõudude suundi** kontuuri suuna suhtes.

Võrrandisüsteemi lahendamisel määratakse kõik tundmatud **haruvoolud** ja saadakse teada nende **tegelikud suunad** (märk "+" või "-" valitud suuna suhtes).

Kirchhoffi seaduste põhjal keerukama struktuuriga elektriahelate arvutamisel on probleemiks **suure mahuga võrrandisüsteemi** lahendamise vajadus. **Võrrandite arvu** saab vähendada elektriahela arvutamisel **kontuurvoolumeetodil** ja **sõlmepingemeetodil**, mis mõlemad tulenevad Kirchhoffi II ja I seadusest.

Näide (Kirchhoffi seaduste kohta):



$$E_1 = E_s = 100 \text{ V}$$

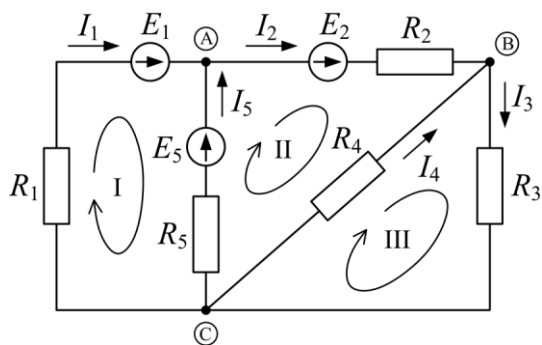
$$E_2 = 50 \text{ V}$$

$$R_1 = R_3 = 5 \Omega$$

$$R_2 = R_4 = R_5 = 10 \Omega$$

$$N_{KI} = N_s - 1 = 2$$

$$N_{KII} = 5 - (3 - 1) = 3$$



Joonis 2.19. Elektrihaelas voolude arvutamine Kirchhoffi seaduste abil.

Võrrandid:

K I

$$\text{A} \quad -I_1 + I_2 - I_5 = 0$$

$$\text{B} \quad -I_2 + I_3 - I_4 = 0$$

K II

$$\text{I} \quad R_1 I_1 - R_1 I_5 = E_1 - E_5$$

$$\text{II} \quad R_2 I_2 - R_4 I_4 + R_5 I_5 = E_2 + E_5$$

$$\text{III} \quad R_3 I_3 + R_4 I_4 = 0$$

Tuleb lahendada 5-st võrrandist süsteem.

Lihtsustame, viies süsteemist välja I_4 ja I_5 :

$$I_4 = I_3 - I_2;$$

$$I_5 = I_2 - I_1.$$

Siis võrrandisüsteem jääb kujul:

$$R_1 I_1 - R_5 (I_2 - I_1) = E_1 - E_5;$$

$$R_2 I_2 - R_4 (I_3 - I_2) + R_5 (I_2 - I_1) = E_2 + E_5;$$

$$R_3 I_3 + R_4 (I_3 - I_2) = 0$$

ehk teisiti

$$(R_1 + R_5) I_1 - R_5 I_2 = E_1 - E_5;$$

$$-R_5 I_1 + (R_2 + R_4 + R_5) I_2 - R_4 I_3 = E_2 - E_4;$$

$$-R_4 I_2 + (R_3 + R_4) I_3 = 0.$$

Asendame kordajate väärtused:

$$15 \cdot I_1 - 10 \cdot I_2 = 0 \quad |:5$$

$$-10 \cdot I_1 + 30 \cdot I_2 - 10 \cdot I_3 = 150 \quad |:10$$

$$-10 \cdot I_2 + 15 \cdot I_3 = 0 \quad |:5$$

$$I_1 = \frac{\begin{vmatrix} 0 & -2 & 0 \\ 15 & 3 & -1 \\ 0 & -2 & 3 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 3 & -2 & 0 \\ -1 & 3 & -1 \\ 0 & -2 & 3 \end{vmatrix}} = \frac{-15 \cdot (-3) \cdot 3}{3 \cdot 3 \cdot 3 - (-1)(-2) \cdot 3 - 3 \cdot (-1)(-2)} = \frac{90}{27 - 6 - 6} = 6 \text{ A};$$

$$I_2 = \frac{1}{\Delta} \begin{vmatrix} 3 & 0 & 0 \\ -1 & 15 & -1 \\ 0 & 0 & 3 \end{vmatrix} = 9 \text{ A};$$

$$I_3 = \frac{1}{\Delta} \begin{vmatrix} 3 & -2 & 0 \\ -1 & 3 & 15 \\ 0 & -2 & 0 \end{vmatrix} = 6 \text{ A};$$

$$I_4 = I_3 - I_2 = 6 - 9 = -3 \text{ A};$$

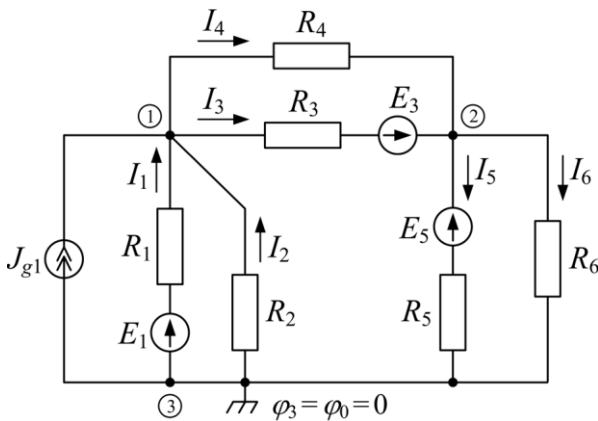
$$I_5 = I_2 - I_1 = 9 - 6 = 3 \text{ A}.$$

2.8 Sõlmepingete (-potentsiaalide) meetod

Elektriahela iga haru vool on määratav Ohmi seadusega, kui on teada haru takistus ja emj ning haru otstel **potentsiaalide vahe** (pinge). **Sõlmepingete meetodi** korral määratakse Kirchhoffi I seaduse baasil sõltumatute sõlmede **potentsiaalid baassõlme suhtes**, potentsiaalide kaudu seejärel voolu- jaotus elektriahelas.

Oletame, et skeemis on N_s sõlme. Ühe suvalise sõlme võime valida baassõlmeks, lugedes tema kohta potentsiaali võrdseks 0-ga (kui potentsiaal pole määratud maandusega). Selle **sõlme suhtes** saame Kirchhoffi I seaduse põhjal ülejäänud $(N_s - 1)$ sõlme kohta välja kirjutada võrrandisüsteemi.

Näiteks vaatleme järgmist skeemi (joon. 2.20).



Joonis 2.20. Elektriahela arvutamine sõlmepotentsiaalide meetodil.

Valime baassõlmeks sõlme 3, olgu tema potentsiaal $\varphi_3 = \varphi_0 = 0$.

3-nda sõlme suhtes 1. ja 2. sõlme jaoks võime kirjutada:

$$G_i = \frac{1}{R_i};$$

$$\text{sõlm 1} \quad -J_{g1} - I_1 - I_2 + I_3 + I_4 = 0;$$

$$\text{sõlm 2} \quad -I_3 - I_4 + I_5 + I_6 = 0$$

ehk teisiti, avaldades haruvoolud Ohmi seadusest:

$$i_{km} = g_{km}(\varphi_k - \varphi_m + e_{km});$$

$$\text{sõlm 1} \quad -J_{g1} - (-\varphi_1 G_1 + E_1 G_1) - (-\varphi_1 G_2) + [(\varphi_1 - \varphi_2) G_3 + E_3 G_3] + (\varphi_1 - \varphi_2) G_4 = 0;$$

$$\text{sõlm 2} \quad -[(\varphi_1 - \varphi_2) G_3 + E_3 G_3] - (\varphi_1 - \varphi_2) G_4 + (\varphi_2 G_5 + E_5 G_5) + \varphi_2 G_6 = 0$$

ehk siit edasi:

$$\begin{cases} \varphi_1 (G_1 + G_2 + G_3 + G_4) - \varphi_2 (G_3 + G_4) = J_{g1} + E_1 G_1 - E_3 G_3 = J_{11}; \\ -\varphi_1 (G_3 + G_4) + \varphi_2 (G_3 + G_4 + G_5 + G_6) = E_3 G_3 - E_5 G_5 = J_{22}. \end{cases}$$

Nii saame võrrandisüsteemi potentsiaalide φ_i määramiseks, kusjuures võrrandite arv on $(N_s - 1)$, antud juhul kaks võrrandit. Kirjutame saadud võrrandid ümber uute tähistega:

$$\begin{cases} \text{sõlm 1} & \varphi_1 G_{11} - \varphi_2 G_{12} = J_{11}; \\ \text{sõlm 2} & -\varphi_1 G_{21} + \varphi_2 G_{22} = J_{22}, \end{cases}$$

kus G_{11} ; G_{22} ; G_{nn} – sõlme juhtivus, s.o kõigi vaadeldava sõlme külge ühendatud elektriahela harude juhtivuste summa (aritmeetiline);

G_{12} ; G_{kl} – sõlmede k ja l vaheliste harude juhtivuste summa;

J_{11} ; J_{22} ; J_{nn} – sõlmevool, s.o algebraline summa kõigi sõlme külge ühendatud harude elektromotoorjõudude ja vooluallikate ühismõjust.

Üldjuhul võrrandisüsteemi kuju on:

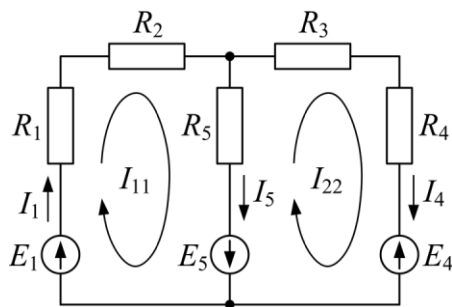
$$\begin{cases} \varphi_1 G_{11} - \varphi_2 G_{12} - \varphi_3 G_{13} - \dots - \varphi_n G_{1n} = J_{11}; \\ -\varphi_1 G_{21} + \varphi_2 G_{22} - \varphi_3 G_{23} + \dots - \varphi_n G_{2n} = J_{22}; \\ \dots \quad \dots \quad \dots \\ -\varphi_1 G_{n1} - \varphi_2 G_{n2} - \varphi_3 G_{n3} - \dots + \varphi_n G_{nn} = J_{nn}. \end{cases}$$

Arvestades, et sõlmepunktide pinge baassõlme suhtes on $U_{i0} = \varphi_i - \varphi_{i0}$ ja $\varphi_0 = 0$, seega $U_{i0} = \varphi_i$, saame sõlmepingetele võrrandisüsteemi:

$$\begin{cases} U_{10} G_{11} - U_{20} G_{12} - U_{30} G_{13} - \dots - U_{n0} G_{1n} = J_{11}; \\ -U_{10} G_{21} + U_{20} G_{22} - U_{30} G_{23} - \dots - U_{n0} G_{2n} = J_{22}; \\ \dots \quad \dots \quad \dots \\ -U_{10} G_{n1} - U_{20} G_{n2} - U_{30} G_{n3} - \dots + U_{n0} G_{nn} = J_{nn}. \end{cases}$$

2.9 Kontuurvoolude meetod

Kontuurvoolude meetod põhineb elektriavala voolujaotuse määramisel Kirchhoffi II seaduse baasil koostatud võrrandisüsteemile, kuhu on sisse toodud kontuurvoolude mõiste. Kontuuride valik toimub analoogselt Kirchhoffi II seadusele. Vaatleme näiteks skeemi joonisel 2.21. Kirjutame I ja II kontuuri kohta välja Kirchhoffi II seaduse põhjal võrrandid:



Joonis 2.21. Elektriavala skeemi analüüs kontuurvoolude abil.

$$I \text{ kontuur: } (R_1 + R_2) I_{11} + R_5 I_5 = E_1 + E_5;$$

$$II \text{ kontuur: } -R_5 I_5 + (R_3 + R_4) I_{22} = -E_4 - E_5.$$

Kuna haruvoolud on

$$I_1 = I_{11}; \quad I_4 = I_{22}; \quad I_5 = I_{11} - I_{22},$$

siis saab kirjutada:

$$I \text{ kontuur: } (R_1 + R_2) I_{11} + R_5 (I_{11} - I_{22}) = E_1 + E_5;$$

$$II \text{ kontuur: } -R_5 (I_{11} - I_{22}) + (R_3 + R_4) I_{22} = -E_4 - E_5$$

ehk teisiti:

$$\begin{cases} I \text{ kontuur: } I_{11} (R_1 + R_2 + R_5) + I_{22} (-R_5) = E_1 + E_5; \\ II \text{ kontuur: } I_{11} (-R_5) + I_{22} (R_3 + R_4 + R_5) = -E_4 - E_5 \end{cases}$$

või lõpuks üldkujul:

$$\begin{cases} I_{11} R_{11} + I_{22} R_{12} = E_{11}; \\ I_{11} R_{21} + I_{22} R_{22} = E_{22}, \end{cases}$$

kus $R_{11}; R_{ii}$ – kontuuri omataktus (summa kõikidest kontuuri elementide takistustest);

R_{ik} – kontuuride i ja k vastastikune takistus (ühisosa takistus); $R_{ik} > / < 0$.

E_{ii} – kontuuri elektromotoorjõud ehk algebraline summa kõigist elektromotoorjõududest kontuuri suuna suhtes.

Võrrandisüsteemi üldkuju:

$$\begin{cases} I_{11} R_{11} + I_{22} R_{12} + I_{33} R_{13} + \dots + I_{nn} R_{1n} = E_{11}; \\ I_{11} R_{21} + I_{22} R_{22} + I_{33} R_{23} + \dots + I_{nn} R_{2n} = E_{22}; \\ \dots \quad \dots \quad \dots \\ I_{11} R_{n1} + I_{22} R_{n2} + I_{33} R_{n3} + \dots + I_{nn} R_{nn} = E_{nn}. \end{cases}$$

Kui on n võrrandi süsteem, siis üldlahend avaldub

$$I_{kk} = E_{11} \frac{\Delta_{k1}}{\Delta} + E_{22} \frac{\Delta_{k2}}{\Delta} + E_{33} \frac{\Delta_{k3}}{\Delta} + \dots + E_{nn} \frac{\Delta_{kn}}{\Delta},$$

kus

$$\Delta = \begin{vmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & \dots^k & R_{1n} \\ R_{21} & & & \dots & \\ \dots^m & \dots & \dots & \dots & \dots \\ R_{n1} & R_{n2} & & \dots & R_{nn} \end{vmatrix}$$

on võrrandisüsteemi **peadeterminant** (kordajate ehk takistusmaatriks).

Peadeterminandi algebraline täiend Δ_{kn} saadakse determinandist, kui seal maha kriipsutada k -nda veeru ja m -nda rea elemendid ja saadud maatriks korrutada suurusega $(-1)^{k+m}$. Takistusmaatriks on diagonaalsümmeetriline. Selle alusel saab kinnitada, et $\Delta_{km} = \Delta_{mk}$.

2.10 Võimsuste bilanss

Kui vool läbib resistiivset ahelaelementi, tekib ja eraldub takistil soojusenergiat. Energia tasakaalu põhimõtte alusel peab elektriahela resistiivsetel elementidel eralduv soojusenergia võrduma energiaallikate poolt elektriahelasse antava kogueenergiaga.

Resistiivelementidel eralduv soojuslik võimsus avaldub

$$P_{Ri} = I_i^2 R_i,$$

kus $P_{Ri} > 0$.

Elektromotoorjõu poolt arendatav võimsus on kirjutatav

$$P_{Ei} = E_i I_i,$$

kusjuures $P_{Ei} = E_i I_i$ on positiivne või negatiivne vastavalt E_i ja I_i omavahelisele suunatusele (generaator või tarbija).

Ideaalse vooluallika poolt ahelasse eraldatav võimsus on

$$P_{Ji} = J_g U_{ab}$$

kus U_{ab} on pinge sõlmede vahel, mille kaudu vooluallikas rakendub skeemile. Kui vooluallika vool siseneb sõlme a ja väljub sõlmest b , siis on vooluallika arvutuslik võimsus $P_{Ji} > 0$.

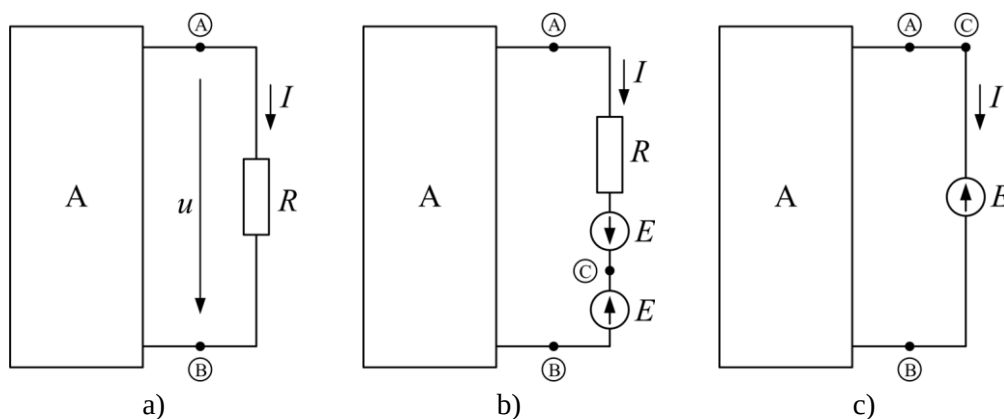
Summaarne **võimsuste bilansi avaldis**

$$\sum_{i=1}^n I_i^2 R_i = \sum_{i=1}^k E_i I_i + \sum_{i=1}^m J_{gi} U_{kl}.$$

2.11 Kompensatsiooniteoreem

|| Igas elektriahelas võib resistiivse elemendi asendada elektromotoorjõuga, mille arvvärtus on ||
|| võrdne pingelanguga asendataval takistil ja suunatud vooluga võrreldes vastassuunas. ||

Sealjuures voolujaotus ahela ülejäänud osas ei muutu. Vaatleme R -haru, milles on vool I , ülejäänud skeemi tähistame tinglikult riskülikuga (joon. 2.22a).



Joonis 2.22. Kompensatsiooniteoreemi rakendamine kaks клемmi välisarus.

Sellesse harusse võime lisada kaks vastassuunalist võrdset emj-allikat, see ei muuda voolujaotuses midagi. Valime $E = I \cdot R$. Veendume, et potentsiaali vahe punktide A ja C vahel on siis 0:

$$\varphi_C = \varphi_A - IR + E = \varphi_A - IR + IR = \varphi_A$$

ehk

$$\varphi_C - \varphi_A = 0.$$

Seega võime sõlmed A ja C ühendada, s.o lühistada lõigu A-C. Saame lõpliku skeemi, mis on joonisel 2.22c.

2.12 Superpositsiooni printsiip

Kontuurvoolumeetodil kontuurvoolu üldavaldises $I_{kk} = f(E_{11}, E_{22}, \dots, E_{nn})$. Kui kirjutada kontuuride elektromotoorjõud E_{11}, E_{22} jne välja üksikute elektromotoorjõudude algebralise summana ja grupeerida avaldiste liikmed üksikute elektromotoorjõudude kaupa, saame I_{kk} üldavaldise **liidetavate reana**, kus igal liidetaval on kordajaks ühe või teise allika emj:

$$I_k = I_{kk} = E_1 G_k + E_2 G_{k2} + E_3 G_{k3} + \dots + E_k G_{kk}.$$

Siit saab järeldada, et **kontuurvool** mistahes kontuuris võrdub nende üksikvoolude summaga, mis on igaüks eraldi tekitatud iga eralditoimiva emj allika poolt. Et aga alati saab kontuure vaadelda nii, et läbi haru sulgub vaid üks kontuur, siis haruvool võrdub kontuurvooluga.

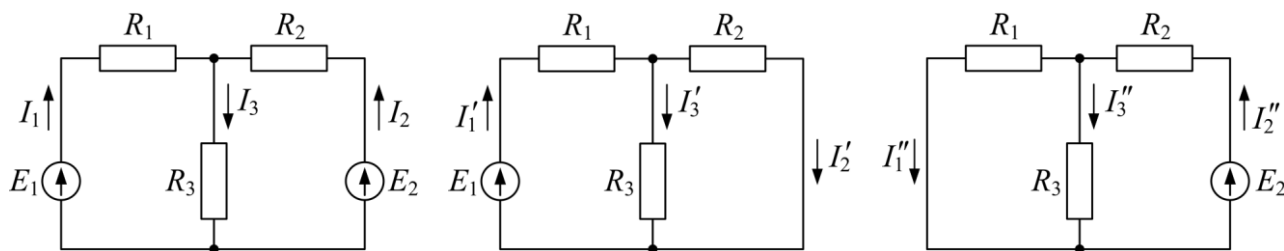
Siit järeldub **superpositsiooni printsiip**:

|| Iga haruvool on vaadeldav voolukomponentide summana, mis on tekitatud iga elektro- ||
|| mootorjõu allika poolt eraldi selles harus. ||

Kehtib **lineaarsete konstantsete parameetritega** ahelate korral vaid voolude kohta. **Võimsuste kohta ei kehti**, sest need on voolu ruutfunktsioonid.

Superpositsiooni printsiip lubab tükeldada keeruka elektriahela lahendamise mitme lihtsama alaskeemi lahendamiseks, kusjuures igaühes avaldab vaadeldavale liitahelale mõju vaid üks emj, kõik teised emj allikad eeldame sealjuures olevat lühistatud.

Näide:



Joonis 2.23. Elektromotoor-
jõudude mõju superponeerimine
haruvoolude arvutamisel.

a)

b)

$$a) \quad I'_1 = \frac{E_1}{R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}} = \frac{E_1 (R_2 + R_3)}{D}; \quad I'_2 = I'_1 \cdot \frac{R_3}{R_2 + R_3} = \frac{E_1 R_3}{D}; \quad I'_3 = I'_1 \cdot \frac{R_2}{R_2 + R_3} = \frac{E_1 R_2}{D};$$

$$b) \quad I''_2 = \frac{E_2}{R_2 + \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3}} = \frac{E_2 (R_1 + R_3)}{D}; \quad I''_1 = I''_2 \cdot \frac{R_3}{R_1 + R_3} = \frac{E_2 R_3}{D}; \quad I''_3 = I''_2 \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_3} = \frac{E_2 R_1}{D}.$$

Järelikult **tegelikud voolud** harudes on

$$I_1 = I'_1 - I''_1 = \frac{E_1 (R_2 + R_3) - E_2 R_3}{D};$$

$$I_2 = I''_2 - I'_2 = \frac{E_2 (R_1 + R_3) - E_1 R_3}{D};$$

$$I_3 = I'_3 + I''_3 = \frac{E_1 R_2 + E_2 R_1}{D}.$$

2.13 Vastastikkuse printsiip

Vaatleme keerukama struktuuriga lineaarse elektriiahela kahte haru a-b ja c-d, kusjuures sõltumatud kontuurid valime nii, et haru a-b sisalduks ainult k -ndas kontuuris ja haru c-d ainult m -ndas kontuuris. Seda tingimust on kahe haru puhul alati võimalik täita. Võrdusest $\Delta_{mk} = \Delta_{km}$ järeldeb siis **vastastikkuse printsiip**, mille pakkus välja Maxwell ja mis väidab:

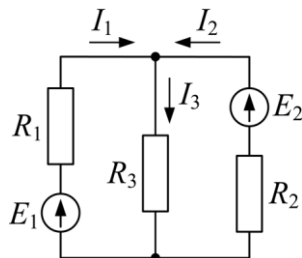
|| Kui elektromotoorjõud $E_{ab} = E$ toimides ahela harus a-b tekitab **teiste elektromotoorjõudude puudumisel** sama ahela harus c-d voolu $I_{cd} = I$, siis samasugune elektromotoorjõud $E_{cd} = E$, toimides harus c-d, tekitab **teiste elektromotoorjõudude puudumisel** harus a-b esile samasuguse voolu $I_{cb} = I$. ||

Tõepoolest, võrdustest

$$I_{ab} = I_{kk} = E \frac{\Delta_{km}}{\Delta} \quad \text{ja} \quad I_{cd} = I_{mm} = E \frac{\Delta_{mk}}{\Delta}$$

järeldub, et $I_{ab} = I_{cd}$, sest $\Delta_{km} = \Delta_{mk}$.

Näide:



Joonis 2.24. Vastastikkuse printsiibi
rakendumine harude 1 ja 2 vahel.

Kui $E_1 = 0$ ja $E_2 = E$, siis

$$I_1 = \frac{-E \cdot R_3}{D};$$

kui $E_2 = 0$ ja $E_1 = E$, siis

$$I_2 = \frac{-E \cdot R_3}{D}.$$

2.14 Harude sisend- ja vastastikused juhtivused

Superpositsiooni printsiibi alusel võime avaldada suvalise haruvoolu I_k lineaarse elektriiahela harus järgmisel kujul:

$$I_k = E_1 g_{k1} + E_2 g_{k2} + E_3 g_{k3} + \dots + E_k g_{kk} + \dots + E_m g_{km}.$$

Siin $E_1, E_2, \dots, E_m$ on emj-d 1., 2., ..., m -ndas harus. I_k avaldises iga E_m kordaja on juhtivuslik suurus ja väljendab vastavalt **harudevahelist juhtivust** (g_{ki}) või **haru sisendjuhtivust** (g_{kk}) haru k suhtes.

Sisend- ja vastastikuste juhtivuste arvulised väärtused saame määrata järgmiselt. Sisaldagu vaadeldav skeem vaid **üht** emj allikat E_k (kõik ülejäänud emj allikad lühistame). Siis

$$I_k = E_k \cdot g_{kk},$$

millest

$$g_{kk} = \frac{I_k}{E_k},$$

seega haru **sisendjuhtivus** on avaldunud haru tekkiva voolu suhtena seda voolu tekitava sama haru emj-i E_k suhtes, kui ülejäänud ahela emj-d on lühistatud.

Sama emj E_k tekitab üldjuhul samal ajal ka voolud skeemi teistes haruses, sealhulgas näiteks m -ndas harus voolu I_m , mis avaldub

$$I_m = E_k \cdot g_{mk},$$

sest

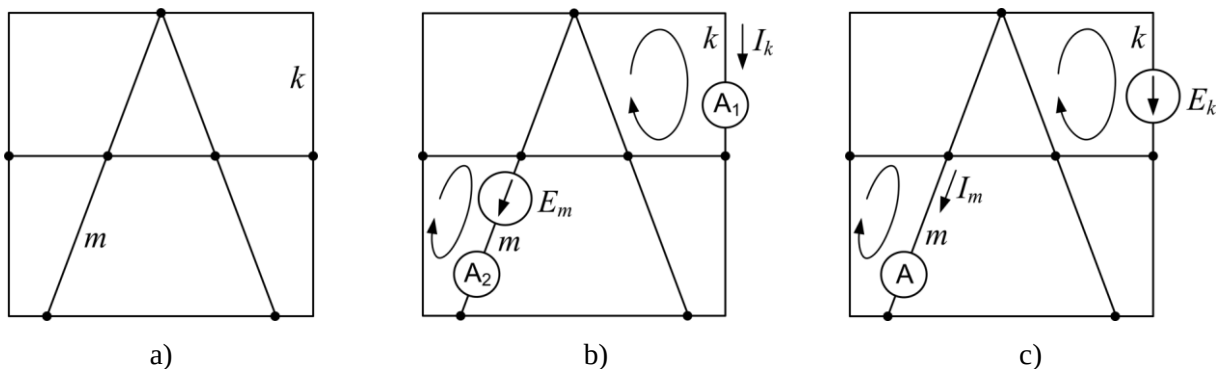
$$g_{mk} = \frac{I_m}{E_k}.$$

Sealjuures $g_{mk} = g_{km}$ (vastastikkuse printsiip).

Kui võtta $E_k = 1$ V, siis on juhtivused arvuliselt võrdsed vastava vooluga:

$$g_{kk} = I_k \quad \text{ja} \quad g_{mk} = I_m.$$

a) Sisend- ja vastastikuse juhtivuse katseline määramine (g_{mm} ja g_{km} , skeem joon. 2.25a)



Joonis 2.25. Elektri ahela skeemi näide sisend- ja vastastikuse juhtivuse määramiseks.

Joonis 2.25b – m -ndasse harusse ühendame emj E_m , k -ndasse harusse ampermeetri, mis mõõdab voolu I_k . Siit

$$g_{km} = \frac{I_k}{E_m}.$$

Kui mõõdame E_m toimel tekkiva voolu I_m , siis sisendjuhtivus

$$g_{mm} = \frac{I_m}{E_m}.$$

Joonised 2.25b ja c – vastastikkuse printsiip.

b) Sisend- ja vastastikuse juhtivuse arvutuslik määramine

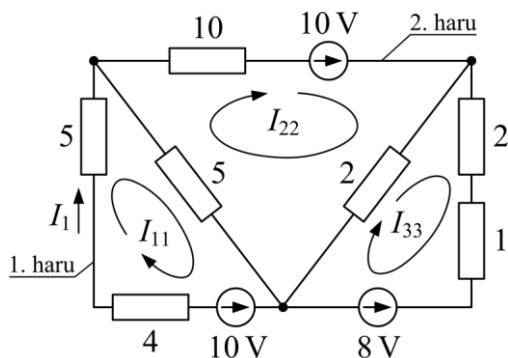
Kontuurvoolumeetodil valime kontuurid nii, et vaadeldavad harud k ja m kuuluksid kumbki vaid oma kontuuri (s.o $I_k = I_{kk}$ ja $I_m = I_{mm}$ kontuurvoolumeetodil).

Siis juhtivused avalduvad:

$$g_{mm} = \frac{\Delta_{mm}}{\Delta} \quad \text{ja} \quad g_{km} = \frac{\Delta_{km}}{\Delta},$$

kus Δ on süsteemi peadeterminant ja Δ_{mm} ning Δ_{km} selle algebralised täiendid.

Näide:



Joonis 2.26. Elektrialhel sisend- ja vastastikuste juhtivuste arvutamiseks.

Võrrandisüsteem:

$$\begin{cases} 14I_{11} - 5I_{22} = -10; \\ -5I_{11} + 17I_{22} - 2I_{33} = 10; \\ -2I_{22} + 5I_{33} = -8. \end{cases}$$

Peadeterminant:

$$\Delta = \begin{vmatrix} 14 & -5 & 0 \\ -5 & 17 & -2 \\ 0 & -2 & 5 \end{vmatrix} = 1009.$$

$$\Delta_{11} = \begin{vmatrix} 17 & -2 \\ -2 & 5 \end{vmatrix} \cdot (-1)^{1+1} = 81;$$

$$\Delta_{12} = \begin{vmatrix} -5 & -2 \\ 0 & 5 \end{vmatrix} \cdot (-1)^{1+2} = 25.$$

Seega sisendjuhtivus

$$g_{11} = \frac{\Delta_{11}}{\Delta} = \frac{81}{1009} = 0,0803 \text{ S}$$

ja vastastikune juhtivus

$$g_{12} = \frac{\Delta_{12}}{\Delta} = \frac{25}{1009} = 0,0248 \text{ S}.$$

$$\Delta_{13} = \begin{vmatrix} -5 & 17 \\ 0 & -2 \end{vmatrix} \cdot (-1)^{1+3} = 10; \quad g_{13} = 0,00991 \text{ S}.$$

Siit vool

$$I_1 = -E_1 g_{11} + E_2 g_{12} - E_3 g_{13} = -10 \cdot 0,0803 + 10 \cdot 0,0248 - 8 \cdot 0,00991 = -0,634 \text{ A}.$$

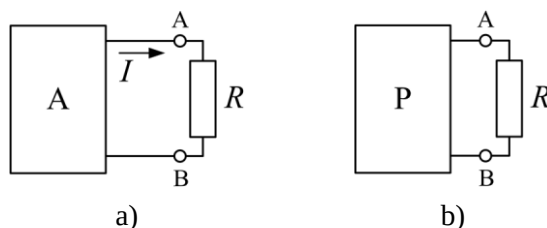
Kontrolliks leiame selle voolu ka kontuurvoolumeetodil:

$$I_1 = I_{11} = \frac{\Delta_{11}}{\Delta} = \frac{\begin{vmatrix} -10 & -5 & 0 \\ 10 & 17 & -2 \\ -8 & -2 & 5 \end{vmatrix}}{\Delta} = \frac{-850 - 80 + 40 + 250}{1009} = \frac{-640}{1009} = -0,634 \text{ A}.$$

2.15 Aktiivne ja passiivne kaksiklemm

Igasuguse elektrialhela korral võime mõtteliselt temast välja tuua ühe haru, aga ülejäänud skeemiosa (olgu see kuitahes keeruline, suvalise struktuuriga) võime kujutada ristkülikuna (joon. 2.27). Välja-

toodud haru suhtes ülejäänud skeemiosa, mida kujutame riskülikuna, nimetatakse **kaksklemmiks**. Seega **kaksklemm** on üldistatud skeemi nimetus, mis oma kahe klemmi (pooluse) abil on ühenda-
tud eraldi väljatoodud haru külge.



Joonis 2.27. Elektriahelat välisharu suhtes kirjeldav aktiivne (a) ja passiivne (b) kaksklemm.

Kui kaksklemm **sisaldab** emj- või vooluallikaid, siis on see **aktiivne kaksklemm**, tähistame risküliku sees A-tähga.

Kui kaksklemm **ei sisalda** emj- või vooluallikaid, siis on see **passiivne kaksklemm**, tähistame risküliku sees P-tähga.

Passiivse kaksklemmi iseloomulik parameeter on sisendtakistus klemmide A-B suhtes R_{sis} (R_{ABekv}).

Aktiivse kaksklemmi iseloomulikeks parameetriteks on sisendtakistus R_{sis} klemmide A-B suhtes ja katkestatud klemmide A-B vahel tühijooksupinge U_0 või samade klemmide lühistamisel nende vahel lühisvool I_l . Mõnikord räägime ka sisendjuhtivusest $G_{sis} = 1/R_{sis}$.

2.16 Ekvivalentse generaatori meetod

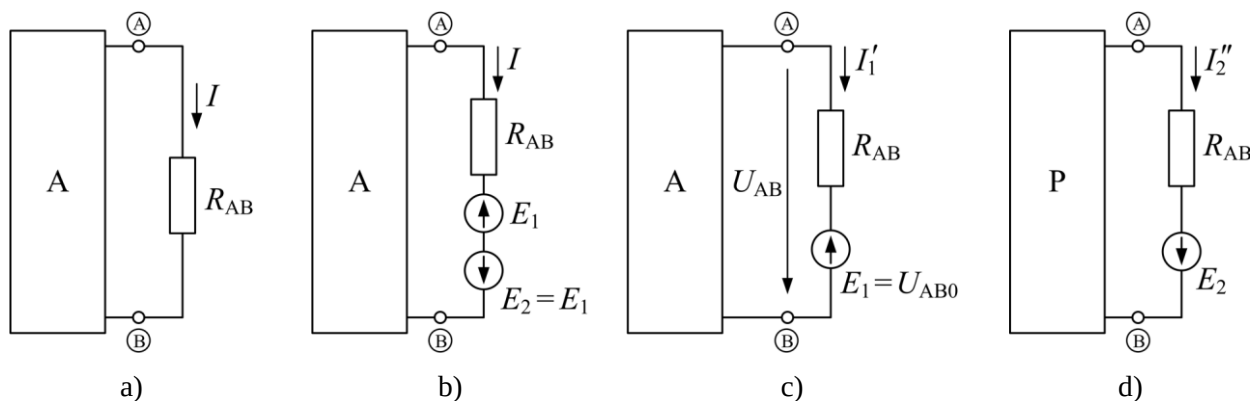
Ekvivalentse generaatori meetodit kasutatakse tavaliselt siis, kui keeruka elektriahela korral on vaja määrata vool ainult **ühes harus**.

Ekvivalentse generaatori teoreem:

|| Takistust R_{ab} omava eraldatud skeemiharu suhtes saab **aktiivse kaksklemmi** asendada **ühe** **ekvivalentse generaatoriga**, mida iseloomustab emj E_g ja sisetakistus R_g . ||

Siinjuures E_g võrdub tühijooksupingega katkestatud haru R_{ab} klemmidel, sisetakistus võrdub kaksklemmi sisendtakistusega $R_g = R_{sis}$.

Olgu antud **aktiivne kaksklemm**, sellel eraldatud haru R_{ab} (joon. 2.28a). Püüame määrata eraldatud harus voolu I .



Joon. 2.28. Aktiivse kaksklemmi ekvivalentse pingegeneraatori parameetrite määramine.

Vool I ei muutu, kui lisada uuritavasse harusse kaks võrdset ja vastassuunalist emj allikat E_1 ja E_2 (joon. 2.28b). **Superpositsiooni printsiibi alusel** võime voolu I kujutada kahe komponendi summana ($I = I' + I''$), millest I' on tekitatud aktiivse kaksklemmi ja lisaallika E_1 poolt, teine komponent I''

aga on tekitatud ainult lisaemj allika E_2 poolt, mis töötab sama kaksklemmi passiivsisendtakistusele (ilma energiaallikateta) ja takistusele R_{ab} (joon. 2.28c ja d).

Emj E_1 on suunatud vastassuunas pingele U_{ab} . Vaadeldavas harus tekib vool

$$I' = \frac{U_{ab} - E_1}{R_{ab}}.$$

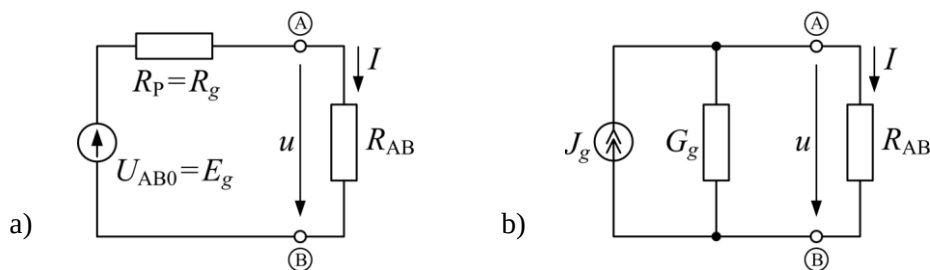
Määrame sellise E_1 väärtuse, mille puhul $I' = 0$. Siis peab olema

$$E_1 = U_{ab|I'=0} = U_{ab0},$$

s.o tühijooksupinge katkestatud (või 0-vooluga) klemmide A ja B vahel. Seega, kui $E_1 = U_{ab0}$ ja $I' = 0$, siis $I = I' + I'' = I''$ ongi otsitav vool. Aga voolu I'' saab määrata (kuna $E_2 = E_1 = U_{ab0}$):

$$I'' = \frac{E_2}{R_{ab} + R_p} = \frac{U_{ab0}}{R_{ab} + R_p} = I,$$

kus R_p on passiivse kaksklemmi sisendtakistus klemmide A ja B suhtes. Voolu $I'' = I$ avaldisele vastab aseseem (joon. 2.16.2a ja b).



Joon. 2.29. Ekvivalentne pingegeneraator (a – Theveneni skeem) ja voolugeneraator (b – Nortoni skeem).

Skeem a – Theveneni skeem ja teoreem:

Lineaarne elektriabel (või kaksklemm) võib olla asendatud ekvivalentse pingegeneraatoriga emj-ga $E_g = U_{ab0}$ ja sisetakistusega $R_g = R_p$.

Selle allika väljundpinge on

$$u = U_{ab0} - IR_p = E_g - R_g I$$

ja vool tarbijal

$$I = \frac{E_g}{R_g + R_{ab}}.$$

Skeem b – Nortoni skeem ja teoreem:

Igasuguse elektriabla või kaksklemmi saab asendada välisaru R_{ab} suhtes ekvivalentse vooluallikaga J_g , millega on rööbiti sisejuhtivus G_g või sisetakistus R_g .

Siinjuures tarbijal vool on:

$$I = J_g - u \cdot G_g$$

või teisiti

$$I = J_g \cdot \frac{G_{ab}}{G_g + G_{ab}}.$$

Ekvivalentse generaatori meetodi kasutamisel läbitakse analüüsil järgmised etapid:

1) tühijooksuskeemis (katkestatud haru R_{ab} korral) leitakse katkestuskoha klemmide vahel tühijooksupinge $U_{ab0} = E_g$;

2) tühijooksuskeemis, kus kõik emj-allikad on lühistatud ja vooluallikaharud on katkestatud, määratakse sisendtakistus $R_p = R_g$;

3) määratakse otsitav vool:

$$I = \frac{E_g}{R_g + R_{ab}}.$$

Kui võtta $R_{ab} = 0$, siis on lühis ja

$$I_k = \frac{E_g}{R_g} = \frac{U_{ab0}}{R_g}.$$

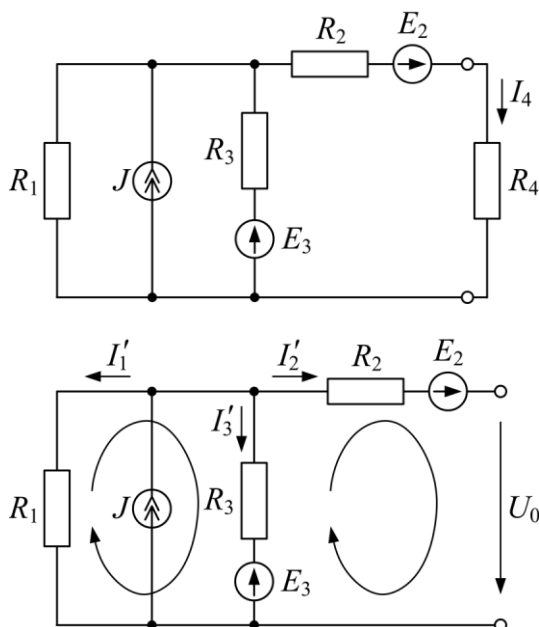
Siit näeme, et

$$R_g = \frac{U_{ab0}}{I_{abk}}.$$

Teisest küljest lühisvool $I_{abk} = J_g$ (voolugeneraatori vool) ja

$$G_g = \frac{1}{R_g} = \frac{I_{abk}}{U_{ab0}}.$$

Näide – ekvivalentne pingegeneraator:



$$R_1 = 10 \, \Omega$$

$$R_2 = 5 \, \Omega$$

$$R_3 = 10 \, \Omega$$

$$R_4 = 4 \, \Omega$$

$$E_2 = 50 \, \text{V}$$

$$E_3 = 100 \, \text{V}$$

$$J = 8 \, \text{A}$$

Leida I_4

$$U_0 - I'_3 R_3 + I'_2 R_2 = E_3 + E_2, \quad I'_2 = 0,$$

$$U_0 = E_3 + E_2 + I'_3 R_3.$$

Leiame I'_3 Kirchhoffi seaduste alusel:

$$\begin{cases} I'_1 + I'_3 = J; \\ -I'_1 R_1 + I'_3 R_3 = -E_3. \end{cases}$$

Joonis 2.30. Ekvivalentne pingegeneraator.

Siit vool I'_3 , mida vajame, avaldub:

$$I'_3 = \frac{\begin{vmatrix} 1 & 8 \\ -10 & -100 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 1 & 1 \\ -10 & 10 \end{vmatrix}} = \frac{-100 + 80}{10 + 10} = -1 \, \text{A}.$$

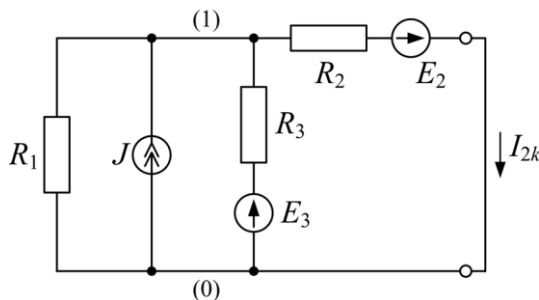
$$U_0 = E_3 + E_2 + I'_3 R_3 = 100 + 50 + (-1) \cdot 10 = 140 \, \text{V} = E_g;$$

$$R_p = R_2 + \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3} = 5 + \frac{10 \cdot 10}{10 + 10} = 10 \, \Omega = R_g.$$

Otsitav vool:

$$I_4 = \frac{E_g}{R_g + R_4} = \frac{140}{10 + 4} = 10 \text{ A}.$$

Analoogselt **ekvivalentne voolugeneraator**:



Joonis 2.31. Ekvivalentne voolugeneraator.

$$U'_{10} = \frac{J + \frac{E_3}{R_3} - \frac{E_2}{R_2}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_2}} = \frac{8 + 10 - 10}{\frac{1}{10} + \frac{1}{5} + \frac{1}{10}} = 20 \text{ V};$$

$$I_{2k} = \frac{U'_{10} + E_2}{R_2} = 14 \text{ A} = J_g;$$

$$G_4 = \frac{1}{R_4} = 0,25 \text{ S}; \quad G_g = \frac{1}{R_g} = 0,1 \text{ S};$$

$$I_4 = J_g \cdot \frac{G_4}{G_4 + G_g} = 14 \cdot \frac{0,25}{0,25 + 0,1} = 10 \text{ A}.$$

2.17 Energia ülekanne aktiivselt kaks клемmilt koormusele

Kui resistiivne koormus R on ühendatud aktiivse kaks клемmi клемmidele, siis läbib teda vool

$$I = \frac{U_0}{R + R_p} = \frac{E_g}{R + R_g}$$

ja koormusel eraldub võimsus

$$P = I^2 R = \frac{E_g^2}{(R + R_g)^2} \cdot R.$$

Uurime, milline peaks olema koormustakistuse R ja R_{sis} ehk R_g suhe, et koormusel eralduks maksimaalne võimsus. Seega määrame funktsiooni $P = f(R)$ **ekstreemumpunkti**, seal aga peab olema $dP/dR = 0$ ehk P avaldise alusel

$$\frac{dP}{dR} = E_g^2 \left[\frac{1}{(R + R_g)^2} - \frac{2R}{(R + R_g)^3} \right] = E_g^2 \cdot \frac{R + R_g - 2R}{(R + R_g)^3} = 0,$$

kust piisav tingimus on $R + R_g - 2R = 0$ ehk $R_g - R = 0$ ehk $R = R_g$, s.o maksimaalne võimsus eraldub koormusel siis, kui koormustakistus on võrdne generaatori sisendtakistusega. Sealjuures maksimaalse võimsuse väärtus koormusel on

$$P_{\max} = \frac{E_g^2}{4R_g}.$$

Kui valime koormustakistuse võrdseks $R = R_g$, siis sellist režiimi nimetatakse **sobitatud koormuseks**.

2.18 Elektri ahela ülekandetegurid

Superpositsiooni printsiibi ja vastastikkuse printsiibi põhjal võib mistahes elektri ahela haru voolu ja pinge arvutamise taandada ahela harude sisend- ja vastastikuste juhtivuste või takistuste arvutamisele.

Resistiivsete ahelate puhul nimetatakse neid seoseid üldnimetusega **elektri ahela ülekandetegurid**. Eriti mugav on neid kasutada ühe energiaallikaga hargahelas.

Kuna resistiivsete ahelate töörežiimi kirjeldavad seosed on lineaarsed algebralised võrrandid, siis on iseloomulik ka lineaarne sõltuvus sisendsignaali $x_1(t)$ ja mistahes reaktsiooni $x_2(t)$ vahel:

$$x_2(t) = K \cdot x_1(t), \quad (2.28)$$

kus $x_2(t)$ – mistahes haru reaktsioon, st haru otsitav vool või pinge,

$x_1(t)$ – emj allika pinge $u_g(t)$ või voolugeneraatori vool $i_g(t)$.

Reaktsiooni ja signaali suhe on ahela ülekandetegur:

$$K = \frac{x_2(t)}{x_1(t)}. \quad (2.29)$$

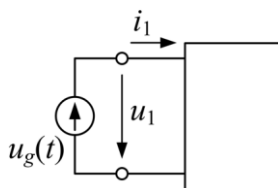
Seega võib väita, et kui ahela ülekandetegur K on konstantne, siis reaktsiooni kuju on sarnane signaali kujule, st resistiivne ahel ei moonuta signaali kuju.

Järgnevalt vaatleme ühe signaallikaga lineaarsete ahelate ülekandetegureid.

1. Kui on vaja leida ahela sisendvool või sisendpinge, esitame kogu passiivse ahela lineaarse kaks-klemmina.

Saab vaadelda kahte juhtumit:

- a) Skeemi toidab pingegeneraator pingega $u_1 = u_g(t)$, vaja on leida vool $i_1(t)$. Tähendab:



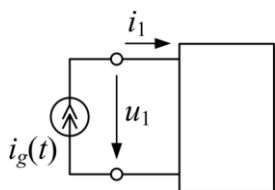
$$x_1(t) = u_1 = u_g(t),$$

$$x_2(t) = i_1 = i_1(t).$$

Sel juhul on ahela ülekandeteguriks **sisendjuhtivus**

$$K = G_s = \frac{i_1}{u_1}. \quad (2.30)$$

- b) Ahela sisendklemmidele on lülitatud voolugeneraator, otsitavaks reaktsiooniks on sisendpinge, st



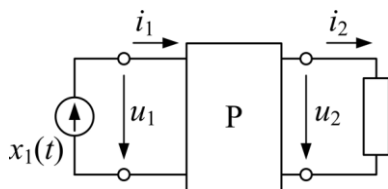
$$x_1(t) = i_g(t) = i_1,$$

$$x_2(t) = u_1(t) = u_1.$$

Ahela ülekandeteguriks on siis **sisendtakistus**

$$K = R_s = \frac{u_1}{i_1}. \quad (2.31)$$

2. Kui meid huvitab reaktsioon mitte sisendis, vaid mingis teises harus, siis eraldame signaallika ja vaadeldava haru, tähistades ülejäänud passiivse skeemi nn passiivse neliklemmiga.



Sõltuvalt ahela sisendil oleva energiaallika iseloomust (pinge- või voolugeneraator) ja meid huvitavast haru reaktsioonist (kas haru pinge või vool), saame vaadelda **nelja** erinevat ülekandetegurit K .

1) Sisendil on **pingegeneraator**, st $x_1(t) = u_1$, leida tuleb **väljundpinge** $x_2(t) = u_2$. Sel juhul nimetatakse ülekandetegurit

$$K = K_U = \frac{u_2}{u_1} \quad (2.32)$$

ahela **pingeülekandeteguriks**. See tegur on dimensioonita suurus, mis näitab, kui suur osa sisendpingest kantakse üle väljundharusse.

2) Kui meid huvitab väljundharu **vool** $x_2(t) = i_2$ ja sisendis on **pingegeneraator** $x_1(t) = u_1$, siis saame **ülekandejuihtivuse**

$$K_G = \frac{i_2}{u_1}, \quad (2.33)$$

s.o väljundvoolu suhe sisendpingesse [S].

3) Kui ahela sisendis on **voolugeneraator**, seega $x_1(t) = i_1$, ja otsitavaks suuruseks on väljundharu **vool**, st $x_2(t) = i_2$, siis saame **vooluülekanDETeguri**

$$K_I = \frac{i_2}{i_1}, \quad (2.34)$$

mis näitab, kui suur osa sisendvoolust läheb väljundharusse.

4) Sisendil on **voolugeneraator**, st $x_1(t) = i_1 = i_g$, ja meid huvitab väljundharu **pinge** $x_2(t) = u_2$, siis saame nn **ülekanDETakistuse** [Ω]:

$$K_R = \frac{u_2}{i_1} = R_{21}. \quad (2.35)$$