

1 Alalisvool

1.1 Vooluring (põhikooli füüsikakursusest)

Kui omavahel juhtmetega ühendada vooluallikas, elektritarviti(d) ja lüliti, tekib **vooluahel**. Vooluallikas, elektritarviti, lüliti ja juhtmed on vooluahela osad. Kui vooluahelas lüliti sulgeda tekib **vooluring**.

Vooluring on suletud vooluahel, milles saab tekkida vool. Vooluahelas võib olla mitu vooluringi.

Vooluallikas tekitab ja hoiab vooluringi ühendatud juhtides elektrivälja.

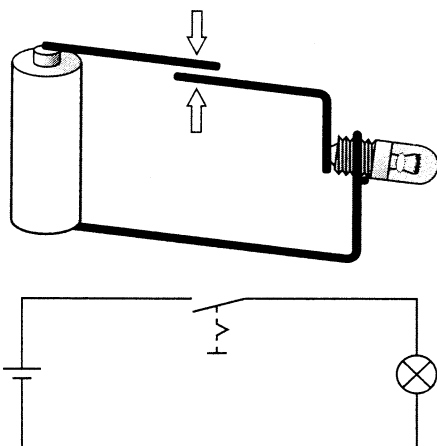
Tarviti on suvaline seade, mis töötab elektrivooluga. Elektritarvitiiks on näiteks elektrimootor, küttekeha, lamp, taskutelefon. Tarvitis muundub elektrienergia mingiks teiseks energialiigiks: mootoris mehaaniliseks energiaks, küttekehas soojusenergiaks, lambiks soojus- ja valgusenergiaks, telefonis elektromagnetiliseks ja/või helienergiaks.

Juhtmed on vajalikud vooluringi osade ühendamiseks. Igal elektriseadmepool on juhtmete ühendamiseks vähemalt kaks klemmi.



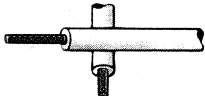
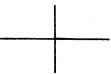
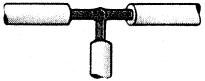
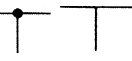
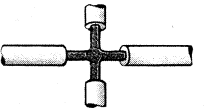
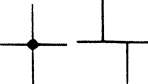
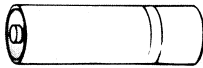
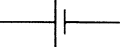
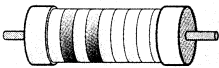
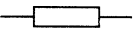
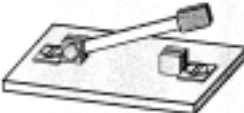
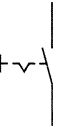
Lüliti on seade vooluringi sulgemiseks ja avamiseks, nii nagu vaja on. Vooluringi avamine tähendab seda, et mingis vooluringi osas (lülitis) vooluahel katkestatakse. Vooluringi saab avada ehk katkestada ka juhtmeotsa eemaldamisega vooluallika klemmilt. Klemmi ja juhtme vahele jääv õhk on isolator. Selline vooluringi katkestamine võib olla ohtlik, seepärast kasutatakse lülitit.

Vooluringi osade omavahelisest ühendusest ülevaate saamiseks kasutatakse vooluringi kujutamist joonisena, mille nimeks on **elektriskeem**. Vooluringi osade kujutamiseks skeemil kasutatakse **tingmärke**.

Olgu siin näiteks lihtsaim – taskulambi vooluring ja selle skeem.



Eestis kehtestati 2000. aastal tingmargistandardid, mis on täpselt samasugused kui Euroopa Liidus kasutusel olevad.

Nimetus	Pilt	Skeemitingmärk
Juht		
Ristuvad juhid		
Kolme juhi hargnemispunkt		
Nelja juhi hargnemispunkt		
Kuivelement (ka patarei)		
Takisti		
Lüliti		

Mõned enamkasutatavad skeemitingmärgid on toodud raamatu sisekaanel.

Vooluringi võib vaadelda koosnevana kahest osast:

- sisemine osa ehk siseahel, milleks on toiteallikas
- ülejäänud elemendid (tarvitid, ühendusjuhtmed, lülitid, mõõteriistad jne.) moodustavad välisahela.

Vooluringist laiem mõiste on **vooluahel**. Vooluahel võib koosneda mitmest vooluringist aga võib olla ka hoopis avatud s.t. katkestatud, ilma vooluta ahel.

Ampermeeter ühendatakse vooluringi alati jadamisi (järjestikku). Kuivõrd kõiki jadamisi ühendatud vooluringi osi, sealhulgas ka toiteallikat, läbib **sama tugevusega vool**, siis pole oluline, kas ampermeeter asub skeemis enne või peale tarvitit. Lühikeste juhtmete ja ampermeetri takistus on tarvitite takistusega võrreldes enamasti tühiselt väike, ning see loetakse nulliks

Voltmeeter ühendatakse rööbiti nende punktidega, mille vahelist pinget soovitakse mõõta. Voltmeetri takistus on väga suur ning enamasti pole vaja arvestada seda nõrka voolu, mis teda tegelikult läbib.

1.2 Elektromotoorjõud (allikapinge), sisepingelang ja pinge

Elektrivoolu tekitamiseks on vaja vooluallikat ehk täpsemini öeldes elektrienergia allikat. See on seade, kus eraldatakse erinimelised laengud. Selleks on vaja teha tööd. Allika üks klemm saab plusspotentsiaali ja teine miinuspotentsiaali. Kui allika klemmidele ühendada tarviti, läbib teda elektrivool, mis teeb kasulikku tööd. Suletud vooluringis liiguvad positiivsed laengud potentsiaali kahanemise suunas. Energiaallikas liiguvad positiivsed laengud potentsiaali kasvamise suunas. Laengute ümberpaiknemine allika sees on võimalik ainult kõrvaljõudude abil.

Elektromotoorjõud E on kõrvaliste jõudude (mitteelektrilise energiaallika) poolt tehtud mõõt laenguühiku kohta

$$E = \frac{W_k}{q}$$

W_k kõrvaliste jõudude tehtav töö džaulides (J)
 q laeng kulonites (C)

Elektromotoorjõud (emj., uuema nimetusega allikapinge) on põhjus, mis tekitab ja säilitab elektrivoolu suletud vooluringis. Ühikuks on volt (V).

Elektromotoorjõud on 1 volt, kui laengu 1 kulon ümberpaigutamiseks allikas kulub tööd 1 džaul.

Laengute ümberpaigutamisel positiivse ühiklaengu viimiseks läbi allika sisemuse miinuspooluselt plusspoolusele tehakse tööd, mille tulemusena eraldub allikas soojust. Allikas soojuseks muutuva töö mõõt laenguühiku kohta on allika sisepingelang U_0 .

Pinge iseloomustab elektrivoolu poolt vooluringis tehtud tööd. Pinge U on elektriliste jõudude poolt tehtud töö laenguühiku kohta.

$$U = \frac{W_e}{q}$$

W_e elektriliste jõudude tehtav töö džaulides (J)
 q laeng kulonites (C)

Pinge on 1 volt, kui laengu 1 kulon ümberpaigutamiseks vooluringis või selle osas kulub tööd 1 džaul.

Suuremaid pingeid mõõdetakse kilovoltides (kV), väiksemaid millivoltides (mV) ja mikrovoltides (μ V)

kilovolt 1 kV = $1 \cdot 10^3$ V = 1000 V

millivolt 1 mV = $1 \cdot 10^{-3}$ V = 0,001 V

mikrovolt 1 μ V = $1 \cdot 10^{-6}$ V = 0,000001 V.

Allikapinge (elektromotoorjõud) võrdub vooluringi vooluringi pinge ja sisepingelangu summaga

$$E = U + U_0.$$

See seos väljendab energia jäävuse seadust vooluringis.

Elektromotoorjõud võrdub pingega ainult juhul kui toiteallikas ei ole voolu (elektrikud ütlevad: ta on koormamata ehk tühijooksus).

1.3 Elektrivool

Elektrivooluks nimetatakse elektrilaengute suunatud liikumist.

Sõltuvalt võimest elektrit juhtida liigitatakse ained elektrijuhtideks, pooljuhtideks ja isolaatoriteks. Elektrijuht juhib voolu hästi, isolaator ehk dielektrik praktiliselt ei juhi voolu. Pooljuhi juhtivus sõltub tema tüübist. Näiteks juhib ühes suunas voolu hästi, vastassuunas aga väga halvasti.

Elektrijuhtidena kasutatakse enamasti vaske ja alumiiniumit. Kõige parem elektrijuht on hõbe.

Isolaatoritena kasutatakse peamiselt tehismaterjale (näiteks klaaskiud koos epoksüvaigu, räniorgaanilise kummi või tefloniga), portselani ja klaasi.

Metallis moodustab elektrivoolu elektronide suunatud liikumine, elektrolüüdis aga ionide suunatud liikumine.

Vabas olekus on elektronid metalljuhtmes või ioonid elektrolüüdis korratus liikumises. Selleks, et tekiks elektrivool, peab olema jõud, mis paneb elektrilaengud kindlas suunas liikuma. Kestva elektrivoolu tekkimiseks on vajalik vooluring, kus need laengud saaks kestvalt liikuda ja liikumapanevaks jõuks pingesallikas (nimetatakse ka toiteallikaks). Kui voolu suurus ega suund küllalt pika ajavahemiku kestel ei muutu, siis nimetatakse seda **alalisvooluks**.

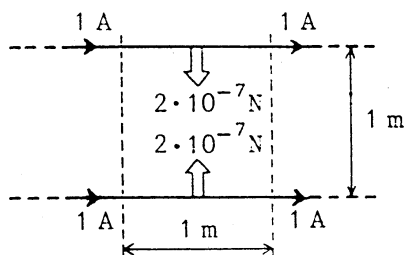
Elektrivoolu mõõduks on voolutugevus ehk lihtsalt vool, tähisteks I , ühikuks amper (A). Voolutugevus on võrdne ajaühikus (ühes sekundis) juhi ristlõiget läbiva laengu suurusega:

$$I = \frac{q}{t} \quad \text{A} = \text{C/s} \quad (1 \text{ amper on } 1 \text{ kulon } 1 \text{ sekundis})$$

- I voolutugevus amprites (A)
- q laeng, mis aja t vältel läbib juhi, kulonites (C)
- t aeg sekundites (s)

Tänapäeval on amper üks rahvusvahelise mõõtühikusüsteemi SI põhiühik ja teda defineeritakse jõu põhiühiku njuutoni (N) ning pikkuse põhiühiku meetri (m) kaudu:

1 amper on sellise muutumatu elektrivoolu tugevus, mis kahte lõpmatult pikka ja paralleelset, teineteisest vaakumis 1 meetri kaugusel asetsevat kaduvvääikese ringikujulise ristlõikega juhett läbides tekitab nende juhtmete vahel iga meetripikkuse lõigu kohta jõu $2 \cdot 10^{-7}$ njuutonit.



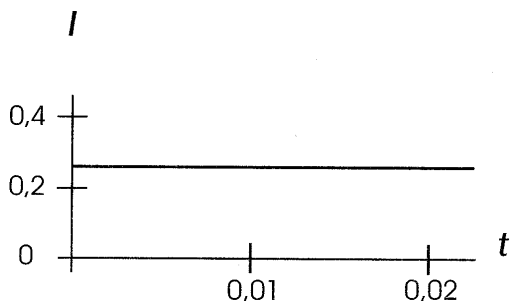
Voolutugevuse ühiku nimi on tuletatud prantsuse füüsiku André Marie Ampère'i (1775—1836) nimest, kes võttis kasutusele elektrivoolu mõiste ning sõnastas elektrivoolu ja magnetismi vastastikuse mõju põhilised seaduspärasused.

Praktikas kasutatakse sageli ampri kordseid mõõtühikuid:

- kiloamper $1 \text{ kA} = 1 \cdot 10^3 \text{ A} = 1000 \text{ A}$
- milliamper $1 \text{ mA} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ A} = 0,001 \text{ A}$
- mikroamper $1 \mu\text{A} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ A} = 0,000001 \text{ A}$
- nanoamper $1 \text{ nA} = 1 \cdot 10^{-9} \text{ A} = 0,000000001 \text{ A}$.

Voolutugevust mõõdetakse ampermeetriga, nõrka voolu sõltuvalt selle suurusest milli-, mikro- või nanoampermeetriga, tugevat voolu amper- või kiloampermeetriga.

Taskulambi voolutugevus on veerand ampri. Auto käivitamisel on voolutugevus käivitis enamasti vahemikus 100...200 A.

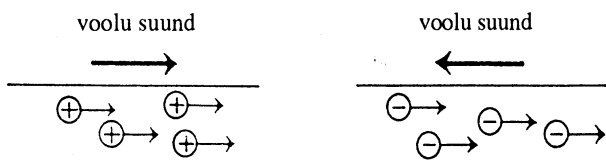


Taskulambipirni voolutugevuse sõltuvus ajast

Voolu suunaks loetakse kokkuleppeliselt suunda plussklemmilt miinusklemmidele ehk elektronide liikumisele vastupidist suunda.

See kokkulepe on pärit ajast, kui aine ehitust ei tuntud, ega teatud missugused osakesed mis suunas liiguvad. See nn. voolu tehniline suund on kasutusel ka praegu, sest paljud juhised (vasaku käe ja parema käe reegel jt.) on formuleeritud just niisugusest voolu suunast lähtudes.

Voolu suunda tähistatakse skeemidel noolega.



Voolu suund

1.4 Voolutihedus

Juhtme soojenemistingimustest lähtuvalt on oluliseks suuruseks **voolutihedus**.

Voolutiheduseks δ nimetatakse voolutugevuse I ja juhi ristlõikepindala S suhet

$$\delta = \frac{I}{S}$$

δ voolutihedus, amprites ruutmeetri kohta (A/m^2)

I voolutugevus amprites (A)

S juhi ristlõikepindala ruutmeetrites (m^2)

Voolutiheduse ühik on A/m^2 . Mugavuse pärast kasutatakse praktikas enamasti ühikut amper ruutmillimeetri kohta (A/mm^2).

$$1 A/m^2 = 10^{-6} A/mm^2,$$

$$1 A/mm^2 = 10^6 A/m^2.$$

Tavaliselt kasutatakse

- lühiajaliselt töötavates mähistes voolutihedust ($4\dots5 A/mm^2$),
- kestvalt töötavates elektrimasinates, trafodes ja mähistes ($1,5\dots3 A/mm^2$),
- mõõtetehnikas $< 1 A/mm^2$,
- küttekehades ($8\dots20 A/mm^2$).

1.5 Elektritakistus

Elektritakistus on füüsikaline suurus, mis iseloomustab juhi mõju elektrivoolule. Takistuse tähiseks on R , mõõtühik oom (Ω) (kreeka suurtäht *oomega*).

Juhi elektritakistus on 1 oom, kui juhi otstele rakendatud 1 voldise pinge korral on voolutugevus juhis 1 amper.

$$\frac{1A}{1V} = 1\Omega.$$

Oomist tuhat korda suuremaid takistusi mõõdetakse kilo-oomides ($k\Omega$) ja miljon korda suuremaid takistusi megaoomides ($M\Omega$).

kilo-oom $1 k\Omega = 1 \cdot 10^3 \Omega = 1000 \Omega$

megaom $1 M\Omega = 1 \cdot 10^6 \Omega = 1000\,000 \Omega$

Takistus sõltub juhi materjalist ja mõõtmetest. Takistus R on võrdeline juhi pikkusega l , pöördvõrdeline juhi ristlõikepinnaga S ja sõltub juhi materjalist:

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

$$1\Omega = 1\Omega \cdot m \frac{1m}{1m^2}$$

R juhi takistus oomides (Ω)

ρ eritakistus oom-meetrites ($\Omega \cdot m$)

l juhi pikkus meetrites (m)

S juhi ristlõikepindala ruutmeetrites (m^2)

Materjali iseloomustab eritakistus ρ (kreeka väiketäht *rho*):

$$\rho = \frac{R \cdot S}{l}$$

Eritakistus on 1 meetri pikkuse ja 1 m² ristlõikepindalaga keha takistus. Käsiraamatutes antakse tavaliselt eritakistuse väärtused 20 °C jaoks. Eritakistuse ühik SI süsteemis on $\Omega \cdot m$. Praktikas kasutatakse sageli ühikut $\Omega \cdot mm^2/m$, mis annab 1 meetri pikkuse ja 1 mm² suuruse ristlõikepindalaga juhi takistuse.

$$1 \frac{\Omega \cdot mm^2}{m} = 10^{-6} \Omega \cdot m = 1 \mu\Omega m$$

$$1 \Omega \cdot m = 10^6 \frac{\Omega \cdot mm^2}{m}$$

Aine eritakistusi

Aine	Eritakistus
	$\mu\Omega m$
Hõbe	0,0159
Vask	0,0172
Kuld	0,0221
Kroom	0,028
Alumiinium	0,0282
Volfram	0,053
Tsink	0,0595
Raud, malm	0,097...0,10
Tina	0,113
Plii	0,207
Teras	0,7...19
Konstantaan	0,50
Kroomnikkel	1,10
Kroomalumiinium	1,35...1,45

Vase eritakistus on 0,0172 $\Omega \cdot mm^2/m$. 1 m pikkuse ja 1,5 mm² ristlõikepindalaga vaskjuhi takistus on ca 11,5 m Ω .

Takistuse R pöördväärtust nimetatakse juhtivuseks G : Juhtivuse ühik on siimens (S).

$$G = \frac{1}{R} \quad 1S = \frac{1}{1\Omega}$$

Eritakistuse ρ pöördväärtust nimetatakse juhtivuseks γ (kreeka väiketäht *gamma*):

$$\gamma = \frac{1}{\rho}$$

Erijuhtivuse ühik SI süsteemis on S/m.

Takistid ja juhtmed

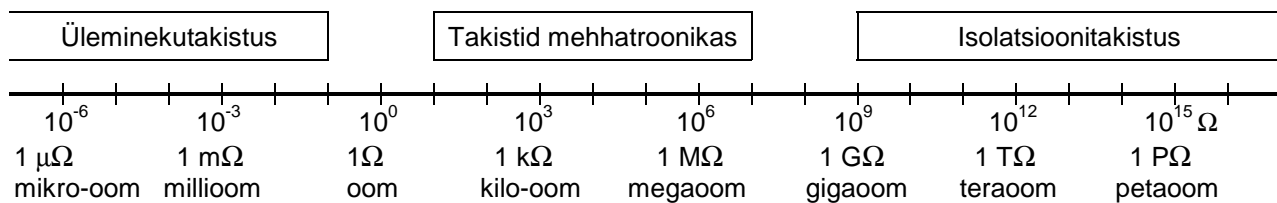
Takisti (*resistor*) on komponent, mis on tehtud selleks, et tal oleks teatud suurusega takistus. Pane tähele! Eristatakse mõisteid takistus, mis on

omadus, ja takisti, mis on selle omadusega ese. Takistid ja muud komponendid ühendatakse omavahel juhtmetega. **Juhtmed** on väikese takistusega juhid. Takistust juhtmete üleminekukohtades, näiteks pistikus, nimetatakse **üleminekutakistuseks**.

Mehhatroonikaseadmetes kasutatavad takistid on enamasti suure takistusega ($10 \Omega \dots 10 \text{ M}\Omega$).

Väikese takistusega takistite ühendamisel tuleb arvestada ka ühenduskoha üleminekutakistust. Selle suurusjärg pistikühenduses on millioom ($\text{m}\Omega$).

Juhid on ohutuse tagamiseks tavaliselt kaetud isolatsiooniga. Kui tekib vajadus arvestada isolatsiooni läbivat **lekkevoolu**, on vaja teada juhtmetevahelist **isolatsioonitakistust**. Isolatsioonitakistuse suurusjärg kaablis on näiteks 10 gigaoomi ($10 \text{ G}\Omega = 10 \cdot 10^9 \Omega = 10\,000\,000\,000 \Omega$).



Takistus ja takistid

Takistite valikul tuleb silmas pidada vajalikku võimsust või voolutugevust, mis selles takistis on vajalik. Väikesemõõtmeline takisti ei talu suurt voolu.

1.6 Takistuse sõltuvus temperatuurist

Peale materjali ja suuruse sõltub takisti või juhtme takistus veel temperatuurist. Temperatuuri tõus põhjustab metalljuhtide takistuse suurenemist ja temperatuuri langus vähenemist. Seda muutust iseloomustab **temperatuuritegur α** .

Aine takistuse temperatuuritegur α näitab, millise osa esialgsest takistusest ($20 \text{ }^\circ\text{C}$ juures) moodustab takistuse juurdekasv temperatuuri tõusmisel ühe kraadi (kelvini) võrra.

Vase ja teiste puhaste juhtmetemetallide temperatuuritegur $\alpha = 0,00 \text{ 1/K}$. See tähendab, et vaskjuhtme temperatuuri muutumisel ühe kraadi võrra muutub tema takistus 0,4 %.

Kuni $100 \text{ }^\circ\text{C}$ on metalljuhtmete suhteline takistuse muutumine võrdeline temperatuuri muutusega:

Kui takistus $20 \text{ }^\circ\text{C}$ juures on 1Ω ja temperatuuri juurdekasv on $1 \text{ }^\circ\text{C}$, siis takistuse juurdekasv on $\alpha \Omega$.

Kui takistus $20 \text{ }^\circ\text{C}$ juures on 1Ω ja temperatuuri juurdekasv on $\Delta\vartheta$, siis takistuse juurdekasv on $\alpha \cdot \Delta\vartheta \Omega$.

Kui takistus $20 \text{ }^\circ\text{C}$ juures on $R_1 \Omega$ ja temperatuuri

juurdekasv on $\Delta\vartheta$, siis takistuse juurdekasv on $R_1 \cdot \alpha \cdot \Delta\vartheta$.

$$\frac{\Delta R}{R_1} = \frac{R_2 - R_1}{R_1} = \alpha (\vartheta_2 - \vartheta_1) = \alpha \cdot \Delta\vartheta,$$

millest

$$\Delta R = R_1 \cdot \alpha \cdot \Delta\vartheta.$$

Siis

$$R_2 = R_1 + \Delta R = R_1 + R_1 \cdot \alpha \cdot \Delta\vartheta$$

ehk

$$R_2 = R_1 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\vartheta)$$

R_2 Takistus temperatuuril ϑ_2 oomides (Ω)

R_1 Takistus temperatuuril 20°C (ϑ_1) oomides (Ω)

α Takistuse temperatuuritegur $1/\text{K}$

$\Delta\vartheta = \vartheta_2 - \vartheta_1$ Temperatuuri juurdekasv
(temperatuuride vahe) kelvinites (K)

Näide

Vaskjuhi takistus 20°C juures on $100\text{ m}\Omega$.

Kui suur on takistus 95°C juures?

Teada on vase temperatuuritegur $\alpha = 0,004\text{ 1/K}$

Antud on $R_1 = 100\text{ m}\Omega$, $\vartheta_1 = 20^\circ\text{C}$, $\vartheta_2 = 95^\circ\text{C}$.

Temperatuuri juurdekasv

$$\Delta\vartheta = \vartheta_2 - \vartheta_1 = 95 - 20 = 75^\circ\text{C}.$$

Takistus 95°C juures

$$R_2 = R_1 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\vartheta) = 100 \cdot (1 + 0,004 \cdot 75) = \\ = 100 \cdot (1 + 0,3) = 130\text{ m}\Omega.$$

Vastus: juhi takistus 95°C juures on $130\text{ m}\Omega$.

Kõrgemal temperatuuril (üle 100°C) on takistuse juurdekasv ebaühtlane s.t. temperatuuritegur pole püsiva väärtusega. Siiski võib elektriseadmetes lubatava temperatuurivahemiku juures kasutada toodud valemeid.

Puhaste metallide jahutamisel nende takistus väheneb ning muutub väga madalal temperatuuril (-273°C lähedal) mõningatel metallidel hüppeliselt nulliks. Elektrijuhtivus suureneb järsult. Niisugust nähtust nimetatakse **ülijuhtivuseks**.

Mõningatel sulamitel, millest tehakse takistustraati, on eritakistus väga suur ja takistuse temperatuuritegur väga väike. Näiteks on konstantaani (peamiselt vase ja nikli sulam vähese mangaani, raua ja kroomi sisaldusega) temperatuuritegur $\alpha = 0,000005\text{ 1/K}$. See tähendab, et takistus temperatuuri kõikumisel praktiliselt ei muutu. Sellest ka sulami nimi (konstant = muutumatu suurus). Konstantaani kasutatakse mõõteriistade ja lisatakistite valmistamisel, s.o. sellistel juhtumitel, kui takistus ei tohi temperatuuri kõikumisel muutuda.

Sõel ja elektrolüütidel on takistuse temperatuuritegur negatiivne.

1.7 Ohmi seadus

Vool juhtmes on võrdeline pingega juhtme otstel. Võrdeteguriks on juhtivus

$$I = GU$$

Sellele järeldusele tuli saksa füüsik Georg Simon Ohm (1787–1854) oma katsete tulemusena, kui ta 1826. aastal uuris elektri juhtivust. Seda seaduspärasust nimetatakse tänapäeval Ohmi (loe: oomi) seaduseks ja sõnastatakse enamasti nii:

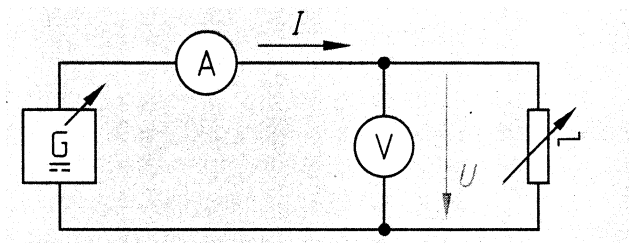
Voolutugevus ahela osas on võrdeline sellele ahelaosale rakendatud pingega ja pöördvõrdeline ahelaosa takistusega.

$$I = \frac{U}{R}$$

I voolutugevus amprites (A)

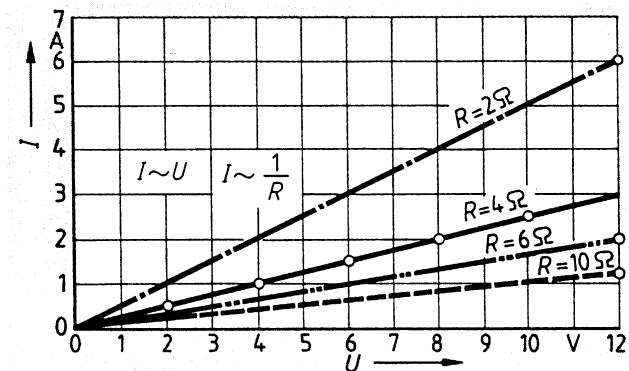
U pinge voltides (V)

R takistus oomides (Ω)



Muutmata takistuse korral pinget suurendades suureneb vool võrdeliselt pingega.

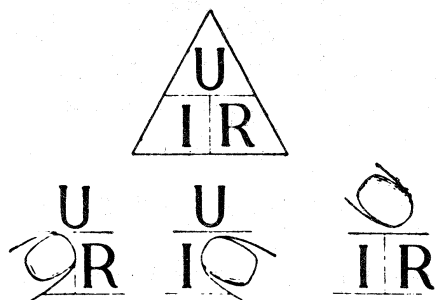
Seda illustreerib joonis, kus sirgel, mis vastab 4Ω takistusele on tähistatud rida punkte: kui pinge on 4 V, on vool 1 A, kui 8 V – 2 A, 12 V – 3 A.



Muutmata pinge korral takistust suurendades väheneb vool pöördvõrdeliselt takistusega.

Selle näiteks võib vaadelda joonise paremat äärt: kui pinge on 12 V, siis 2Ω takistuse korral on vool 6 A, 4Ω korral 3 A, 6Ω korral 2 A ja 10Ω korral 1,2 A.

Ohmi seaduse meelespidamiseks võib kasutada nn. Ohmi kolmnurka.



Kui otsitava suuruse tähis sõrmega kinni katta, annab kolmnurga allesjääv osa selle suuruse valemi.

Kui näiteks on vaja meenutada, kuidas avaldada voolu I , siis tuleb näpuga katta täht I . Ülejäänud kahe tähe asetuse näitab, et pinge U tuleb jagada takistusega R .

$$I = \frac{U}{R}, \quad R = \frac{U}{I}, \quad U = IR.$$

Näiteid

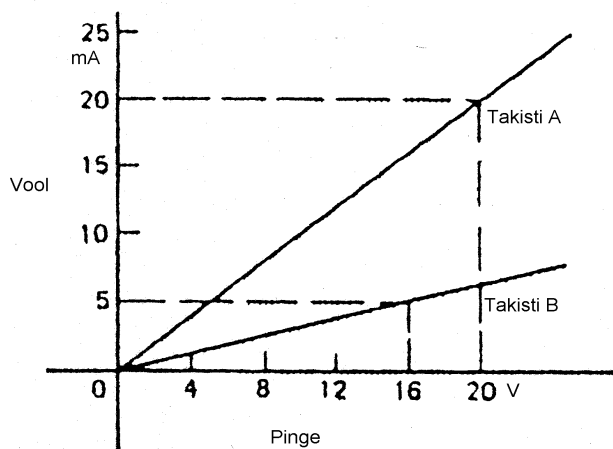
1. 12 V aku klemmidele on ühendatud hõõglamp. Vooluahelasse ühendatud ampermeeter näitab 1,5 amprit. Kui suur on hõõglambi takistus?

$$R = \frac{U}{I} = \frac{12}{1,5} = 8 \Omega$$

2. Kui suur on voolutugevus hõõglambis, mille takistus on 8Ω , kui ta on ühendatud 12 V aku klemmidele?

$$I = \frac{U}{R} = \frac{12}{8} = 1,5 A.$$

3. Kui suur on takistite A ja B takistus, kui nende voolu-pinge tunnusjoon on juuresoleval arvjoonisel?



$$R_A = \frac{U_A}{I_A} = \frac{20}{20 \cdot 10^{-3}} = 1000 \Omega = 1 \text{ k}\Omega$$

$$R_B = \frac{U_B}{I_B} = \frac{16}{5 \cdot 10^{-3}} = 320 \Omega = 0,32 \text{ k}\Omega$$

1.8 Võimsus ja töö

Elektriseadmes muutub elektrivoolu energia mingiks teiseks energiaks: näiteks küttekehas soojuseks, elektrilambis valguseks ja soojuseks, elektrimootoris mehaaniliseks energiaks ja soojuseks. Energia muundumist ühest energialiigist mingiks teiseks energialiigiks iseloomustab tehtav töö.

Seadme töövõimet iseloomustavat suurust nimetatakse võimsuseks. Võimsuse tähiseks on P ja mõõtühikuks vatt (W). Praktikas kasutatakse enamasti suuremat ühikut:

$$1 \text{ kilovatt } 1 \text{ kW} = 1 \cdot 10^3 \text{ W} = 1000 \text{ W}$$

Praktikas kasutatakse mõnikord ja mõnel maal võimsuse ühikuks hobujõudu (hj, ka hp – *horse-power*)

$$1 \text{ hj} = 736 \text{ W} = 0,736 \text{ kW}$$

$$1 \text{ kW} = 1,36 \text{ hj.}$$

Meelespidamise hõlbustamiseks on hea teada, et **elektter on võimsam kui hobune**: 1,36 hj = 1 kW.

Seadme võimsus on seda suurem, mida tugevam vool teda läbib ja mida suurem on pinge tema klemmidel:

$$P = U I,$$

P võimsus vattides (W)

U pinge voltides (V)

I vool amprites (A)

$$1 \text{ vatt} = 1 \text{ volt} \cdot 1 \text{ amper.}$$

Näide

12 V akuga töötav elektridrell võtab voolu 25 A. Kui suur on võimsus?

$$P = U I = 12 \cdot 25 = 300 \text{ W.}$$

See on mootori **tarbitav** võimsus. Ainult teatav osa sellest muudetakse **kasulikuks** võimsuseks ehk võimsuseks mootori võllil ehk väljundvõimsuseks. Elektrimootoris kulub osa võimsust mähiste soojendamiseks, osa hõõrdejõudude ületamiseks.

Kasulik võimsus on tarbitavast võimsusest alati väiksem. Kasuliku ja tarbitava võimsuse suhet nimetatakse **kasuteguriks**. Kasutegur on dimensioonita suurus ehk suhtearv. Kasuteguri tähiseks on η (kreeka väiketäht *eeta*). Vanemas kirjanduses avaldatakse kasutegur mõnikord ka protsentides.

Seadeldise sildil avaldatakse tavaliselt

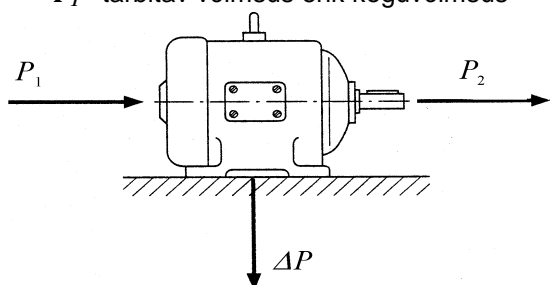
- **mootorit** võimsus mootori võllil P_2
- **kodumajapidamisseadmetel** tarbitav võimsus P_1 .

Kasutegur

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}$$

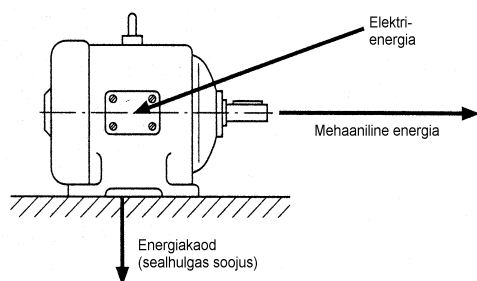
P_2 kasulik võimsus

P_1 tarbitav võimsus ehk koguvõimsus



Tarbitava ja kasuliku võimsuse vahet nimetatakse kaovõimsuseks ehk lihtsalt kadudeks ΔP .

$$\Delta P = P_1 - P_2$$



Taskutelefoni tarbitav võimsus on 0,2...2 W
 taskulambipirni võimsus on umbes 10 W,
 sülearvuti võimsus on umbes 20 W,
 autoraadio võimsus on umbes 10 W,
 auto klaasipühkija võimsus on umbes 100 W.

Töö hulk, mille seade ära teeb, sõltub peale võimsuse ka töötamise ajast. Töö tähiseks on A , ühikuks SI-süsteemis džaul (J) ehk vattsekund (W s)

$$A = P t = U I t$$

A töö džaulides (J)

P võimsus vattides (W)

t aeg sekundites (s)

U pinge voltides (V)

I vool amprites (A)

1 džaul = 1 vatt · 1 sekund = 1 vattsekund.

Mehaanikas on 1 džaul (J) töö, mille sooritab jõud 1 njuuton (N) 1 meetri (m) ulatuses, kui liikumise suund ühtib jõu mõjumise suunaga.

Vattsekund on **energia** mõõtühik.

Energia on suurus, millega mõõdetakse seadme võimet teha tööd.

Energia = võimsus x aeg

Vattsekund on väga väike ühik. Praktikas kasutatakse suuremaid ühikuid:

1 vatt-tund (Wh) = 3600 vattsekundit (Ws) (tunnis on 60 · 60 = 3600 sekundit) = 3,6 kilovattsekundit (kWs),

1 kilovatt-tund (kWh) = 3,6 · 10⁶ vattsekundit (Ws) = 3,6 megavattsekundit (MVs).

1.9 Elektrienergia muundumine soojusenergiaks

Voolu läbimisel juht soojeneb. Elektrienergia muundub soojusenergiaks.

$$W = U I t$$

Asendades siin Ohmi seadusest $U = I R$ saab

$$W = I^2 R t$$

W eralduv soojusenergia vattsekundites (Ws) ehk džaulides (J)

I voolutugevus amprites (A)

R juhi takistus oomides (Ω)

t aeg sekundites (s)

Juhis eralduva soojuse hulk on võrdeline juhi takistuse, voolu ruudu ja ajaga.

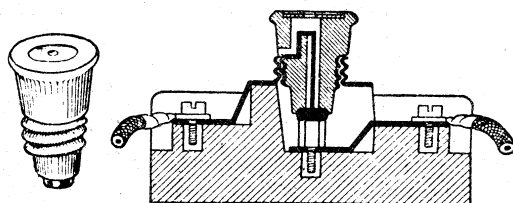
Seda seadust tuntakse Joule-Lenzi seaduse nime all.

Elektrivoolu soojuslikku toimet kasutatakse mitmesugustes soojendusseadmetes. Muudes elektriseadmetes on elektrienergia muundumine soojuseks üldiselt soovimatu energiakulu, mis vähendab kasutegurit. Eralduv soojus kuumutab neid seadmeid ja piirab nende koormamist.

Elektriseadme kasulik võimsus ongi enamasti piiratud tema pinnalt soojuse ärajuhtimise võimega.

Kui elektriseadmetes satuvad pingestatud juhtmed või erinimelised klemmid omavahel või mõne metalleseme kaudu ühendusse, siis muutub vooluringi takistus väga väikeseks. Seda nimetatakse **lühiseks**. Voolutugevus kasvab kümneid kordi ning ületab kaugelt juhtmetele lubatava väärtuse. Eralduv soojushulk on võrdeline voolu ruuduga. Juhtmed kuumenevad tugevasti ja võivad põhjustada isolatsiooni kui ka ümbritsevate esemete süttimist. Lühisvoolu väljalülitamiseks kasutatakse näiteks sulavkaitsmeid.

Sulavkaitsme põhiosaks on **sular** – kergestisulavast metallist kalibreeritud traat või riba – mis liigkoormuse korral kuumeneb ja sulab, katkestades nii vooluahela ja lülitades kaitstava ahelaosa välja.

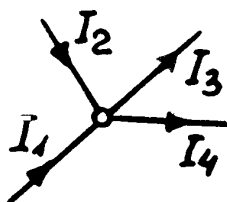


1.10 Kirchhoffi esimene seadus

Vooluahelasse ühendatakse tavaliselt palju tarviteid. Üks lihtsam näide on auto või mootorratas, mille rööbiti ühendatud generaatori ja aku klemmidele ühendatakse kõik elektritarvitid: lambid, klaasipuhasti mootor(id), küttekehad, helisignaal jne.

Vooluahela punkti, kus ühendatakse mitu juhet, nimetatakse hargnemispunktiks ehk sõlmeks. Kirchhoffi esimene seadus on seadus vooludest hargnemispunktis:

Hargnemispunkti suubuvate voolude summa on võrdne sealt väljuvate voolude summaga.



Joonisel toodud sõlme kohta võib siis kirjutada

$$I_1 + I_2 = I_3 + I_4,$$

ehk, kui viia kõik voolud võrrandi ühele poole:

$$-I_1 - I_2 + I_3 + I_4 = 0,$$

või kõige üldisemal kujul

$$\sum I = 0,$$

(Σ on kreeka suurtäht *sigma*, algebraise summa sümbol)

ehk: **voolude algebraine summa sõlmes on võrdne nulliga.**

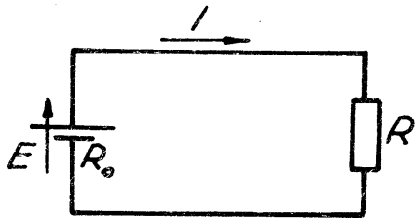
Sel joonisel loetakse sõlme suunduvad voolud positiivseteks, sõlmest väljuvad voolud negatiivseteks.

Kirchhoffi esimest seadust võib võtta aksioomina, mis ei vaja tõestust, sest elektrihulk, mis ajahetkel hargnemispunkti kokku voolab, peab sealt samal ajahetkel ka ära voolama. Vastasel korral tekiks laengute kuhjumine või puudujääk, mis pole võimalik.

1.11 Kirchhoffi teine seadus

Vooluringis toimivate elektromotoorjõudude summa on võrdne kõigi selle kontuuri takistustel esinevate pingelangude algebraise summaga.

$$\sum E = \sum I R$$



Seda võib vaadelda kui laiendatud Ohmi seadust.

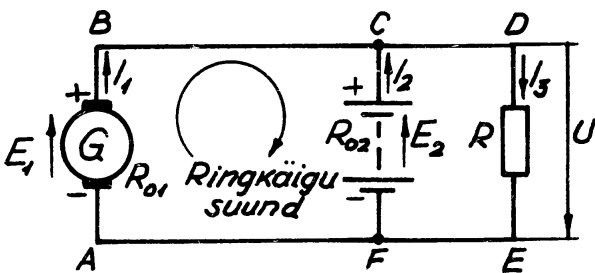
Ühe toiteallika puhul

$$I = \frac{E}{R_0 + R}, \quad \text{millest} \quad E = I R_0 + I R, \quad \text{ehk}$$

$$E = \sum I R, \quad \text{mida eelmine valem väidabki.}$$

Toiteallikaid võib olla mitu, nagu on mootorrattal rööbiti ühendatud generaator ja aku. Seejuures tuleb arvestada märke: elektromotoorjõud suundub toiteallika negatiivselt klemmilt positiivsele, s.t. ühtib voolu suunaga vooluringis.

Enamasti on vooluahelate elektromotoorjõud E ja takistused R teada, otsitavad on voolud ja pinged.



Joonisel on voolusuunad tähistatud meelevaldselt, sest tegelikult pole veed teada. Ahelas on kolm vooluringi: BCFAB, BCDEFAB ja CDEFCA. Valime võrrandi koostamiseks vabalt nn **ringkäigusuuna** näiteks päripäeva. Siis tuleb võrrandisse paigutada E positiivsena, kui ta suund ühtib ringkäigusuunaga, ja negatiivsena, kui ei ühti. Pingelang IR loetakse positiivseks, kui voolu suund takistis ühtib ringkäigusuunaga, ja negatiivseks, kui ei ühti.

Olgu joonisel kujutatud generaatori emj. $E_1 = 8 \text{ V}$ ja sisetakistus $R_{01} = 0,1 \ \Omega$,

aku emj. $E_2 = 6 \text{ V}$ ja sisetakistus $R_{02} = 0,2 \ \Omega$

ning välisahela (tarvitite) kogutakistus $R = 0,5 \ \Omega$.

Kõigi voolude ja tarvitite klemmipinge määramisel selgub ka, kas aku on laadimis- või tühjendamis-režiimil.

Tundmatuid voolusid on kolm; I_1 , I_2 , ja I_3 . Nende leidmiseks peab koostama süsteemi kolmest võrrandist. Kaks sõlmpunkti (C ja F) ja kolm kinnist - vooluringi võimaldavad kirjutada kokku viis võrrandit.

Õige võrrandivalik on see, kui Kirchhoffi esimese seaduse järgi kirjutada võrrandeid üks vähem kui võimalik, näiteks punkti C kohta

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0. \quad (1)$$

Kirchhoffi teise seaduse järgi kirjutamiseks tuleb võrrandid valida nii, et iga vooluring sisaldab vähemalt ühe uue haru, mida teistes ei ole.

Kontuuri BCFAB kohta võib kirjutada

$$E_1 - E_2 = I_1 R_{01} - I_2 R_{02} \quad (2)$$

ja paigutades sinna arvud

$$8 - 6 = 0,1 I_1 - 0,2 I_2. \quad (2')$$

ehk, korrutades 10ga

$$20 = I_1 - 2 I_2 \text{ ja siit } I_2 = \frac{I_1 - 20}{2}. \quad (2'')$$

Samamoodi kontuuri BCDEFAB kohta

$$E_1 = I_1 R_{01} + I_3 R; \quad (3)$$

$$8 = 0,1 I_1 + 0,5 I_3. \quad (3')$$

$$80 = I_1 + 5 I_3, \text{ millest } I_3 = \frac{80 - I_1}{5}. \quad (3'')$$

Ühe tundmatuga võrrandi saab, kui asetada (2'') ja (3'') võrrandisse (1):

$$I_1 + \frac{I_1 - 20}{2} - \frac{80 - I_1}{5} = 0 \quad (1')$$

Korrutades kümnega saab

$$10 I_1 + 5 I_1 - 100 - 160 + 2 I_1 = 0.$$

Siit

$$17 I_1 = 260 \text{ ja } I_1 = \frac{260}{17} = 15,3 \text{ A.}$$

Asetades selle väärtuse valemisse (2'') saab

$$I_2 = \frac{I_1 - 20}{2} = \frac{15,3 - 20}{2} = -\frac{4,7}{2} = -2,4 \text{ A.}$$

Siin miinusmärk näitab, et tegelik voolusuund on esialgselt arvatavale vastupidine ehk generaator laeb akut. Samamoodi leitakse vool tarvitites:

$$I_3 = \frac{80 - I_1}{5} = \frac{80 - 15,3}{5} = 12,9 \text{ A.}$$

Võrrandisüsteemi saab kontrollida võimsuste bilansiga.

Kontrollime arvutuse õigsust asetades vooluväärtused võrrandisse (1):

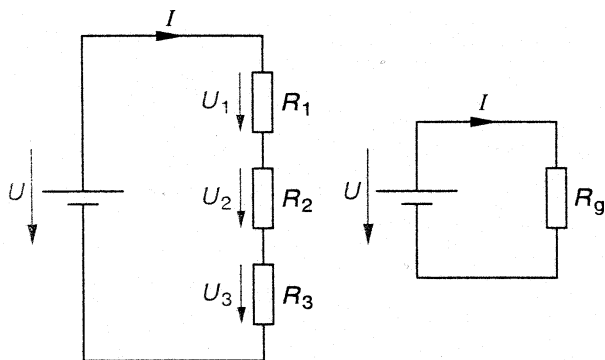
$$I_1 + I_2 - I_3 = 15,3 - 2,4 - 12,9 = 0.$$

Pinge tarvititel saab avaldada Ohmi seaduse abil:

$$U = I_3 R = 12,9 \cdot 0,5 = 6,45 \text{ V.}$$

1.12 Takistite jadaühendus

Kui mitu tarvitit või takistit on ühendatud teineteise järel ilma hargnemiseta, nimetatakse seda järjestik- ehk jadaühenduseks.

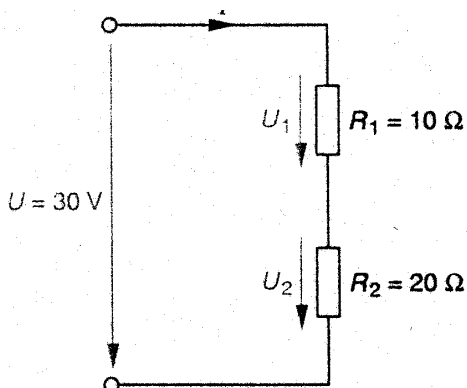


Jadaühenduse korral

- kõikides takistites on ühesuurune vool
 $I = I_1 = I_2 = I_3$
- takistil tekkiv pingelang ehk osapinge on võrdeline takistusega
 $U_1 = I R_1,$
 $U_2 = I R_2,$
 $U_3 = I R_3$
- osapingete summa võrdub allika klemmipingega
 $U = U_1 + U_2 + U_3$
- ahela kogutakistus võrdub takistite takistuste summaga
 $R = R_1 + R_2 + R_3$
- võimsus võrdub jadamisi ühendatud takistuste võimsuse summaga
 $P = P_1 + P_2 + P_3 = U_1 I + U_2 I + U_3 I = U I .$

Jadaühenduse puuduseks on asjaolu, et tarvitid on omavahelises sõltuvuses. Kui ühes tarvitis või juhis tekib katkestus, siis jäävad kõik tarvitid pingeta ehk, nagu elektrikud ütlevad, toiteta.

Näide



Allikapingele $U = 30 \text{ V}$ on jadamisi ühendatud tarvitid takistusega $R_1 = 10 \text{ } \Omega$ ja $R_2 = 20 \text{ } \Omega$. Missugune pinge langeb tarvitile?

$$R = R_1 + R_2 = 10 + 20 = 30 \text{ } \Omega$$

$$I = \frac{U}{R} = \frac{30}{30} = 1 \text{ A}$$

$$U_1 = I R_1 = 1 \cdot 10 = 10 \text{ V}$$

$$U_2 = I R_2 = 1 \cdot 20 = 20 \text{ V}$$

või

$$U_2 = U - U_1 = 30 - 10 = 20 \text{ V}$$

Eeltakisti

Nagu toodud näitest näha, langeb $10 \text{ } \Omega$ takistusega tarvitile pinge 10 V ja $20 \text{ } \Omega$ takistusega tarvitile pinge 20 V ehk osapinged on takistusega võrdelised:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}$$

Seda omadust kasutatakse ära eeltakistuse valikul, kui tarviti pinge on allikapingest väiksem. Sel juhul ühendatakse tarvitiga järjestikku eeltakisti, mille osapinge võrra väheneb tarviti klemmipingele. Vajalik eeltakisti takistus on

$$R_e = \frac{U_e}{I} = \frac{U - U_{\text{tarviti}}}{I},$$

kus $I = U_{\text{tarviti}}/R_{\text{tarviti}}$ on tarviti nimivool. Eeltakistile lubatav vool peab olema sama suur või veidi suurem, et ta ei kuumeneks üle.

Ühesuguste tarvitite jadaühendus

Kui jadamisi on ühendatud mitu, näiteks n ühesugust takistit takistusega R_1 , siis ahela kogutakistus

$$R = n R_1$$

ning kõik osapinged on võrdsed:

$$U_1 = \frac{U}{n}.$$

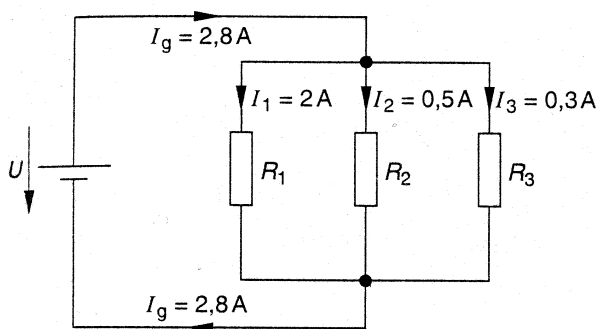
Näide

Mitu $1,5 \text{ V}$ lambipirni tuleks ühendada jadamisi jõulukuuse lambiritta, kui kasutada nende pingeallikaks 12 V autoakut?

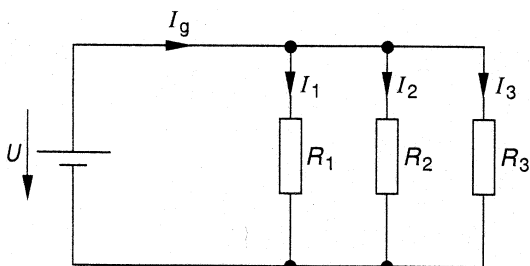
$$n = \frac{U}{U_1} = \frac{12}{1,5} = 8$$

1.13 Takistite rööpühendus

Kui mitu takistit või tarvitit on ühendatud kahe punkti vahele, nimetatakse seda takistite paralleel- ehk rööpühenduseks. Ühenduspunkte nimetatakse sõlmedeks. Nii ühendatakse elektritarviteid enamikul juhtudel kui nende nimipinged on võrdsed.



Tavaliselt kujutatakse ülaltoodud skeem nii:



Rööpühenduse korral

- kõigil rööbiti ühendatud takistitel on ühesugune pinge
 $U = U_1 = U_2 = U_3$
- vool rööpharus on pöördvõrdeline rööpharu takistusega

$$I_1 = \frac{U}{R_1}; \quad I_2 = \frac{U}{R_2}; \quad I_3 = \frac{U}{R_3}$$

- koguvool võrdub haruvoolude summaga
 $I = I_1 + I_2 + I_3$
- kogutakistuse pöördarv võrdub harude takistuste pöördarvude summaga

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

millest ahela kogutakistus

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

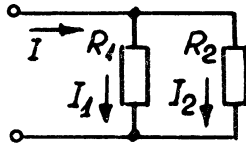
- kogujuhtivus võrdub harude juhtivuste summaga
 $G = G_1 + G_2 + G_3$
- koguvõimsus võrdub harude võimsuste summaga

$$P = P_1 + P_2 + P_3 = U I_1 + U I_2 + U I_3 = U I$$

Rööpühenduse eeliseks on kõigi tarvitite jaoks võrdne pinge ning võimalus tarvitteid üksteisest sõltumatult sisse ja välja lülitada. Ette rutates võib öelda, et vahelduvvoolu korral pole alalisvooluga võrreldes selles osas põhimõttelist erinevust.

Kahe takisti rööpühendus

See on sageli esinev erijuhtum, mille jaoks on suhteliselt lihtne tuletada kogutakistuse avaldis.



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

ehk

$$R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}.$$

Kui on teada koguvool I ja takistused R_1 ja R_2 , siis on haruvoolud leitavad järgnevalt:

$$I_1 = I \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$I_2 = I \frac{R_1}{R_1 + R_2}.$$

Näide

Allikapingele $U = 30 \text{ V}$ on rööbiti ühendatud tarvitid takistusega $R_1 = 10 \Omega$ ja $R_2 = 20 \Omega$. Määrake kogutakistus ja haruvoolud.

$$R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{10 \cdot 20}{10 + 20} = \frac{200}{30} = 6\frac{2}{3} \Omega$$

$$I_1 = \frac{U}{R_1} = \frac{30}{10} = 3 \text{ A}$$

$$I_2 = \frac{U}{R_2} = \frac{30}{20} = 1,5 \text{ A}$$

$$I = I_1 + I_2 = 3 + 1,5 = 4,5 \text{ A}$$

või

$$I = \frac{U}{R} = \frac{30}{6,67} = 4,5 \text{ A}.$$

Kontrollime ka haruvoolu määramise valemit:

$$I_1 = I \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 4,5 \frac{20}{10 + 20} = 4,5 \cdot \frac{2}{3} = 3 \text{ A}.$$

Ühesuguste takistite/tarvitite rööpühendus

Kui rööbiti on ühendatud mitu, näiteks n ühesugust takistit takistusega R_j , siis ahela kogutakistus

$$R = \frac{R_1}{n},$$

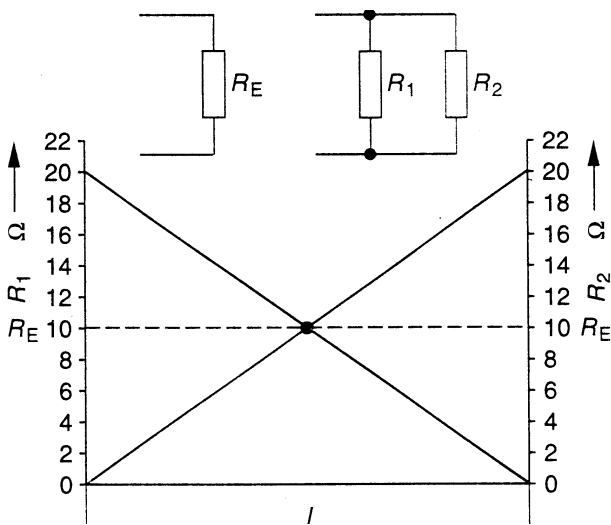
Tõepoolest, kui

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_1} = \frac{3}{R_1},$$

siis

$$R = \frac{R_1}{3}.$$

Rööpühenduse korral on tarvidid teineteisest sõltumatud, sest ühe tarviti takistuse muutumine ei muuda teiste tarvitite pinget ega voolu.

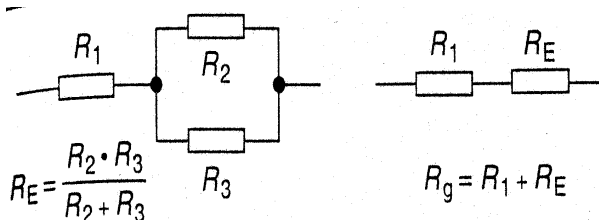


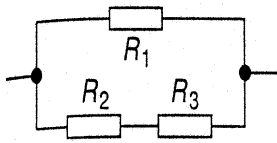
Nomogramm kahe rööptakisti takistuse määramiseks.

Näitena on toodud juhul, kus (vasakul püstteljel) $R_1 = 20 \Omega$ ja (paremal püstteljel) $R_2 = 20 \Omega$. Ehitades diagonaalid, nagu joonisel näha, määrab nende lõikepunkt rööptakistite kogutakistuse, mis antud juhul on 10Ω . Proovige sõnastada selle nomogrammi kasutusjuhend!

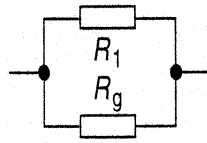
1.14 Takistite segaühendus

Segaühendus on selline kombinatsioon, kus esineb nii takistite jada- kui rööpühendust. Segaühenduse võimalike lülituste arv on väga suur. Arvutusteks ja mõistmiseks tuleb segaühendust skeemil järkjärgult lihtsustada, kasutades eespooltoodud jada- ja rööpühenduse valemeid. Ettekujutuseks mõni lihtne näide.





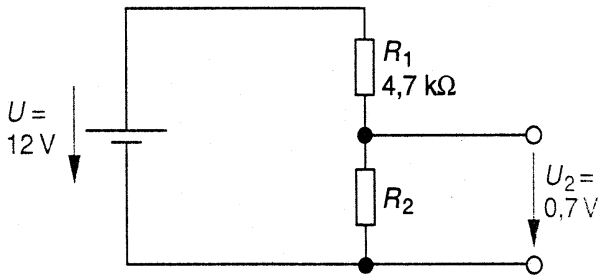
$$R_g = R_2 + R_3$$



$$R_E = \frac{R_1 \cdot R_g}{R_1 + R_g}$$

Pingejagur

Üks arvestatav segaühenduse arvutuste kasutusviis on pingejaguri loomine. Pingejagurit kasutatakse mõõtetehnikas mõõtepiirkondade laiendamiseks või elektroonikaelementide sobitamisel. Vaatame näidet, kus 12 V toiteallikaga skeemis on 4,7 kΩ takistiga vaja jadamisi lülitada takisti R_2 , et selle klemmidel saada 0,7 V pinget U_2 . Vaja on määrata takisti R_2 väärtus.



Kõik sõltub nüüd sellest, milline on sellele pingele lülitatav tarviti.

Eeldades, et selle tarviti takistus on väga suur (ehk kui pingejagur on koormamata), saab kasutada jadaühenduse valemeid: Kui see nii pole, tuleb juhtumit vaadelda kui segaühendust.

Koormamata juhul:

$$I = \frac{U}{R_1 + R_2}$$

$$U_1 = I R_1 = U \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$U_2 = I R_2 = U \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Siit R_2 saamiseks on vaja ta viimasest valemist avaldada

$$U_2 (R_1 + R_2) = U R_2$$

$$U_2 R_1 + U_2 R_2 = U R_2$$

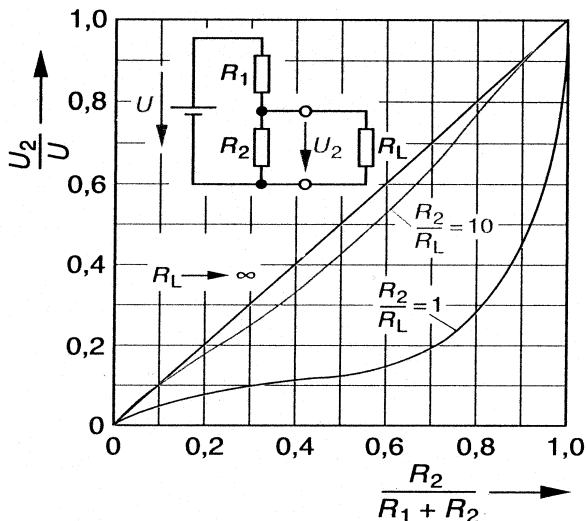
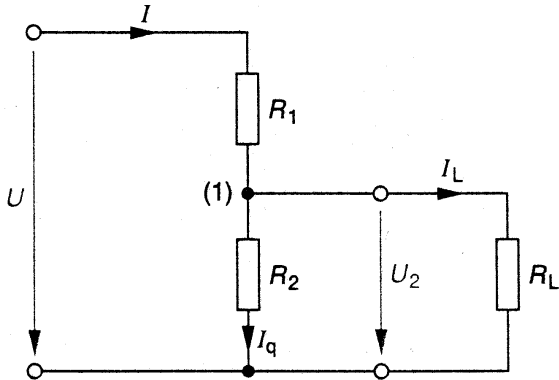
$$U_2 R_1 = U R_2 - U_2 R_2$$

$$U_2 R_1 = (U - U_2) R_2$$

$$R_2 = R_1 \frac{U_2}{U - U_2}$$

$$R_2 = 4700 \frac{0,7}{12 - 0,7} = 291 \Omega$$

Valida tuleb 300 Ω takisti.



1.15 Keemilised vooluallikad

Alalisvoolu saamiseks kasutatakse sageli keemilisi vooluallikaid. Need koosnevad positiivsest ja negatiivsest elektroodist ning elektroodide vahet täitvast elektrolüüdist ning muundavad keemilise energia vahetult elektrienergiaks.

Keemilised vooluallikad on

- ühekordselt kasutatavad
 - galvaanielemendid
 - kuivelemendid
- korduvalt kasutatavad – akud (akumulaatorid)

Keemiliste vooluallikate tunnussuurusteks on

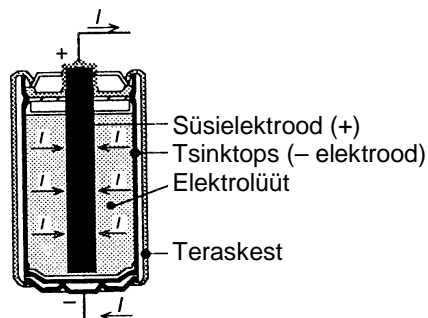
- nimipinge voltides (V) – uue elemendi klemmipinge
- mahtuvus ampertundides (Ah) – elektrihulk, mida värske element on võimeline andma kindlatel tühjendustingimustel

- säilimisaeg – ajavahemik, mille lõpul on toatemperatuuril säilitatud allikal alles veel kindel osa (näiteks 90%) mahtuvusest; säilitamise piirae on elemendile märgitud
- kasutegur (akudel) – laadimisel kulutatud energia suhe tühjendamisel saadavasse energiasse

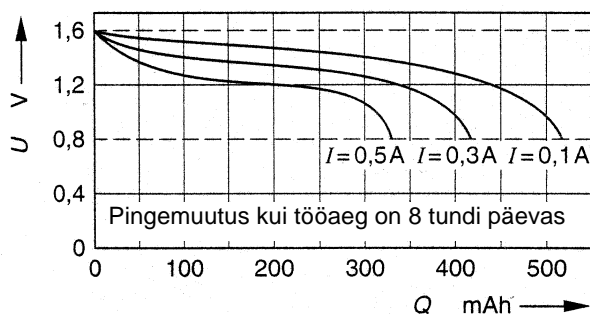
Kuivelemendid

Tänapäeval enamlevinuimaks on väikse sõrme jämedused AA või R6 tähistusega elemendid. Kuigi kõik on 1,5 V nimipingega, erinevad nad omavahel siiski ehituselt, mahtuvuselt, säilivuselt ja kasutusalaalt.

Klassikaline kuivelement on tsink-süsielement (nn. Leclanché element), mille positiivseks elektrodiks on keskel asuv söepulk, negatiivseks – tsinktops, mis odavamatel on ühtlasi kestaks, kallimatel aga ümbritsetud plastist või isoleeritud terasest mantliga. Elektrodide vahel on elektrolüüdiks ammoniumkloriid.



Elemendi koormamisel pinge pidevalt alaneb. Pauside ajal element taastab osaliselt oma laengu. Seetõttu on mahtvus suurem ja tööiga pikem kui töö on pausiderohke. Mahtvus on ka seda suurem, mida väiksem on töövool. Joonisel on võrdluseks pinge muutus kolme erineva konstantse töövoolu korral kui tööaeg on kaheksa tundi päevas.



Vananedes niisuguse odava klassikalise elemendi tsinkkest korrodeerub ning võib rikkuda elektronseadme, mille toiteks teda kasutatakse. Niisugust puudust pole leeliselemendil, mida rahvusvaheliselt tuntakse nimega *Alkaline* (leelis inglise keeles). Ka on ta suurema mahtuvuse ja pikema säilivusega. Leeliselemendi positiivne

elektrood on mangaandioksiidist, mille sees asub negatiivne tsinkelektrood. Elektrolüüdiks on kaaliumhüdrosüüd. Sisetakistus on väiksem, seetõttu muutub klemmipinge koormusest sõltuvalt vähem.

Võrdluseks:

	Tsink-süsi-element	Leelis-element
Nimipinge, V	1,5	1,5
Pingepiirkond, V	1,3...1,1	1,4...0,8
Nimivool, mA	30	30
Mahtuvus, Ah	1,0	1,6
Isetühjenemine 20 °C juures	1% kuus	15% kolme aastaga
Töötemperatuur		-30...+70 °C

Väikestes seadmetes kasutatakse tabletikujulisi hõbeoksiid- ja liitiumelemente.

Hõbeoksiidelement on samuti leeliselement. Negatiivne on tsinkelektrood, positiivne – hõbeoksiid.

Liitiumelemendi positiivne elektrood on liitiumist, negatiivne näiteks liitium-vääveldioksiidist. Elektrolüüdiks on orgaaniline aine, näiteks atsetoonnitril. Sellise elemendi energiatihedus (Wh/g) on suurem kui hõbeoksiidelementidel. Hea hermeetilisuse tõttu on isetühjenemine väga aeglane.

	Hõbeoksiid-element	Liitium-element
Nimipinge, V	1,5	3
Pingepiirkond, V	1,3...1,1	2,9...2
Mahtuvus, Ah	0,03...0,18	
Isetühjenemine 20 °C juures	<10 % aastast	Laoaeg kuni 10 aastat
Töötemperatuur	>0 °C	-50...+70 °C

Kasulikke soovitusi

- kui seadet pikemat aega ei kasutata, tuleb elemendid välja võtta, et vältida isetühjenenud elementidest eralduvate ainete söövitavat mõju
- asendada tuleks kõik elemendid korraga, et suurendada töökindlust
- tabletikujulisi elemente pole soovitatav paigaldamisel sõrmedega puudutada, sest higi võib tableti pinda oksüdeerida ning põhjustada hiljem vooluringi katkestuse
- soovitatav säilitustemperatuur on 5...100 °C
- elemente ei laeta
- korrasolekut saab kontrollida koormatud elemendi pinge mõõtmisega

Akud

Aku ehk akumulaator on korduvalt laetav keemiline vooluallikas. Akut kasutatakse liikurseadmete toiteallikana, kohtkindla reservtoiteallikana katkematu toite süsteemides (UPS – *uninterruptible power*)

supply), avari- ja signalisatsioonisüsteemides, elektrijaamades jne.

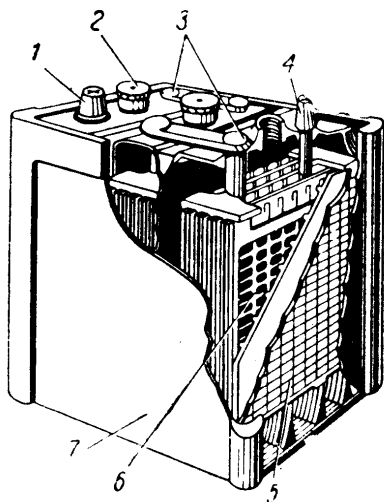
Aku koosneb anumast, elektrolüüdist (mis uuemal ajal on sageli geelitaoline) ja sellesse sukeldatud elektrodidest ehk plaatidest, mida hoiavad üksteisest eemal separaatorid.

Aku laadimiseks juhitakse temast läbi alalisvool ning elektrienergia salvestub seal keemilise energiana. Töötamisel muutub keemiline energia elektrienergiaks ning aku tühjeneb.

Akud liigitatakse

- happe- ehk pliiakud
- leelisakud:
 - raudnikkelaku
 - kaadmiumnikkelaku
 - hõbetsinkaku
 - hõbekaadmiumaku
 - õhktsinkaku
 - tsinkklooraku
 - naatriumväävelaku

Pliiaku anum 7 on isoleermaterjalist, elektrolüüdiks on väävelhappe lahus, positiivsed plaadid 6 on pliioksiidist ja negatiivsed plaadid 5 urbest pliiist. Ühe akupurgi tööpinge on 2 V, suurema pinge saamiseks ühendatakse mitu purki jadamisi ühendusliistudega 3. Klemmid 1 ja 4 on ainult esimesel ja viimasel purgil. Elektrolüüdi aurumise vältimiseks on iga purk suletud korgiga 2.



Aku mahtvus sõltub oluliselt temperatuurist: $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ juures on mahtvus umbes kaks korda väiksem kui $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$ juures. Allikapinge sõltub aku laadimisastmest, mille näitajaks on elektrolüüdi tihedus.

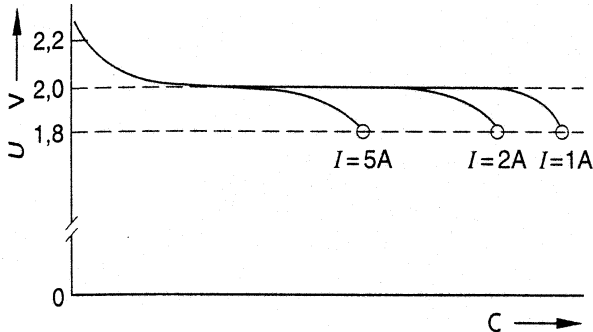
Allikapinge voltides = elektrolüüdi tihedus $\text{kg/l} + 0,84$. Kui elektrolüüdi tihedus on $1,28\text{ kg/l}$ ja aku temperatuur $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, siis on täislaetud aku allikapinge $2,12$ volti.

Kõrgema pinge saamiseks ühendatakse akud jadamisi akupatareiks. Nii kasutatakse autodel enamasti kuuhest purgist koosnevat 12 voldise pingega akut, uuematel autodel on ka teine, 48 voldine aku.

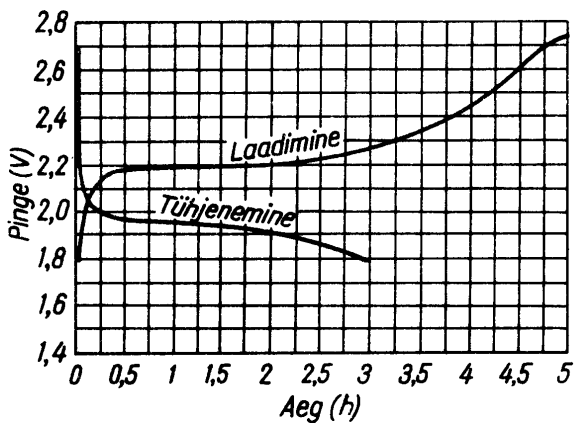
12-voldise 60 Ah mahtuvusega autoaku koormamisel 3-amprise vooluga on tühjendusaeg

$$t = \frac{C}{I} = \frac{60}{3} = 20 \text{ tundi.}$$

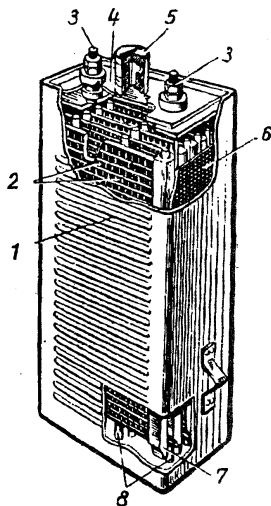
Pliiaku suurim võimalik kasutegur on 80%. Pinge sõltub tühjendamisvoolust, nagu kuivelemendilgi:



Aku laadimispinge peab olema allikapingest kõrgem. Akude kasutamise pikaajalised kogemused on näidanud, et väiksema vooluga laadimine vähendab aku eluiga oluliselt kiiremini kui suurema vooluga laadimine.



Leelisaku anum on terasplekist, elektrolüüdiks on kaalium- või naatriumhüdroksiidi lahus, positiivsed plaadid on nikkelhüdroksiidist, negatiivsed plaadid raudnikkelakus rauapulbrist, kaadmiumnikkelakus kaadmiumpulbrist.



Leelisaku suurim kasutegur on 55%. Raud- ja kaadmiumnikkelaku keskmine tööpinge on 1,25 volti, hõbetsinkakul 1,4 volti. Pliiakudega võrreldes on nad väiksemad ja vastupidavamad.

Taskutelefoni 1 Ah mahutavusega 3,6-voldise aku koormamisel 0,2-amprise vooluga on tühjendusaeg

umbes $t = \frac{C}{I} = \frac{1}{0,2} = 5$ tundi. Kui sama akut

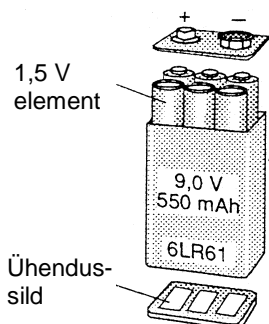
koormata 0,4-amprise vooluga, on mahtuvus alla 2,5 tunni.

1.16 Allikate ühendusviisid

Vooluallikaid iseloomustab nende allikapinge ehk elektromotoorjõud E , sisetakistus R_0 ja nimivool I . Nimivool on suurim vool, millega võib allikat **kestvalt** koormata.

Allikate jadaühendus

Allikapinge suurendamise eesmärgil võib allikaid ühendada jadamisi. Esimese allika negatiivne klemm ühendatakse teise allika positiivse klemmiga, teise negatiivne klemm kolmanda positiivse klemmiga jne. Nii on näiteks lapikus 9 V patareis jadamisi ühendatud kus 1,5 V allikapingega elementi.



Jadaühendusel

- allikapinged liituvad
 $E = E_1 + E_2 + E_3$
- allikate sisetakistused liituvad
 $R_0 = R_{01} + R_{02} + R_{03}$
- voolutugevus ei tohi ületada kõige nõrgema allika nimivoolu

Koormusvoolutugevus sõltub oluliselt patarei sisetakistusest:

$$I = \frac{nE}{nR_0 + R}$$

- n elementide arv
 E ühe elemendi allikapinge
 R_0 elemendi sisetakistus
 R koormustakistus (välistakistus)

Allikate rööpühendus

Suurema voolu saamiseks võib allikaid ühendada rööbiti.

Rööbiti võib ühendada ainult ühesuguse allikapingega elemente. Vastasel korral tekivad nn. tasandusvoolud ka rööpallika tühijooksul.

Rööpühenduse korral

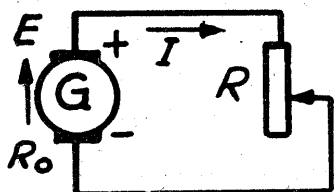
- allikapinge on võrdne elemendi allikapingega
 $E = E_1 = E_2 = E_3$
- patarei sisetakistus on elemendi sisetakistusest väiksem nii mitu korda, kui mitu elementi on ühendatud

$$R_0 = \frac{R_{01}}{n}$$

- patarei nimivool on ühe allika nimivoolust nii mitu korda suurem, kui mitu elementi on ühendatud

1.17 Muutuva takistusega vooluring

Praktikas esineb sageli juhtumeid, kus koormus-takistus muutub.



Vool

$$I = \frac{E}{R_0 + R}$$

Toiteallika arendatav võimsus

$$P_1 = EI = (U + U_0)I = UI + U_0 I = I^2 R + I^2 R_0.$$

Toiteallika arendatav võimsus koosneb kahest osast:

- tarvitile antav ehk kasulik võimsus
 $P_2 = UI = I^2 R$
- sisetakistuses soojuseks muutuv osa ehk kaovõimsus
 $P_0 = U_0 I = I^2 R_0$

Toiteallika kasutegur

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_0} = \frac{I^2 R}{I^2 R + I^2 R_0} = \frac{R}{R + R_0}.$$

Mis juhul on kasutegur maksimaalne?

Vaatleme kaht äärmusjuhist, nagu seda tehnikas asjadest arusaamise soovil sageli tehakse:

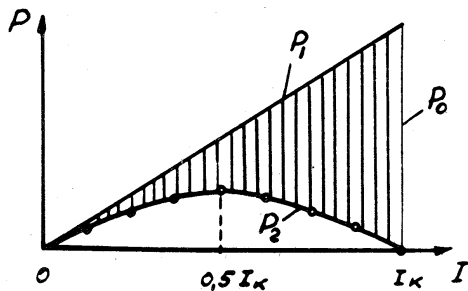
- tühijooks:
 $R = \infty$
 $I = \frac{E}{\infty} = 0$
 $P_2 = UI = 0$

- lühis:
 $R = 0$
 $I = \frac{E}{R_0} = I_k$
 Ka nüüd on
 $P_2 = UI = 0$, sest
 $U = IR = I_k R = I_k \cdot 0 = 0$.

Ilmselt peab tühijooksu ja lühise vahepeal olema takistus, mille juures tarvitile antav võimsus on suurim. Kõrgema matemaatika abil võib tõestada, et tarvil on suurim võimsus siis, kui $R = R_0$.

Tarvitile antav võimsus on suurim kui tarviti takistus võrdub toiteallika sisetakistusega. Sellist olukorda nimetatakse sobitatud talitluseks.

Joonisel on näidatud, kuidas muutub võimsus.



Kuidas muutub kasutegur?

- Lühise korral, kui $R = 0$, on kasutegur

$$\eta = \frac{R}{R + R_0} = \frac{0}{0 + R_0} = 0$$

- Sobitatud talitlusel, kui $R = R_0$, on kasutegur

$$\eta = \frac{R}{R + R_0} = \frac{R_0}{R_0 + R_0} = 0,5$$

- Tühijooksul, kui $R = \infty$, on kasutegur

$$\eta = \frac{R}{R + R_0} = \frac{1}{1 + \frac{R_0}{R}} = \frac{1}{1 + \frac{R_0}{\infty}} = 1,0$$

Siit võib järeldada:

- mida suurem on R/R_0 suhe, seda suurem on kasutegur; mis tühijooksus saavutab väärtuse 1
- kui $R = R_0$, siis on tarvitile antav võimsus suurim kuid kasutegur vaid 0,5, sest võimsuskadu allika sisetakistuses on samasuur.

Väikese (alla 10 W) võimsuse korral, kui energiakadu on tühine, võib valida tarviti takistuse $R=(1...3)R_0$. Nii on tagatud maksimaalne võimsus, kuid kasutegur on vaid 0,5...0,75.

Suurtes seadmetes on suur energiakadu väga halb, seepärast valitakse siis enamasti $R=(10...20)R_0$.

Kuigi tarvitile antav võimsus on mitu korda väiksem võimalikust, on kasutegur maksimaalne, üle 0,95.

Praktikas kasutatakse enamasti toiteallikaid, mille $R_0 \ll R$. Niisuguse toiteallika klemmipinget praktiliselt ei sõltu voolust, seepärast nimetatakse teda **püsipingevallikaks**.

Elektroonikas ja raadiotehnikas on kasutusel suure sisetakistusega vooluallikad. Siis $R_0 \gg R$ ja vool

$$I = \frac{E}{R_0 + R} \cong \frac{E}{R_0}$$

praktiliselt ei sõltu koormustakistusest. Niisugust allikat nimetatakse **püsivooluallikaks**.