

Energia

Väljaandja kinnitab õppematerjali vastavust kehtivale gümnaasiumi riiklikule õppekavale ning haridus- ja teadusministri poolt õppekirjandusele kehtestatud nõuetele.

MADIS REEMANN

ENERGIA

Füüsika õpik gümnaasiumile

Veebiõpik <http://õpik.füüsika.ee>

Retsenseerinud JAAN PAAVER, UKU PÜTTSEPP

Toimetanud KAIDO REIVELT

Keeletoimetaja PIRET PÖLDVER

Korrektuuri teinud LAURI KALDAMÄE

Küljendanud HEIKO UNT

Joonised teinud NILS AUSTA

Pildid joonistanud URMAS NEMVALTS

Fotod ja illustratsioonid: NILS AUSTA, MADIS REEMANN, JAANUS PLAAT, Wikipedia

Autoriõigus: Kirjastus Maurus, Eesti Füüsika Selts, MADIS REEMANN 2014
www.kirjastusmaurus.ee

ISBN 978-9949-9610-5-4

Kõik õigused käesolevale väljaandele on seadusega kaitstud.
Ilma autoriõiguse omaniku kirjaliku loata pole lubatud ühtki selle väljaande osa paljundada ei mehaaniliselt ega muul viisil.

Madis Reemann

ENERGIA

Füüsika õpik gümnaasiumile

Sisukord

Õpiku lugejale	7
Sissejuhatus	8

ALALISVOOL

1.1. Elektrivoolu tekkemehhanism.....	10
1.2. Ohmi seadus	12
1.3. Elektrimõõtmised.....	14
1.4. Takistuse sõltuvus temperatuurist.....	16
1.5. Elektromotoorjõud.	18

ELEKTRIVOOL KESKKONDADES

2.1. Elektrivool vedelikes	20
2.2. Elektrivool gaasis	22
2.3. Pooljuhtide elektrijuhtivus	24
2.4. p-n siire, pooljuhtdiod	26
2.5. Elektrist valgus ja valgusest elekter	28

VAHELDUVVOOL

3.1. Vahelduvvoolu genereerimine	30
3.2. Voolutugevuse, pinge ja võimsuse efektiivväärtused	32
3.3. Trafo. Elektrienergia ülekanne	34
3.4. Elektrimootor. Elektriohutusest.....	36

MOLEKULIDE SOOJUSLIKUMINE

4.1. Temperatuur	38
4.2. Ideaalne gaas	40
4.3. Ideaalse gaasi olekuvõrrand.....	42
4.4. Isoprotsessid	44
4.5. Siseenergia ja selle muutumisviisid.....	46

TERMODÜNAAMIKA

5.1.	Gaasi töö. Soojushulk	48
5.2.	Termodünaamika seadused	50
5.3.	Entroopia	52
5.4.	Soojusmasin	54
5.5.	Sisepõlemismootor	56
5.6.	Auruturbiin ja külmik	58

LISAD JA TÄIENDUSED

Lisa 1.1.	Elektrivoolu tekkemehhanism	61
Lisa 1.2.	Ohmi seadus	62
Lisa 1.3.	Elektrimõõtmised	64
Lisa 1.4.	Takistuse sõltuvus temperatuurist	65
Lisa 1.5.	Elektromotoorjõud. Ohmi seadus kogu vooluringi kohta	66
Lisa 2.1.	Elektrivool vedelikes	68
Lisa 2.2.	Elektrivool gaasis	70
Lisa 2.3.	Termistor ja fototakisti	71
Lisa 2.4.	p-n siire, pooljuhtdiod	72
Lisa 2.5.	Elektrist valgus ja valgusest elekter	74
Lisa 3.1.	Vahelduvvoolu genereerimine	76
Lisa 3.2.	Voolutugevuse, pinge ja võimsuse efektiivväärtused	77
Lisa 3.3.	Trafo. Elektrienergia ülekanne	79
Lisa 3.4.	Elektrimootor. Elektriõhutusest	81
Lisa 4.1.	Temperatuur	83
Lisa 4.2.	Ideaalne gaas	84
Lisa 4.3.	Ideaalse gaasi olekuvõrrand	86
Lisa 4.4.	Isoprotsessid	87
Lisa 4.5.	Siseenergia ja selle muutumisviisid	88
Lisa 5.1.	Gaasi töö ja soojushulk	89
Lisa 5.2.	Termodünaamika seadused	91
Lisa 5.3.	Entroopia	92
Lisa 5.4.	Soojusmasin	94
Lisa 5.5.	Sisepõlemismootor	95
Lisa 5.6.	Auruturbiin ja külmik	96

Raudvara	98
Indeks	104



Õpiku lugejale

Käesolev õpik käsitleb energiat, mille liikidest on inimese jaoks olulisemad soojus- ja elektrienergia. Energia tarbimise kasv on lahutamatult seotud tsivilisatsiooni arenguga ja uute ressursside kasutuselevõtt pole üksnes tehnoloogiline, vaid globaalne probleem.

Õpiku **põhitekst** asub lk 8–59 ja koosneb **25st õppetükist**, iga õppetükk paikneb **paarisleheküljel**, mida on mugav pilguga haarata. Energiakursuse omandamist peaksid soodustama õpiku teises pooles, lk 61–97 õppetükkide kaupa toodud täiendused: **lisamaterjal**, **ajalooline taust**, pisut keerukamad **probleemid** ja **kokkuvõte**. **Raudvara** ja **indeks** asuvad õpiku lõpus lk 98–104. Viited teistele õpikutele on kirjutatud rohelise värviga: FLA – „Füüsikalise looduskäsitluse alused“, M – „Mehaanika“, EM – „Elektromagnetism“ ja MM – „Mikro- ja megamaailma füüsika“.

Aadressilt <http://õpik.füüsika.ee> leiate ka käesoleva õpiku veebiversiooni.

Energilist õppimist!



Sissejuhatus

Valgus-, soojus-, toiduainete, tuule- ja voolava vee energia on pärit Päikeselt. Energia jõuab Maa atmosfääri välispiirini elektromagnetkiirgusena, mille võimsus ruutmeetri kohta on umbes 1400 kW. Atmosfäär laseb läbi nähtavat valgust ning soojuskiirgust. See energia käivitab fotosünteesi ja hoovused, paneb liikuma õhu, põhjustades tuule, ning aurustab vett, mis kondenseerub kõrgemates kohtades, tekitades vee loodusliku ringkäigu. Päikeselt tulnud energia arvel on toimunud väga pika aja jooksul fossiilsete kütuste tekkimine maakoos. Päritolult on erinev tuumaenergia, sest arvatakse, et näiteks uraan on tekkinud umbes 6,6 miljardi aasta eest supernoovas. Fossiilseid kütuseid ja tuumaenergiat loetakse taastumatuks energialiigiks.

Organismi eksistentsiks on vajalik nii aine- kui ka energiavahetus väliskeskkonnaga. Inimese päevane energiatarve toidus on viimase 100 000 aasta jooksul olnud oluliste muutusteta ligi 10 MJ (2400 kcal). Küll aga on ühiskonna arenguga väga palju kasvanud üldine energiatarve, eeskätt seoses uute energialiikide kasutuselevõttuga. Tule tegemine soojendamiseks ja toidu valmistamiseks suurendas energiavajadust üle kahe korra. Paikseks jäänud põllumees ja käsitöölaine tarbis juba 50 MJ energiat päevas. Edasi võeti kasutusele veoloomad, purjelaevad, tuulikud ja vesiveskid. Olulise muutuse energiatarbes andis aurumasina ja elektrienergia kasutuselevõtt. Inimesed hakkasid rohkem reisima ja soovisid koduses majapidamises suuremaid mugavusi. 20. sajandi esimesel poolel oli majanduslikult arenenud riikides energiakulu inimese kohta päevas jõudnud üle 300 MJ. Tänapäevase tehnika- ja infoühiskonna liige tarbib keskmiselt 1000 MJ ööpäevas, millest maailma keskmine on umbes 5 korda väiksem.

Termin *energiaallikas* pole füüsikalises mõttes täpne, sest tegelikult ei toimu energia tekitamist, vaid ühe energialiigi muutumine teiseks. Päikeses toimub näiteks tuumaenergia muundumine soojusenergiaks.

Põhilised inimese kasutatavad energialiigid on soojus- ja elektrienergia. Soojusenergiat kasutatakse ruumide kütmiseks ja vee soojendamiseks. Üle 80% elektrienergiast saadakse soojus- ja tuumaelektrijaamades, kus vahelduvvoolugeneraatori paneb käima auruturbiin. Tööstuses ja viimasel ajal ka transpordis eelistatakse elektrienergiat, mida saab suhteliselt hea kasuteguriga muundada jõumasinate mehaaniliseks tööks ja mis ei saasta oluliselt ümbritsevat keskkonda.

Inimeste energiatarve pole ajalises plaanis ühtlane ning see tekitab energia salvestamise vajaduse. Naftat, kivisütt ja põlevkivi võib koguda tagavaraks, kuid elektrienergia salvestamine suures koguses on keeruline ja kallis. Soojusenergia salvestamine mitte eriti kõrgel temperatuuril pole kasulik, kuna sellise energia muundamine mehaaniliseks tööks oleks väikse kasuteguriga.

Energia tarbimises on valitsenud kogu aeg ebavõrdsus. Väga palju inimesi piirdub ka kaasajal eluks vajaliku miinimumiga. Samuti on ressursid piiratud ja jaotunud riigiti väga erinevalt. Need vastuolud on põhjustanud energiakriise ja riikidevahelisi konflikte. Maailma rahvastiku kasv ja nõudmiste suurenemine pingestab ka tulevikus energiaprobleemide lahendamist. Tehniliste küsimuste kõrval on kõige raskem muuta inimese mõtteviisi ja panna teda vähem ja säästlikumalt tarbima.

Mõiste *energia* tänapäevases mõttes toodi füüsikasse 19. sajandi keskel. Energia jäävuse seadus on kirja pandud ka esimeses eestikeelses füüsikaõpikus 1855. aastal:

Jäädvauſſe wäggi on ſe lodud ſeädus, et iggaüks aſſi, ſel ellu ei olle, omma paiga peäle rahhuſ jääb ja ennaſt iſſe ommaſt paigaſt ärra ei ligu, kui ta ei ſa teiſe läbbi ligutud, agga kui temma ſord on ligutud, et temma ſiis jääb liguma ja iſſeennefeſt ſeiſma ei jä.



ALALISVOOL

1.1 Elektrivoolu tekkemehhanism

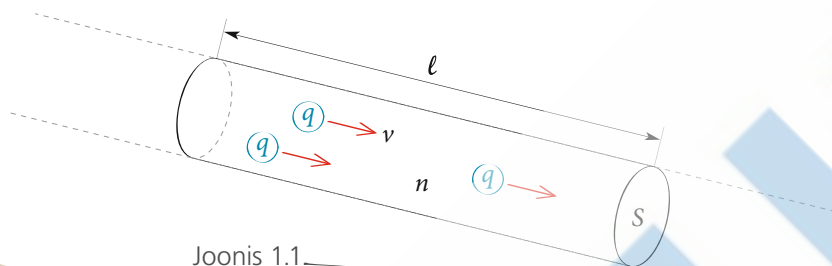
Elektrivooluks nimetatakse laengukandjate suunatud liikumist. Elektrivoolu iseloomustavaks suuruseks on **voolutugevus**, mis näitab kui suur elektrilaeng läbib juhtme ristlõiget ajaühikus. Voolutugevuse SI ühik on **1 amper (1 A)**. Juhi ristlõiget läbib sel juhul 1 sekundi jooksul laeng 1 kulon. **Voolu suunaks on kokku lepitud positiivsete laengute suunatud liikumise suund.** Joonisel 1.1. on kujutatud ühte vooluringi lõiku pikkusega l , milles liiguvad elektrivälja sihis ühesugused osakesed laenguga q keskmise kiirusega v .

Olgu laengukandjate arv juhi ruumalaühikus ehk kontsentratsioon n ja aja t jooksul jõuavad kõik laengud läbida lõigu parempoolse otsa pindalaga S . Laengukandjate arv $N = nV = nSl$, milles $l = vt$ ja juhtme ristlõiget läbinud kogulaeng $qN = qnSvt$. Voolutugevuse leidmiseks tuleb kogulaeng jagada ajaga, seega

$$I = qnSv \quad (1.1.)$$

Saadud valemist on näha, millised suurused määravad voolutugevuse juhis. Kolm nendest, q , n ja v , on mikroosakesi iseloomustavad suurused. Metallide puhul on laengukandjateks tuuma mõjupiirkonnast vabanenud juhtivuselektronid, mis liiguvad positiivsete laengukandjate liikumise vastassuunas ning nendel on elementaarlaeng $q = -e = -1,60 \cdot 10^{-19}$ C. Vabade elektronide kontsentratsioon n välistingimustest oluliselt ei sõltu, küll aga elektronide triivimise kiirus v metalli kristallvõre aatomite vahel. Vabade elektronide puhul tuleb eristada kahte arvvaartuse poolest oluliselt erinevat kiirust, **kaootilise soojusliikumise kiirus** ja elektrivälja poolt tekitatud **triivikiirus**. Esimene nendest on palju suurem, aga kaootilisuse tõttu triivliikumisse mingit panust ei anna. **Elektrivoolu tugevuse määrab elektrivälja poolt tekitatud aeglane triivikiirus.** Kui 1 mm diameetriga vaskjuhtmes triivivad elektronid kiirusega 0,1 mm/s, on voolutugevus umbes 1 A. Elektronide kaootilise liikumise kiirus on toatemperatuuril ligi miljard korda suurem.

Võib jääda mulje, et taskulambi sisselülitamisel võtaks süttimine kaua aega, kuni elektronid patareist lambini triivivad. Nii see ei ole, sest vabu elektrone on kogu vooluringi ulatuses ning elektriväli levib väga kiiresti, valguse kiirusega.



Joonis 1.1

ülesanded

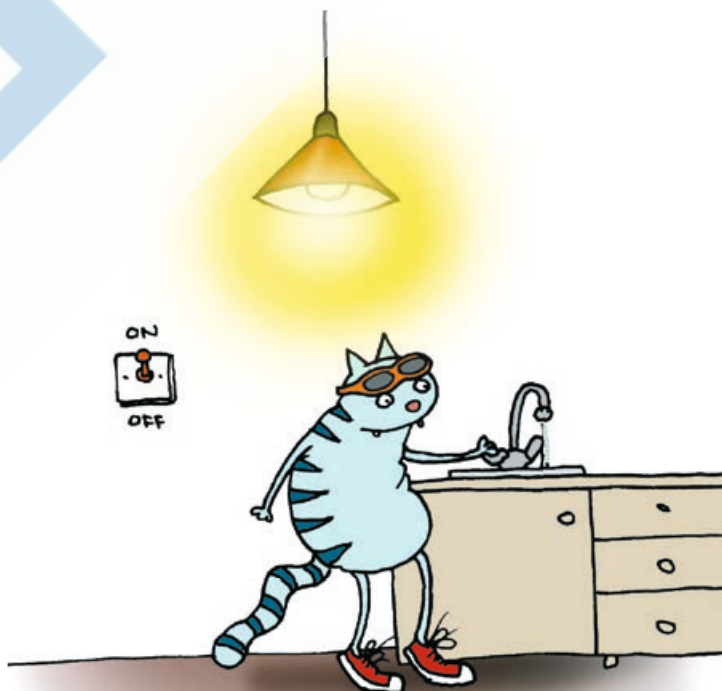
1. Kuuldeaparaadi vooluallikas mahutab 430 mAh. Kui suure tugevusega voolu tarbitakse keskmiselt, kui vooluallikas peab vastu 3 kuud?
2. LED-valgustit läbib vool tugevusega 15 mA ja tootja lubab tema tööeks 25 000 tundi. Kui suur elektrilaeng läbib valgustit selle aja jooksul?
3. Vasest juhtmes ristlõikepindalaga $1,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$ on vabade elektronide kontsentratsioon $8,4 \cdot 10^{28} \text{ m}^{-3}$ ja kiirus $0,37 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$. Arvuta voolutugevus juhtmes.
4. Eelmises ülesandes asendati vasest juhe samade mõõtmetega alumiiniumist juhtmega, kus voolutugevus oli sama, aga vabade elektronide kontsentratsioon 1,4 korda väiksem. Kas alumiiniumist juhtmes on elektronide triivkiirus suurem või väiksem? Mitu korda?

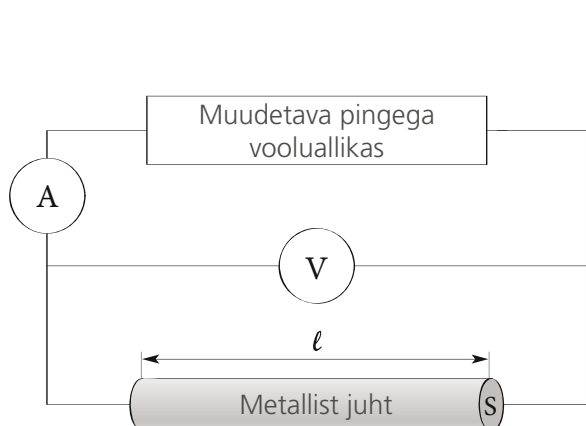
küsimused

Mille poolest erinevad vabade elektronide soojusliikumise ja suunatud liikumise kiirused?

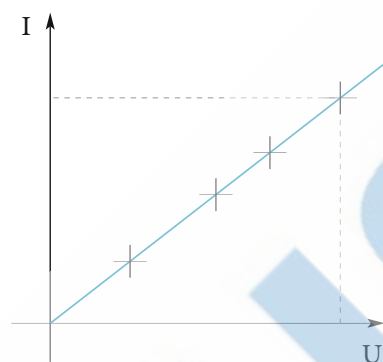
Miks elektronide soojusliikumise suur kiirus voolutugevust ei mõjuta?

Vaata ka lisamaterjali lk 61.





Joonis 1.2. a)



Joonis 1.2. b)

1.2 Ohmi seadus

Kui mõõta metallist juhti läbiva voolutugevuse sõltuvust tema otstele rakendatud pingest (joonis 1.2. a), siis on näha, et **voolutugevus juhis on võrdeline pingega juhi otstel** (joonis 1.2. b).

Seega on antud juhi jaoks pinge ja voolutugevuse suhe sama ning seda suhet, takistust R , võib kasutada metallist keha iseloomustamiseks voolu takistamise seisukohalt. Seos ongi valemi kujul esitatud Ohmi seadus.

$$I = U/R \quad (1.2.)$$

Kui sama kehaga korrata katset kõrgemal temperatuuril, jääb sõltuvus võrdeliseks, kuid graafiku tõus on väiksem. Temperatuuri tõus suurendab metallist keha takistust. Saksa füüsiku Georg Simon Ohmi poolt korraldatud katsed näitasid, et metalli takistus sõltub juhi pikkusest, ristlõikepindalast ja materjalist, ning hilisemate mõõtmistega leiti seos, kus ρ on materjali eritakistus, mis määratakse katseliselt.

$$R = \rho/l \quad (1.3.)$$

Võrdeline sõltuvus pinge ja voolutugevuse vahel pole üldkehtiv. Näiteks ioone sisaldavas lahuses, pooljuhis ja elektrivoolu juhtivas gaasis on sõltuvus keerulisem.

Eritakistuse järgi võib aineid ja materjale jaotada juhtideks, isolaatoriteks ja pooljuhtideks. Juhtidel on eritakistus suhteliselt väike ja isolaatoritel (dielektrikutel) suur. Pooljuhtide eritakistus on vahepealne, kusjuures see sõltub olulisel määral temperatuurist, valgustatusest ja lisanditest.



küsimused

ülesanded

1. Juhi otstele rakendati pinge 6 V ja siis läbis teda vool 1,5 A. Kui suur vool läbis sama juhti, kui talle rakendati pinge 2 V?
2. Vooluallikaga Varta AA rakendati tarbijale takistusega 0,2 k Ω pinge 1,5 V. Arvuta voolutugevus tarbijas amprites ja milliamprites.
3. Metalljuhtme takistus on 0,2 oomi. Kui suur on 6 korda pikema ja 6 korda väiksema ristlõikepindalaga samast materjalist juhtme takistus?
4. Arvuta reostaadi takistus, kui reostaat kujutab endast 20 m pikkust, 0,4 mm² ristlõikepindalaga konstantaanist takistustraati eritakistusega 0,49 $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$.

Mööteriistu saab ühendada vooluringi erinevalt, näiteks jadamisi või rööbiti tarbijaga. Kuidas tuleks ühendada tarbija suhtes ampermeeter ja voltmeeter?

Missuguse takistusega peaks olema ideaalne amper- ja voltmeeter?

Juhtivus G on takistuse pöördväärtus. Missugune näeks välja Ohmi seaduse valem juhtivuse kaudu?

Vaata ka lisamaterjali lk 62.

1.3. **e**lektrimõõtmised

Elektrimõõteriistu võib jaotada **osutmõõteriistadeks** ja **numbrilisteks mõõteriistadeks**. Vastavad sünonüümid on **analoog- ja digitaalmõõteriist**.

Vooluga raamile mõjub magnetväljas jõud ja voolutugevust saab mõõta magnetväljas vooluga raamile mõjuva jõu kaudu (joonis 1.3.). Raami vastaskülgedele mõjuvad jõud pööravad seda päripäeva. Raami külge pannakse osuti ja jõu tasakaalustamiseks spiraalvedrud.

Osuti kaldenurga järgi saab määrata voolutugevuse. Kui laseme voolu läbi takistuse, saame määrata ka pinget, mis on võrdeline voolutugevusega. Digitaalses mõõteriistas muudetakse pinge muunduriga kahendkoodiks ja see omakorda ekraanil numbriliseks näiduks (joonis 1.4.).

Elektriliste suuruste mõõtmisel esinevad erineva päritoluga vead (FLA lk 55). Elektrimõõtmistel on tegemist B-tüüpi mõõtemääramatusega, mis saadakse mõõteriista tootja poolt antud mõõteriista täpsuse hinnangust. Ebatäpsust iseloomustatakse **absoluutse ja relatiivse piirveaga**. Üleskirjutus katse protokollis $I = (1,26 \pm 0,05) \text{ A}$ tähendab seda, et voolutugevuse mõõdetud väärtus on 1,26 A, absoluutne piirviga $\Delta I = 0,05 \text{ A}$ ja voolutugevuse tegelik väärtus asub vahemikus 1,21 A kuni 1,31 A. **Relatiivne piirviga** on absoluutse piirvea ja mõõtetulemuse suhe, mis antud juhul on umbes 4% ning iseloomustab ka mõõtmise täpsust.

Osutmõõteriistale on kirjutatud täpsusklass (joonis 1.3. a). See on arv, mis näitab mõõteriista suhtelist piirviga protsentides maksimaalse näidu korral. Täpsusklassid võivad olla 4; 2,5; 2,0; 1,5; 1,0; 0,5; 0,2; 0,1; 0,05 ja 0,02. Mida väiksem arv, seda täpsem mõõteriist. Kui laboratoorses töös kasutataval ampermeetril on täpsusklass 2,5 ja mõõtepiirkond 2 A, siis ampermeetri **mõõtemääramatus (absoluutne piirviga)** $\Delta I = \pm 0,05 \text{ A}$. Numbrilise mõõteriista passis on esitatud mõõtemääramatus näiteks kujul $\pm 0,5\% \pm 2D$. See tähendab, et piirviga on 0,5% näidust pluss näidu viimase numbri 2 ühikut.

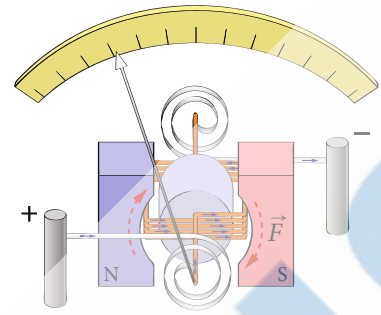
Elektrimõõtmistel tuleb arvestada, et mõõteriistad on samuti elektrivoolu tarbijad (tarvitid). Mõõteriistade ühendamisel vooluringi peaks riistade põhjustatud muutused olema võimalikult väiksed. Voolutugevust mõõdetakse ampermeetriga, mis ühendatakse tarvitiga jadamisi. Ampermeetril endal on samuti takistus ja see muudab voolutugevust vooluringis. Selleks, et muutus oleks väike, peaks ampermeetri takistus olema tarviti omast oluliselt väiksem. Voltmeeter seevastu ühendatakse rööbiti ja tema takistus peaks olema võimalikult suur.

Elektrimõõtmisi kasutatakse ka mitteelektriliste suuruste kaudseks mõõtmiseks. Selleks tuleb mõõdetav suurus muuta pingeks või vooluks. Termopaar koosneb kahest erinevast metallist vardast, mille ühed otsad on kokku joodetud. Kui joote kohta kuumutada, tekib vabade otste vahel pinge, mille väärtus oleneb joote kohta temperatuurist. Teades pinge ja temperatuuri seost, saame määrata temperatuuri kaudselt pinge mõõtmise abil. Lisaks toodud näitele on palju füüsikalisi nähtusi, kus mehaaniline, soojuslik või kiirguse energia muudetakse elektrienergiaks.

Elektrimõõtmiste eeliseks on asjaolu, et mõõtetulemusi on hea üle kanda, salvestada, töödelda ja kasutada protsesside automaatseks juhtimiseks.



Joonis 1.3. a) osutmõõteriist



Joonis 1.3. b) tööpõhimõte

ülesanded

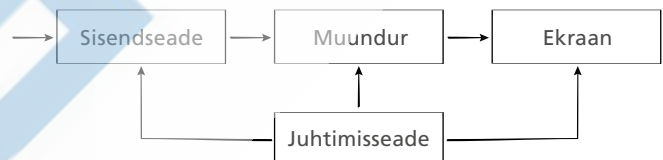
1. Voltmeetri täpsusklass on 4 ja mõõtepiirkond 6 V. Arvuta voltmeetri absoluutne piirviga. Kui suur on relatiivne piirviga 3 V näidu korral?
2. Digitaalne voltmeeter näitab pinget 403 V. Mõõtepiirkond on 1000 V ja mõõteriista passis seisab kirjas, et selle mõõtepiirkonna määramatus on $\pm 0,8\% \pm 2D$. Esita pinge koos absoluutse piirveaga.

küsimused

Kas osutmõõteriista absoluutne viga sõltub näidust?

Miks soovitatakse valida mõõtepiirkond, milles näit on võimalikult suur?

Vaata ka lisamaterjali lk 64.



Joonis 1.4. a) digitaalmõõteriista põhimõtteline skeem



Joonis 1.4. b) multimeeter

1.4. **t**akistuse sõltuvus temperatuurist

Temperatuuri tõustes väheneb metallis vabade elektronide triivikiirus, kuna intensiivistub kristallvõre aatomite võnkumine. See takistabki elektronide liikuvust ja metalli takistus kasvab. Katsed näitavad, et metalli takistuse sõltuvus temperatuurist on ligikaudu lineaarne (joonis 1.5. a).

Selle sõltuvuse võib kirja panna valemiga, kus R_0 on takistus $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ juures, α ($^{\circ}\text{C}^{-1}$ või K^{-1}) **takistuse temperatuuritegur** ja t temperatuur Celsiuse kraadides.

$$R = R_0(1 + \alpha t) \quad (1.4.)$$

Takistuse temperatuuritegur on puhastel metallidel suurusjärgus $10^{-3}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, näiteks volframil $0,0045\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$.

Lülitades toas põlema algul toatemperatuuril oleva hõõglambi, tõuseb volframist hõõgniidi temperatuur kiiresti rohkem kui kaks tuhat kraadi ja hõõgniidi takistus ligi kümme korda. Hõõglamp kipubki läbi põlema sisselülitamisel, mil tema takistus on veel väike ja lambis eralduv võimsus umbes 10 korda suurem kui stabiliseerunud tööolukorras. Elektrilistes küttekehades kasutatakse tavaliselt sulameid, mille takistuse temperatuuritegur on väike. Näiteks nikeliinil on see umbes $10^{-4}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ja elektripliidi takistus on külmalt ja kuumutatult praktiliselt ühesugune. On aineid, mille takistuse temperatuuritegur on negatiivne, st takistus temperatuuri tõustes väheneb. Elektrolüütide, grafiidi ja pooljuhtide takistus väheneb mittelineaarselt.

Teades keha takistuse sõltuvust temperatuurist, saame seda keha kasutada näiteks takistustermomeetri andurina: vooluallikaga ühendatud anduri temperatuuri muutus põhjustab takistuse ja voolutugevuse muudu. Voolu muutust on aga mugav mõõta, salvestada, töödelda ning protsesside automatiseeritud juhtimisel rakendada.

20. sajandi alguses avastati nähtus, kus metalli takistus muutus väga madalal temperatuuril hüppeliselt nulliks. Tahke elavhõbedaga toimus see temperatuuril $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$ (joonis 1.5. b). Sellises olukorras voolu soojuslik toime kaob ja kord liikuma pandud vool ei lakkagi. Hiljem avastati ülijuhtivus veel paljudel ainetel ja ka kõrgematel temperatuuridel. Kui saaksime ülijuhtivuse tekitada looduses esinevatel temperatuuridel, saaksime elektrienergia edastamisel esinevaid soojuslikke kadusid vältida. On valmistatud aineid, milles ülijuhtivusele üleminek toimub kõrgemal temperatuuril, näiteks HgBaCuO $-138\text{ }^{\circ}\text{C}$ juures.



ülesanded

1. Kui hõõglamp põleb, on tema takistus $810 \, \Omega$ ja volframist hõõgniidi temperatuur $2400 \, ^\circ\text{C}$. Arvuta lambi takistus $0 \, ^\circ\text{C}$ juures, kui volframi takistuse temperatuuritegur on $4,5 \cdot 10^{-3} \, ^\circ\text{C}^{-1}$.
2. Arvuta eelmise ülesande põhjal hõõglambi takistus toatemperatuuril ($20 \, ^\circ\text{C}$). Mitu korda muutub jahtunud lambi takistus sisselülitamisel? Mitu korda muutub lambi võimsus?

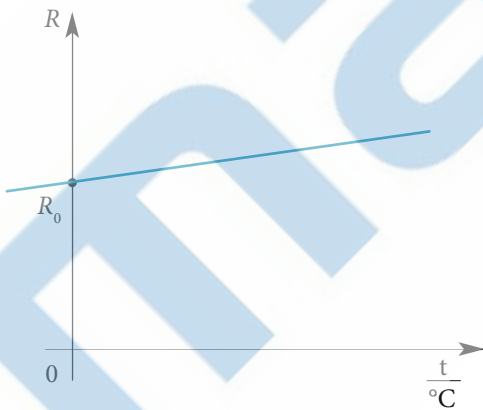
küsimused

Elektrivoolul võib esineda soojuslik, magnetiline ja keemiline toime. Põhjenda, missugune nendest esineb alati.

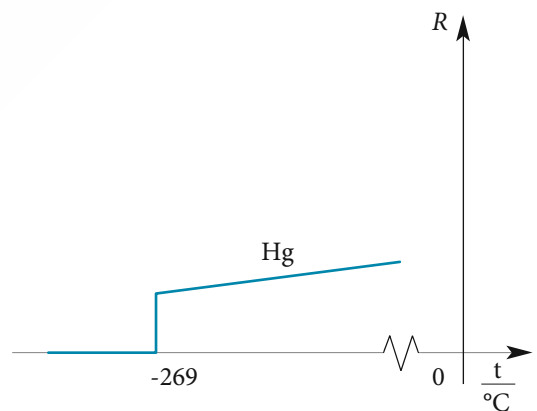
Elektrivoolu tööd saab arvutada valemiga $A = IUt$. Kirjuta valem elektrivoolu võimsuse arvutamiseks ja andke valemis olevate füüsikaliste suuruste nimetused.

Kirjuta vooluga juhis eralduva soojushulga valem voolutugevuse, takistuse ja aja järgi.

Vaata ka lisamaterjali lk 65.



Joonis 1.5. a)



Joonis 1.5. b)

1.5. Elektromotoorjõud.

Ohmi seadus kogu vooluringi kohta

Vooluring koosneb vooluallikast, tarbijatest ja ühendusjuhtmetest. Et tekiks püsiv vool, peab vooluring olema suletud. Kui positiivne laeng on jõudnud vooluallika plussklemmilt läbi vooluringi miinusklemmide, peab voolu säilitamiseks mingi kõrvaljõud F_k (joonis 1.6. a) elektriväljale vastu töötades selle laengu uuesti plussklemmidele viima.

Selle kõrvaljõu töö arvelt saabki vooluringis eralduda soojushulk. Kõrvaljõud teevad tööd vooluallikas, kus toimub mingi teise energialiigi (mehaanilise, keemilise vms) muutmine elektrienergiaks positiivsete ja negatiivsete laengu lahutamise teel. **Vooluallika elektromotoorjõud on võrdne kõrvaliste jõudude tööga ühikulise laengu ümberpaigutamisel kogu suletud vooluringi ulatuses.**

$$\mathcal{E} = A_k / q \quad (1.5.)$$

Elektromotoorjõu ühik on sarnaselt pingele ühikuga volt, sest $1 \text{ J} / 1 \text{ C} = 1 \text{ V}$. Kõrvaljõudude töö muutub vooluringis soojushulgaks, mis eraldub nii vooluringi välisosas kui ka vooluallikas (joonis 1.6. b). $A_k = \mathcal{E}q = \mathcal{E}It = I^2Rt + I^2rt$, kus R on vooluringi välisosa takistus ja r **vooluallika sisetakistus**. Avaldades viimasest võrdusest voolutugevuse, saame:

$$I = \mathcal{E} / (R + r) \quad (1.6.)$$

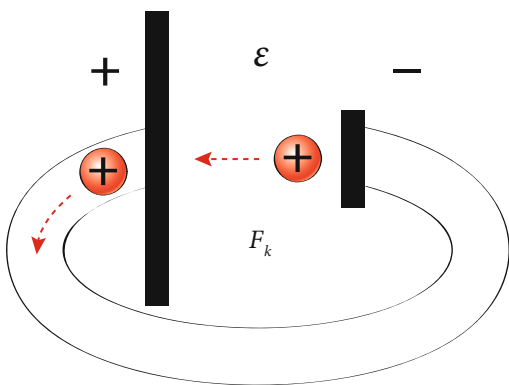
Saadud seos väljendab Ohmi seadust kogu suletud vooluringi kohta. **Voolutugevus suletud vooluringis on võrdne vooluallika elektromotoorjõu ja vooluringi kogutakistuse suhtega.**

Vooluringi kogutakistus koosneb vooluallika sisetakistusest r ja vooluringi välisosa takistusest R . Üldjuhul tuleb viimase hulka arvestada ka ühendusjuhtmete takistus.

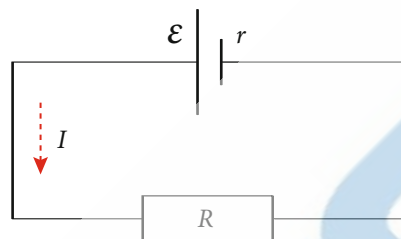
Vooluallika elektromotoorjõudu ja sisetakistust võib vaadelda kui vooluallikat iseloomustavaid suurusid, mis lühikese aja jooksul ei muutu. Kui aga keemiline vooluallikas vananeb, väheneb pisut tema elektromotoorjõud ja suureneb oluliselt sisetakistus.

Avaldades valemist 1.6. elektromotoorjõu, saame $\mathcal{E} = IR + Ir$, milles suurus $IR = U$ on vooluallika klemmipingele $U = \mathcal{E} - Ir$. Viimasest valemist on näha, et **elektromotoorjõud on vooluallika maksimaalne klemmipingele** ja voolu kasvades vooluallika klemmipingele väheneb. Joonisel 1.7. a on klemmipingele mõõtmise vooluringi skeem ja katsetulemuste graafik 1.7. b.

Kui vooluringi välisosa takistus muutub nulliks, tekib lühis. **Lühisvoolu tugevus on määratud vooluallika elektromotoorjõu ja sisetakistuse suhtega $I_l = \mathcal{E} / r$.**



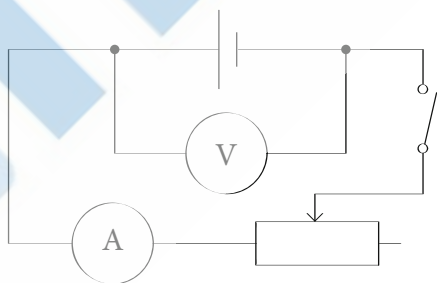
Joonis 1.6. a)



Joonis 1.6. b)

ülesanded

1. Keemilise vooluallika elektromotoorjõud on 1,5 V. Kui suure töö teevad kõrvaljõud 1 C laengu viimisel läbi kogu vooluringi? Kui suur laeng läbib vooluallikat kogu töötamise aja jooksul, kui temasse salvestatud energiast saame kasutada 2700 J? Kui pikk on vooluallika tööiga voolutugevusel 0,25 A?
2. Kui joonisel 1.7. a olev vooluring on avatud, näitab voltmeeter 3,1 V. Vooluringi sulgemisel on mõõteriistade näidud 2,8 V ja 0,5 A. Määra vooluallika elektromotoorjõud, vooluringi välisosa takistus ja vooluallika sisetakistus.
3. Arvuta eelmise ülesande põhjal voolutugevus vooluallikas, kui vooluringis tekib lühis.



Joonis 1.7. a)

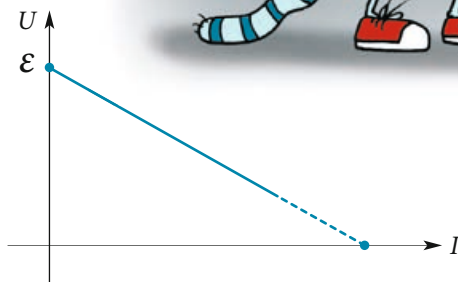
küsimused

Nii pinge kui ka elektromotoorjõud defineeritakse töö ja laengu suhtega. Missuguste jõudude tööd need on ja mille poolest nad erinevad?

Leia õppetükist 1.4. valem ning seleta selle põhjal, miks voolutugevuse kasvades vooluallika klemmpinge väheneb.

Mida tähendab lühis? Mida võib lühis esile kutsuda koduses majapidamises?

Vaata ka lisamaterjali lk 66.



Joonis 1.7. b)

ELEKTRIVOOL KESKKONDADES

2.1 Elektrivool vedelikes

Keemiliselt puhas vesi on dielektrik (isolaator). Ohutustehnika juhhib tähelepanu ohtudele elektriseadmete kasutamisel vesistes ja niisketes kohtades. Hoiatus on õigustatud, kuna vesi, lahustades aineid, tekitab ioone. Juba väike lahustatava aine kogus (10^{-8} %) muudab puhta vee elektrijuhiks. **Elektrolüüt on aine, milles laengukandjateks on ioonid.**

Kui näiteks vaskkloriidi lahustada vees, siis veemolekulide toimel laguneb sool ionideks $\text{CuCl}_2 = \text{Cu}^{2+} + 2\text{Cl}^-$. Sellist protsessi nimetatakse **elektrolüütiliseks dissotsiatsiooniks** ja tekkinud lahus on elektrolüüt. Paneme lahusesse elektroodid, näiteks söepulgad. Katoodiks nimetatud elektrood on ühendatud vooluallika miinusklemmiga ja anood plussklemmiga (joonis 1.8.).

Vooluallika tekitatud elektriväli paneb ioonid lahuses triivima elektroodide poole. Positiivselt laetud vase ioonid liiguvad katoodile, saavad puuduvad elektronid ja vask sadestub katoodile. Negatiivselt laetud kloori ioonid liiguvad anoodile, annavad seal ära liigse elektroni ja eralduvad gaasilise kloorina. Selliseid **elektrivoolu toimel kulgevaid redoksreaktsioone nimetatakse elektrolüüsiks**. Elektrivool elektrolüütides on ionide suunatud liikumine. Vooluga elektrolüütides kaasneb ainete eraldumine elektroodidel. Esimesena võeti elektrolüüs kasutusele esemete katmisel kulla- või hõbedakihiga. Elektrolüüsi seaduse avastas Michael Faraday. **Elektrolüüsil eraldunud aine mass on võrdeline elektrolüüti läbinud laenguga**, kus võrdetegurit nimetatakse aine **elektrokeemiliseks ekvivalendiks**.

$$m = kq \quad (1.7)$$

Katsest saadud vase elektrokeemiline ekvivalent on 0,33 mg/C. See tähendab, et eelnevalt kirjeldatud katses eraldub iga elektrolüüti läbinud 1 C laengu kohta katoodile 0,33 mg vaske.

Ka metallimaagi või soola sulatamisel tekivad ioonid ja seda asjaolu saab kasutada näiteks alumiiniumi elektrolüütiliseks tootmiseks boksiidist või naatriumi saamiseks keedusoolast. Alati ei ole elektrolüüsil toimuvad protsessid nii lihtsad kui eespool kirjeldatud. Sõltuvalt metalli aktiivsusest ja elektroodide materjalist võivad eralduda erinevad ained. Näiteks sulatatud NaCl elektrolüüsil eralduvad naatrium ja kloor, kuid NaCl vesilahuse elektrolüüsil eralduvad hoopis vesinik ja kloor.