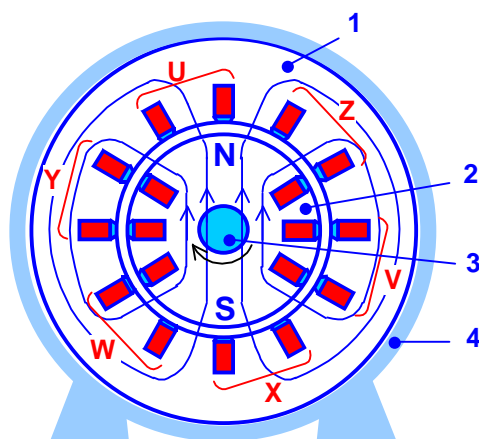


2.12 ELEKTRIMASINGENERAATORID

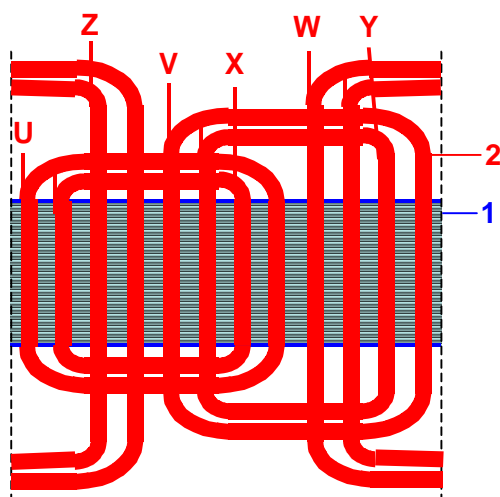
Elektrimasingeneraator muundab mehaanilist (kineetilist) energiat elektrienergiaks. Energeetikas on kasutusel ainult **pöörlevad elektromagnetilised generaatorid**, mis põhinevad elektromotoorjõu tekkel juhul, millele mingil viisil toimib muutuv magnetväli. Sellise generaatori seda osa, mis on ette nähtud magnetvälja tekitamiseks, nimetatakse **induktoriks** ja osa, milles indutseerub elektromotoorjõud, **ankruks**. Masina pöörlevat osa nimetatakse **rootoriks**, seisvat osa aga **staatoriks**. Vahelduvvoolugeneraatorites on induktoriks tavaliselt rootor, alalisvoolugeneraatorites aga staator.

Üle 95 % elektrienergiast toodetakse maailma elektrijaamades **vahelduvvoolu-sünkroongeneraatorite** abil. Sellise generaatori induktor kujutab endast kahe- või enampooluselise elektromagnetit, mille mähises kulgevat alalisvoolu nimetatakse *ergutusvooluks*. Rootori pöörlemisel tekib *pöörlev magnetväli*, mis indutseerib staatori mähises (enamasti kolmefaasilises) vahelduva elektromotoorjõu, kusjuures selle sagedus vastab täpselt (ajaliselt ühtelangevalt, *sünkroonselt*) rootori pöörlemissagedusele (on sellega *sünkronismis*). Kui induktor on näiteks kahepooluseline ja pöörleb sagedusega 3000 1/min ehk 50 1/s, indutseerub staatori mähise igas faasis vahelduv elektromotoorjõud sagedusega 50 Hz. Sellise generaatori ehitus on tugevasti lihtsustatult kujutatud joonisel **2.12.1**.



Joonis 2.12.1. Kahepooluselise sünkroongeneraatori ehituspõhimõte.
1 staator (ankur), 2 rootor (induktor), 3 võll, 4 kere. U-X, V-Y, W-Z kolme faasi mähiste staatori uures paiknevad osad

Staatori magnetahel kujutab endast õhukestest teraslehtedest kokkupressitud pakki, mille uuresse on paigutatud staatori mähis. Mähis koosneb kolmest faasist, mis on üksteisest 1/3 poolusejaotuse võrra nihutatud ja milles seega indutseeruvad üksteisest 120° võrra nihutatud elektromotoorjõud. Iga faasi mähis koosneb omakorda mitmekeerulistest üksteisega jadamisi või rööbiti ühendatud poolidest, mille kujunduspõhimõte on lihtsustatult esitatud joonisel **2.12.2**. Pooli neid osi, mis paiknevad väljaspool uurdeid, staatori otsapinnal, nimetatakse *laupühendusteks*. Enamasti on poolide arv faasis suurem kui joonisel kujutatud.

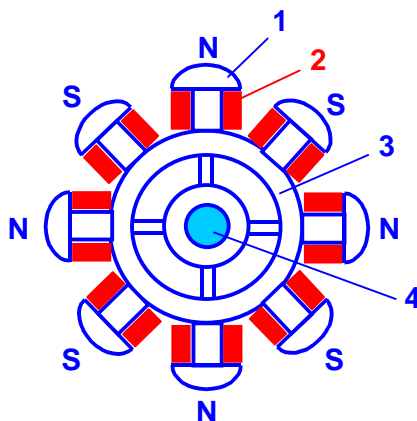


Joonis 2.12.2. Kahepooluselise sünkroongeneraatori staatorimähise lihtsaim ehituspõhimõte kahe pooli korral faasis. 1 staatori magnetsüsteemi pinnalaotus, 2 mähise poolid, U, V, W faasimähiste algused, X, Y, Z faasimähiste lõpud

Indukti pooluseid ja sellele vastavalt staatorimähise poolusejaotusi võib olla ka rohkem. Mida suurem on pooluste arv, seda aeglasem peab olema ühelsamal sagedusel induktori (rootori) pöörlemine. Kui pooluseid on nt 20, peab induktor elektromotoorjõu sageduse 50 Hz saavutamiseks pöörlema sagedusega 300 1/min.

Maailma suurimas, Itaipú hüdroelektrijaamas on sagedusel 50 Hz talitlevad generaatorid näiteks 66-pooluselised, sagedusel 60 Hz talitlevad generaatorid aga 78-pooluselised.

Kahe- või neljapooluselise generaatori *ergutusmähis* paikneb, nagu näidatud joonisel 2.12.1, rootori massiivse terassüdamikku uures. See on vajalik *kiirekäiguliste*, pöörlemissagedusel 3000 või 1500 1/min talitlevate, eriti auruturbiinidega ühendamiseks ettenähtud nn *turbogeneraatorite* korral, kui rootori mähisele toimivad tugevad tsentrifugaaljõud. Kui pooluseid on rohkem, on iga poolus varustatud omaette mähisega (joonis 2.12.3). Selline ehitusviis on kasutusel *aeglasekäiguliste*, nt pöörlemissagedusel 60 kuni 600 1/min talitlevate, hüdroturbiinidega ühendatavate *hüdroturbiinide* korral. Väga sageli on selliste generaatorite võll, vastavalt võimsate hüdroturbiinide ehitusele (vt jaotis 2.9), püstne.



Joonis 2.12.3. Aeglasekäigulise sünkroongeneraatori rootori ehituspõhimõte. 1 poolus, 2 ergutusmähis, 3 kinnitusratas, 4 võll

Sünkroongeneraatori ergutusmähist toidetakse alalisvooluga üle rootori völli paiknevate kontaktrõngaste enamasti välisest toiteallikast. Varem kasutati selleks spetsiaalset alalisvoolugeneraatorit (*ergutiit*), mis oli jäigalt ühendatud generaatori völliaga, uuemal ajal on kasutusel aga lihtsamad ja odavamad pooljuhtalaldid. On aga ka rootoris endas paiknevaid ergutussüsteeme, milles vool indutseeritakse staatorimähise poolt. Kui kasutada magnetvälja tekitamiseks elektromagnetite asemel püsिमagnetiteid, langeb ergutusvooluallikas ära ja generaatori ehitus läheb tunduvalt lihtsamaks ja töökindlamaks, kuid ühtlasi kallimaks. Seetõttu kasutatakse püsिमagnetiteid enamasti suhteliselt väikestel generaatoritel (võimsusega kuni mõnisada kilovatti).

Turbogeneraatorid on tänu silindrilisele, suhteliselt väikese läbimõõduga rootorile väga kompaktselt ehitusega. Nende erimass on tavaliselt 0,5...1 kg/kW ja neid saab valmistada võimsusega kuni 1600 MW. Hüdrogeneraatorid on oma ehituselt mõnevõrra keerukamad, rootori läbimõõt on suhteliselt suur ja generaatori erimass seetõttu enamasti 3,5...6 kg/kW. Neid on seni valmistatud võimsusega kuni 800 MW.

Generaatori talitlemisel tekivad selles energiakaod, mis on tingitud mähiste aktiivtakistusest (*vaseskaod*), pöörivooludest ning hüstereesist magnetahela aktiivosades (*rauaskaod*) ja pöörlevate osade laagrite hõõrdumisest (*hõõrdekaod*). Kuigi kogukaod ei ole tavaliselt suuremad kui 1...2 % generaatori võimsusest, võib kadude tagajärjel tekkiva soojuse äraviimine suurte generaatorite korral osutuda raskeks. Kui lihtsustatult eeldada, et generaatori mass on võrdeline võimsusega, on selle joonmõõtmed võrdelised kuupjuurega võimsusest, pindmõõtmed aga võrdelised võimsusega astmes 2/3. Seega suureneb generaatori jahutamiseks vajalik pindala aeglasemalt kui generaatori nimivõimsus. Kui võimsustel kuni mõnisada kilovatti piisab loomulikust õhkjahutusest, tuleb suurematel võimsustel üle minna sundventilatsioonile ja alates ligikaudu võimsusest 100 MW kasutada õhu asemel vesinikku. Veel suuremal võimsusel (nt üle 500 MW) tuleb vesinikjahutust täiendada vesijahutusega. Suurte generaatorite korral tuleb spetsiaalselt jahutada ka laagreid, kasutades selleks enamasti ringlevat õli.

Generaatori soojuseraldust saab tõhusalt vähendada ülijuhtivate ergutusmähiste kasutamise teel. Esimese taolise, laevadel kasutamiseks mõeldud generaatori võimsusega 4 MVA valmistas aastal 2005 Saksamaa elektrotehnikakontsern Siemens AG [2.22].

Sünkroongeneraatorite nimipinge on olenevalt võimsusest tavaliselt 0,4...24 kV. On kasutatud ka kõrgemaid nimipingeid (kuni 150 kV), kuid äärmiselt harva. Peale võrgusageduslike sünkroongeneraatorite (sagedusega 50 või 60 Hz) valmistatakse ka kõrgsagedusgeneraatoreid (kuni 30 kHz) ja mõne Euroopa riigi elektriraudteedel kasutatavaid madalama sagedusega generaatoreid (16,67 või 25 Hz).

Sünkroongeneraatorite hulka kuulub põhimõtteliselt ka **sünkroonkompensaator**, mis kujutab endast tühijooksus talitlevat sünkroonmootorit ning genereerib ja annab kõrgepingelisse elektrijaotusvõrku reaktiivvõimsust. Sel teel saab katta kohapealsete tööstuslike elektritarbijate reaktiivvõimsusvajadust ja vabastada energiasüsteemi põhivõrk reaktiivvõimsuse edastamisest.

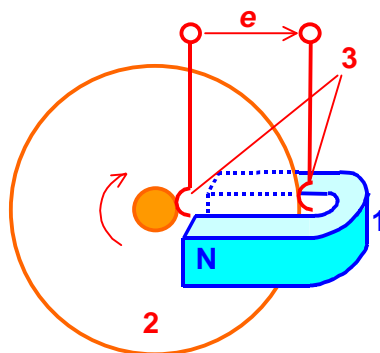
Peale sünkroongeneraatorite on suhteliselt harva ning suhteliselt väikestel võimsustel (kuni mõni megavatt) kasutusel ka **asünkroongeneraatorid**, mille rootorimähise vool indutseerub staatorivoolu toimel, kui rootor panna pöörlema kiiremini kui staatori võrgusageduslik pöörlev magnetväli. Vajadus selliste generaatorite järele tekib enamasti siis, kui ei saa tagada primaarmasina pöörlemiskiiruse konstantsust, nt tuuleelektrijaamades ja väikestes hüdroelektrijaamades.

Alalisvoolugeneraatori magnetpoolused koos ergutusmähisega paiknevad enamasti staatoris, ankrumähis aga rootoris. Kuna rootori mähises indutseerub selle pöörlemisel vahelduv elektromotoorjõud, tuleb ankur varustada **kommutaatoriga**, mille abil masina väljundis (kommutaatori *harjad*) saadakse alalis- elektromotoorjõud. Vajadus alalisvoolugeneraatorite järele on nüüdisajal peaaegu kadunud, sest alalisvoolu on lihtsam saada pooljuhtmuundurite abil.

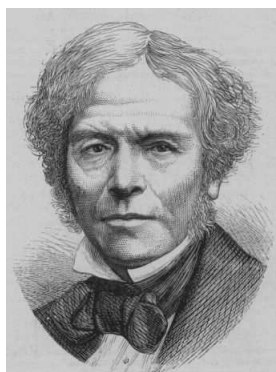
Käesolevas kursuses ei vaadelda elektrimasingeneraatorite ehitust ega omadusi täpsemalt, kuna neid küsimusi käsitletakse põhjalikult bakalaureuseõppe kursuses *Elektrimasinad*.

Elektrimasingeneraatorite hulka kuuluvad ka **elektrostaatilised generaatorid**, mille pöörleval osal tekitatakse hõõrde teel (*triboelektriliselt*) kõrgepingeline elektrilaeng. Esimese taolise generaatori (käsitsi ringiaetava väävelkuuli, millel laeng tekkis hõõrdumisel vastu inimkätt) valmistas aastal 1663 Magdeburgi (Saksamaa) linnaapea Otto von Guericke (1602–1686). Oma arengu käigus võimaldasid sellised generaatorid avastada mitmesuguseid elektrinähtusi ja seaduspärasusi. Füüsikaliste eksperimenteerimisvahenditena ei ole nad nüüdisajalgi oma tähtsust kaotanud.

Esimese **magnetelektrilise** generaatori valmistas Londoni Kuningliku Instituudi (*Royal Institution*) professor Michael Faraday (1791–1867) 4. novembril 1831. Generaator koosnes püsिमagnetist ja selle pooluste vahel pöörlevast vaskkettast (joonis 2.12.4). Ketta pöörlemapanemisel indutseerus selle telje ja serva vahel alalis- elektromotoorjõud. Sellise ehituspõhimõttega, kuid täiuslikumaid **unipolaargeneraatoreid** kasutatakse (suhteliselt küll harva) praegugi.



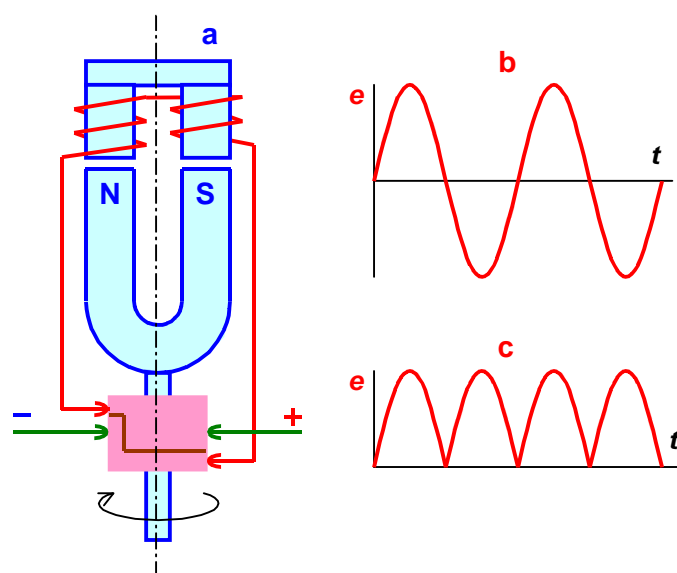
Joonis 2.12.4. Michael Faraday unipolaargeneraatori ehituspõhimõte. 1 magnet, 2 pöörlev vaskketas, 3 harjad



Michael Faraday

Aasta hiljem, 3. septembril 1832 valmistas Pariisi peenmehaanik Hippolyte Pixii (1808–1835) elektrodünaamika rajaja, akadeemik André Marie Ampère'i (1775–1836) tellimisel ja juhendamisel pöörleva püsिमagnetiga, käsitsi ringiaetava generaatori (joonis 2.12.5).

Pixii generaatori ankrumähises indutseeritakse vahelduv elektromotoorjõud. Generaatorist saadava voolu aldamiseks lisati generaatori pöörlevale osale lahtiste elavhõbekontaktidega kommutaator, mis lülitas generaatori väljundahela ja vahelduvvoolumähise omavahelise ühenduse igal poolpöördel vajalikul viisil ümber. Õige kiiresti asendati see aga lihtsama silindrilise harikommutaatoriga, nagu see on kujutatud joonisel 2.12.5.



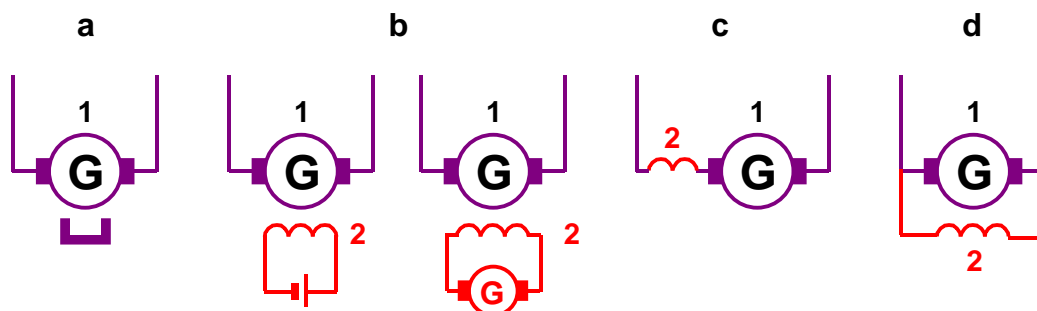
Joonis 2.12.5. Hippolyte Pixii magnetelektirilise generaatori ehituspõhimõte (a), indutseeritav vahelduv-elektromotoorjõud (b) ja kommutaatori abil saadav pulseeriv alalis-elektromotoorjõud (c). Masina väntajam koos koonushammasratasülekandega on näitamata

Pixii põhimõttel ehitatud generaatori võttis esimesena tööstuslikult kasutusele Birminghamis (Suurbritannia), galvanoplastikavanni toiteks tööstur John Stephen Woolrich (1790–1843), kasutades primaarmootorina 1-hj aurumasinat. Generaatori pingeline oli 3 V, nimivool 25 A ja kasutegur ligikaudu 10 %, kuid taolised, järjest võimsamad generaatorid hakkasid galvaanikatööstuses kiiresti levima.

Aastal 1851 pani Saksamaa sõjaväearst Wilhelm Josef Sinsteden (1803–1891) ette kasutada induktoris püsिमagnetite asemel elektromagneteid ja toita neid väiksemast abigeneraatorist; ühtlasi avastas ta, et masina kasutegur suureneb, kui elektromagneti terassüdamik teha mitte massiivne, vaid panna kokku traatidest. Sinstedeni ideed rakendas tegelikkusesse aga alles aastal 1863 Suurbritannia iseõppinud elektriinsener Henry Wilde (1833–1919), kasutades muuhulgas erguti (*exitatrice*) paigutamist generaatori võllile. Aastal 1865 valmistas ta generaatori enneolematu võimsusega 1 kW, mille abil ta sai demonstreerida isegi metallide sulatamist ja keevitamist.

Alalisvoolugeneraatorite tähtsaim täiustus oli **endaergutus**, mille põhimõtte oli patenteerinud aastal 1854 Taani riigiraudtee tehnikadirektor Sören Hjorth (1801–1870), kuid mis sel ajal ei leidnud tegelikku kasutamist. Aastal 1866 leiutasid selle üksteisest sõltumatult uuesti mitu elektrotehnikut (sealhulgas H. Wilde) ja laialt sai see tuntuks detsembris 1866, mil saksa tööstur Ernst Werner von Siemens (1816–1892) rakendas seda oma kompaktses ja kõrge kasuteguriga generaatoris. 17. jaanuaril 1867 loeti tema kuulsakssaanud ettekanne *dünamoolektrilise printsibi* kohta ette Berliini Teaduste Akadeemias. Endaergutus võimaldas loobuda ergutusgeneraatoritest ning hakata elektrienergiat odavalt ning suurtes kogustes tootma, mistõttu aastal 1866 võib lugeda **tugevvoolu-elektrotehnika** sünniaastaks.

Esimestes endaergutusega masinates oli ergutusmähis lülitatud ankruga **jadamisi**, kuid veebruaris 1867 teatas inglise elektrotehnik Charles Wheatstone (1802–1875) paremini reguleeritavast **rööpergutusest**, mille peale ta tegelikult olevat tulnud juba enne Siemensi jadaergutust (joonis 2.12.6).



Joonis 2.12.6. Alalisvoolugeneraatorite ergutuse areng. a püsिमagnetergutus (1831), b võõrergutus (1851), c jada-endaergutus (1866), d rööp-endaergutus (1867). 1 ankur, 2 ergutusmähis. Ergutusvoolu reguleerimisreostaadid on näitamata

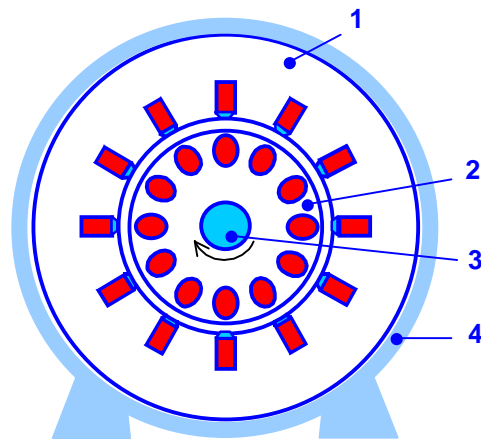
Vajadus vahelduvvoolugeneraatorite järele tekkis aastal 1876, mil Pariisis tegutsev vene elektrotehnik Pavel Jablotškov (1847–1894) alustas seal vahelduvvoolu-kaarlampide (*Jablotškovi küünalde*) tootmist ja linnatänavate valgustamist. Esimesed selleks vajalikud generaatorid valmistas Pariisi leidur ning tööstur Zénobe Théophile Gramme (1826–1901). Hõõglampide masstootmise algusega aastal 1879 kaotas vahelduvvool mõneks ajaks oma tähtsuse, kuid uuesti tõusis see päevakorrale elektrienergia edastuskauguse suurendamise vajadusega 1880ndate aastate keskel ning kolmefaasilise süsteemi väljatöötamisega aastail 1888...1890 New Yorgi uurimislaboratooriumi *Tesla-Electric Co.* omaniku Nikola Tesla (1856–1943) poolt USAs ja firma *AEG (Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft)* tehnikadirektori Michael von Dolivo-Dobrowolsky (1862–1919) poolt Saksamaal. Algas järjest suurema võimsusega sünkroongeneraatorite tootmine rajatavatele soojus- ja hüdroelektrijaamadele. Turbogeneraatorite arengu tähtsaimaks sündmuseks võib seejuures lugeda silindrilise rootori väljatöötamist Šveitsi elektrotehnikatehase *Brown, Boveri & Cie.* kaasasutaja ja -omaniku Charles Eugen Lancelot Browni (1863–1924) poolt aastal 1898. Esimese vesinikjahutusega generaatori (võimsusega 25 MW) valmistas aastal 1937 USA firma *General Electric*, esimese juhtmehaanilise vesijahutusega generaatori aga aastal 1956 Suurbritannia firma *Metropolitan Vickers*.

2.13 ELEKTRIMOOTORID

Elektrimootor muundab elektrienergia mehaanilise liikumise energiaks. Nagu elektrigeneraator, nii ka elektrimootor koosneb tavaliselt staatorist ja rootorist, mis tähendab, et enamasti tekitab see **pöörlevat** liikumist. On aga ka mootoreid, mille liikuv osa (sel juhul *kulgur*) liigub translatoorselt, enamasti sirgjooneliselt. Selliseid mootoreid nimetatakse *kulg-* ehk *linearmootoriteks*.

Elektrimootorite ehitust ja kasutamist käsitletakse põhjalikult õppeainetes *Elektrimasinad* ja *Elektrijamid*, mistõttu alljärgnevalt esitatakse üksnes nende mõningad üldomadused, mis võimaldavad neid võrrelda muude (nt sisepõlemis-) mootoritega.

Levinuim elektrimootori liik on kolmefaasiline **lühisrootoriga asünkroonmootor**, mille ehituspõhimõtte on esitatud joonisel 2.13.1.



Joonis 2.13.1. Lühisrootoriga asünkroonmootori ehituspõhimõte.
1 staator, 2 rotor, 3 völli, 4 kere

Selle mootori rootorimähis kujutab endast massiivseid uretes paiknevaid vask- või alumiiniumvardaid, mis mõlemast otsast on ühendatud lühisrõngastega. Alumiiniumi kasutamise korral moodustatakse kogu mähis tervikuna enamasti survevalu teel. Staatori pöörlev magnetväli indutseerib rootorimähises voolu, mille koostoime staatori magnetväljaga paneb rootori pöörlema. Rotori pöörlemiskiirus on alati väiksem kui staatori magnetvälja oma ja selle suhtelist erinevust staatori magnetvälja pöörlemiskiirusest nimetatakse **libistuseks**. Viimane oleneb mehaanilisest koormusest rootori völli ja on täiskoormuse korral enamasti 3...5 %. Kiiruse astmeliseks reguleerimiseks võib kasutada ümberlülitatava pooluspaaride arvuga staatorimähist; sel põhimõttel valmistatakse nt 2-, 3- ja 4-kiiruselisi asünkroonmootoreid. Kui soovitakse kiirust reguleerida sujuvalt, toidetakse mootorit enamasti reguleeritavast sagedusmuundurist.

Asünkroonmootori kiiruse sujuvaks reguleerimiseks allapoole nimikiirust on lühisrootoriga mootorite asemel kasutatud **faasirootoriga** mootoreid, mille rootorimähis on samasuguse kolmefaasilise ehitusega nagu staatori oma. Selline mähis ühendatakse völliil paiknevate *kontaktrõngaste* kaudu reguleerimisreostaadiga, milles osa mootori poolt tarbitavast energiast muundub soojuseks. Reguleerimine toimub seega mootori kasuteguri arvel, mistõttu see reguleerimisviis on nüüdisajal suhteliselt harva kasutusel.

Lühisrootoriga asünkroonmootorid on väga kompaktsed ja töökindla ehitusega ja seetõttu tunduvad pikema elueaga kui sisepõlemismootorid. Nii massi kui ka mõõtmete poolest on nad enamasti ühtlasi väiksemad kui sama võimsusega sisepõlemismootorid. Neid saab valmistada väga mitmesuguse nimivõimsusega (mõnekümnest vattist kuni paarikümne megavattini). Väikestel võimsustel (kuni mõnisada vatti) kasutatakse ka ühefaasilisi mootoreid. Asünkroonmootorite, nagu ka kõigi muude elektrimootorite põhieelised sisepõlemismootorite ees seisnevad aga selles, et nad ei vaja kütust ega eralda heitgaase ja et neid on väga lihtne kokku ehitada mitmesuguste töomasinatega, reduktoritega ja muude mehaanikaseadmetega. Elektrimootorite kasutegur on enamasti 90...95 %.

Sünkroonmootorid on samasuguse ehitusega nagu sünkroongeneraatorid ja pöörlevad toitepinge konstantse sageduse korral konstantse kiirusega. Nende eeliseks võrreldes asünkroonmootoritega loetakse seda, et nad ei võta võrgust reaktiivenergiat, vaid võivad anda reaktiivenergiat võrku ja katta seega teiste

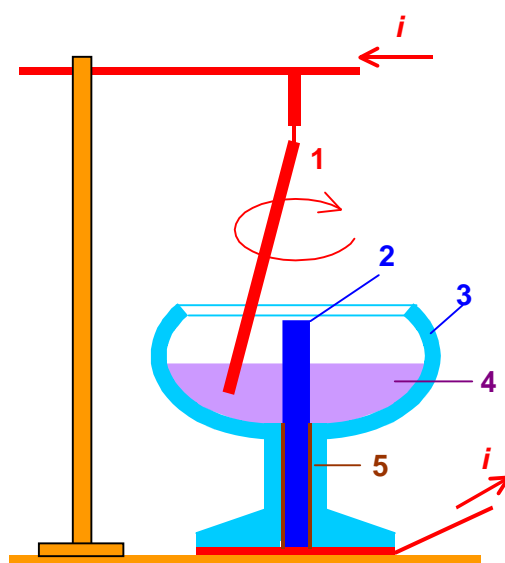
elektritarvitite reaktiivenergiatarbimist. Sünkroonmootorid ei sobi sagedaks käivitamiseks ja on kasutusel enamasti kestva suhteliselt konstantse koormuse ning, nagu juba öeldud, konstantse pöörlemiskiiruse korral.

Alalisvoolumootoreid kasutatakse siis, kui on vaja kiiruse sujuvat reguleerimist. See saavutatakse ankru- ja/või ergutusvoolu muutmise kas reguleerimisreostaatide abil või mootori toitepinge muutmise teel. Kuna nüüdisajal saab ka vahelduvvoolumootorite kiirust (sagedusmuundurite abil) sujuvalt ning kasutegurit mitte kuigi oluliselt vähendamata reguleerida, on alalisvoolumootorite kasutamine nende keerukama ehituse, kõrgema hinna ja reguleerimisel tekkivate lisakadude tõttu tugevasti vähenenud.

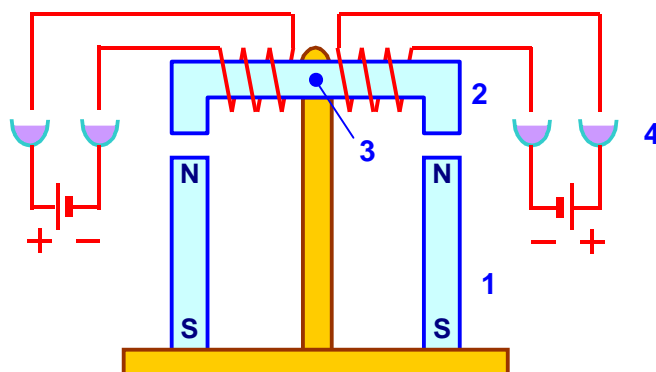
Samm-mootoreid käitatakse pingepulssidega. Iga impulsi toimele pöörduv rootor teatava kindla nurga (nt mõne kraadi) võrra. Selliseid mootoreid kasutatakse aeglasekäigulistest (kas või nt 1 pööret aastas sooritavates) ja täpset positsioneerimist vajavates mehhanismides.

Kulg- ehk lineaarmootoreid kasutatakse translatoorse liikumise saavutamiseks juhtudel, mil pöörleva mootori liikumise muundamine translatoorseks mehaaniliste ülekannete või muude võtete abil ei ole võimalik või otstarbekohane. Levinuimad on asünkroon-kulgmootorid, kuid saab valmistada ka sünkroon-, alalisvoolu- ja samm-kulgmootoreid.

Esimene elektrimootor ei olnud mitte elektromagnetiline, vaid **elektrostaatiline** ja selle valmistas aastal 1748 Philadelphia (USA) kirjastaja Benjamin Franklin (1706–1790). Selle rootor kujutas endast hambulist ketast, millele impulsside kaupa rakendati elektrilaengutest tingitud tõmbe- ja tõukejõudu; ketas tegi 12...15 pööret minutis ja võis kanda kuni 100 hõbemünti. Esimesed **elektromagnetilised** mootorid (seadmed, milles kas voolust läbitud juhe pöörles ümber püsिमagnet, nagu see on kujutatud joonisel 2.13.2, või milles püsिमagnet pöörles ümber voolust läbitud juhtme, tehes ühtlasi tööd – segades elavhõbedat) valmistas aastal 1821 Londoni Kuningliku Instituutsiooni (*Royal Institution*) assistent Michael Faraday (1791–1867). Esimese mootori, mida oleks saanud ühendada eraldi asetseva töömasinaga, valmistas aastal 1831 Albany (USA) poistekeskkoooli matemaatika- ja looduslooõpetaja Joseph Henry (1797–1878). Selle mootori liikuv osa ei olnud aga veel pöörlev, vaid kiikuv (joonis 2.13.3).



Joonis 2.13.2. Michael Faraday elektrilist pöörlemist demonstreeriva katseseadme põhimõte. 1 pöörlev metallvarras, 2 varrasmagnet, 3 klaas- või portselan anum, 4 elavhõbe, 5 tihend. i vool



Joonis 2.13.3. Joseph Henry kiikva elektrimootori talitluspõhimõte. 1 püsिमagnetid, 2 kiikuv elektromagnet, 3 võll, 4 elavhõbekontaktid

Pärast Henry mootorit valmistati veel mitmesuguseid vahelduvasuunalise kulgliikumisega katselisi elektrimootoreid. Esimese **pöörleva**, reaalse kasutamise sihiga väljatöötatud elektrimootori valmistas 8. aprillil 1834 Pillau (Ida-Preisimaa) sadama inspektor, Königsbergi ülikoolis elektrotehnikat uuriv ehitusinsener Moritz Hermann Jacobi (1801–1874). Kaheksapooluseline mootor, mille nii staatoris kui ka rootoris oli 4 U-kujulist elektromagnetit ja mis tegi 80...120 pööret minutis, sai toidet galvaanielementide patareist pingega 6 V ja selle võimsus võllil oli ligikaudu 15 W, kasutegur aga ligikaudu 13 %. Oma mootorit uuris ja täiustas Jacobi muide Tartu Ülikoolis, kuhu ta aastal 1835 oli valitud tsiviilarhitektuuri professoriks [2.23]. 19. sajandi keskel töötati välja järjest kompaktsemaid ja parema kasuteguriga alalisvoolumootoreid, kuid nende tegelikku rakendamist takistas selleaegsete elektrienergiaallikate – galvaanielementide ja algeliste masingeneraatorite väike võimsus ning majanduslik ebaefektiivsus. Elektrimootorite laiem kasutamine sai võimalikuks alles pärast endaergutusega alalisvoolugeneraatorite kasutuselevõttu aastal 1866.



Moritz Hermann Jacobi

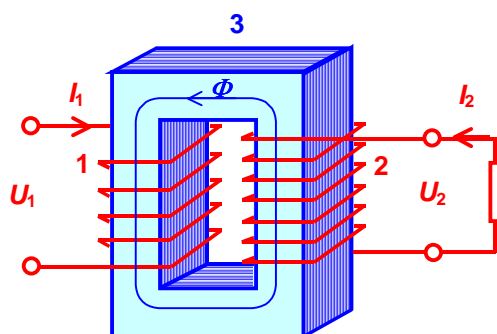
Pärast mitmefaasilise vahelduvvoolusüsteemi kasutuselevõttu (vt jaotis 2.12) alustas Saksamaa firma AEG elektriinsener Michael von Dolivo-Dobrowolsky asünkroonmootorite valmistamise võimaluste uurimist ja esitas 8. märtsil 1889 patendiavalduse **lühisrootoriga asünkroonmootorile**. Pärast seda algas odavate, töökindlate ja kõrge kasuteguriga vahelduvvoolumootorite lai kasutamine. Nüüdisajal on kõik eelpool nimetatud elektrimootorite liigid saavutanud väga kõrge tehnilise taseme ja leiavad mitmekülgset rakendamist eeskätt kohtkindlates paigaldistes, kuid järjest sagedamini ka liiklusvahendites.

2.14 MUUD ELEKTRIMUUNDURID

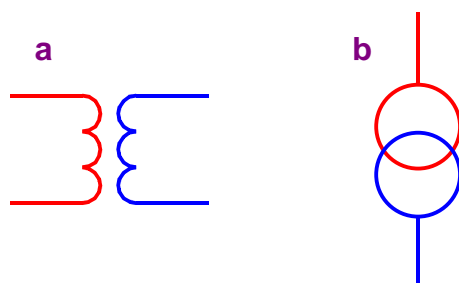
Tihti tekib vajadus muundada teatavate parameetritega (nt voolu liigiga, pingega või sagedusega) elektrienergiat teistsuguste parameetritega elektrienergiaks. Selleks kasutatakse nt

- transformaatoreid (pingemuundureid),
- alaldeid (vahelduvvoolu muundamisel alalisvooluks),
- vaheldeid ehk invertoreid (alalisvoolu muundamisel vahelduvvooluks),
- sagedusmuundureid,
- impulssmuundureid (voolu- või pingepulsside tekitamiseks).

Lihtsaim **transformaator** ehk **trafo** kujutab endast terassüdamikust ja kahest mähisest koosnevat seadet (joonis 2.14.1). Primaarmähise pingestamisel vahelduvpingega indutseerub sekundaarmähises sama sagedusega elektromotoorjõud. Kui trafo sekundaarmähis ühendada elektritarvitiga, tekib selles elektrivool ja trafo sekundaarklemmidel kujuneb välja elektromotoorjõust mõnevõrra väiksem, koormusest vähesel määral sõltuv sekundaarpinge. Primaar- ja sekundaarpinge suhe (trafo *ülekandesuhe*) on seejuures ligikaudu võrdne primaar- ja sekundaarmähise keerdude arvu suhtega. Trafo lihtsaimad tingmärgid on kujutatud joonisel 2.14.2; piltlikkuse huvides võidakse trafo eri mähiseid, nagu joonisel näidatud, tähistada eri värvidega.



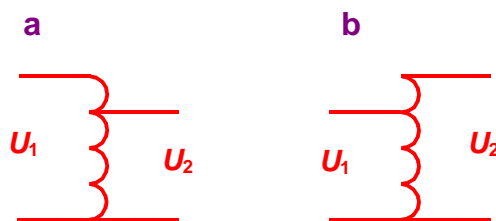
Joonis 2.14.1. Ühefaasilise kahemähiselise trafo ehituspõhimõte. 1 primaarmähis, 2 sekundaarmähis, 3 südamik. U_1 primaarpinge, U_2 sekundaarpinge, I_1 primaarvool, I_2 sekundaarvool, Φ magnetvoog



Joonis 2.14.2. Kahemähiselise trafo tingmärk elektriahelate üksikasjalistes (mitmejoone-) skeemides (a) ja elektrivõrkude (ühejoone-) skeemides (b)

Trafod võivad olla ühe- või mitmefaasilised ja sekundaarmähiseid võib olla ka enam kui üks. Elektrivõrkudes on enamasti kasutusel kolmefaasilised, ühe või kahe

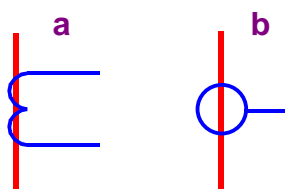
sekundaarmähisega trafod. Kui primaar- ja sekundaarpinge teineteisest suhteliselt vähe erinevad, võidakse kasutada ühemähiselisi trafosid (*autotrafosid*) mille põhimõtteskeem on kujutatud joonisel **2.14.3**.



Joonis 2.14.3. Pinget madaldava (a) ja pinget kõrgendava (b) autotrafo põhimõtteskeem

Trafode tähtsamad tunnussuurused on *nimiprimaar-* ja *nimisekundaarpinge*, *nimiprimaar-* ja *nimisekundaarvool* ning *nimisekundaarnäivvõimsus* (*nimivõimsus*). Trafosid saab valmistada nii väga väikese (nt mikroelektronikaahelate jaoks sobiva) kui ka väga suure (nt elektrijaamade võimsate generaatorite jaoks sobiva) nimivõimsusega (nt 0,1 mVA kuni 1000 MVA). Võimsuskadud trafos – mähiste aktiivtakistusest tingitud *vaseskaod* ja terassüdamikus pöörisvooludest ja hüstereesist tingitud *rauaskaod* on enamasti niivõrd väikesed, et trafo kasutegur on üle 99 %. Sellele vaatamata on võimsates trafodes tekkiv soojusvõimsus tihti nii suur, et selle äraviimiseks tuleb kasutada tõhusat jahutust. Enamasti paigutatakse võimsate trafode aktiivosa (mähised ja südamik) õlipaaki, mis tarbe korral varustatakse soojusvahetitega ja õhk- või vesi-sundjahutusega. Võimsusel kuni 10 MVA (mõnikord ka enam) võidakse kasutada aga ka *kuivtrafosid*, mille mähised on enamasti valatud epoksüüdvaiku. Nende põhieelised seisnevad kõrgemas tuleohutuses ja vedela isoleermaterjali lekkevõimaluse äralangemises, mistõttu neid saab vabamalt paigutada ükskõik millistesse ehitiseosadesse, sealhulgas ükskõik millisele korrusele.

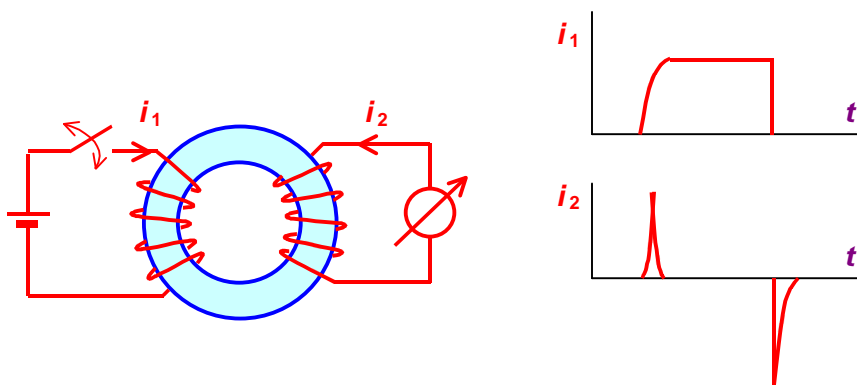
Vahelduvpinge ja -voolu mõõtmisel, eriti, kui on tegemist kõrge pinge või suure vooluga, kasutatakse mõõtemuundureina sageli **mõõtetrafosid**. Pingetrafo ehitus on põhimõtteliselt samasugune nagu jõutrafol ja suhteliselt väikesel ning muutumatul sekundaarkoormusel (ideaaljuhul – tühijooksuolukorras) on trafo ülekandesuhe piisavalt konstantne. Kõigi pingetrafo nimisekundaarpinge on enamasti ühesugune (nt 100 V). Voolutrafo nimisekundaarmähis on ideaaljuhul lühistatud ja sekundaarvool on võrdeline primaarvooluga; nimisekundaarvool on enamasti 5 A, mõnikord aga ka väiksem (nt 1 A). Voolutrafo tingmärkide näited on esitatud joonisel **2.14.4**.



Joonis 2.14.4. Voolutrafo tingmärk mitmejooneskeemis (a) ja ühejooneskeemis (b)

Üksikasjaliselt käsitletakse jõutrafode ehitust ja omadusi õppeaines *Elektrimasinad*, mõõtetrafosid aga õppeainetes *Elektrimõõtmised* ja *Elektrivarustus*.

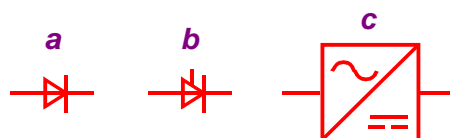
Esimeseks trafoks võib lugeda Michael Faraday rõngassüdamikust ja kahest mähisest koosnevat *induktsioonrõngast* (ingl *induction ring*), mille abil ta 29. augustil 1831 avastas elektromagnetilise induktsiooni nähtuse (joonis 2.14.5). Alalisvooluallikaga ühendatud primaarmähise sisse- ja väljalülitamise kiireltmööduval (*transientse*) siirdeprotsessil tekkis sekundaarmähises pingepulss, mistõttu seda seadist võib nimetada *transienditrafoks*.



Joonis 2.14.5. Michael Faraday transienditrafo põhimõte. i_1 primaarvool, i_2 sekundaarvool, t aeg

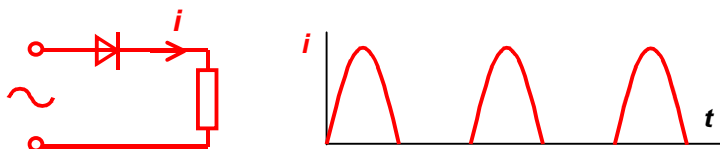
Faraday avastusest lähtudes valmistas Iirimaa Dublini lähedal asuva Margnoothi kolledži füüsikaõpetaja Nicholas Callan (1799–1864) aastal 1836 katkestist ja trafost koosneva **induktsioonpooli** ehk **sädeinduktori**, millega sai alalisvoolu muundada kõrgepingeliseks vahelduvvooluks ja tekitada pikki sädelahendusi. See seade oli 19. sajandil järjest täiustudes laialt kasutusel elektrilahenduste uurimisel ja sellel põhinevad nüüdisaegsete autode süütepoolid. Esimese vahelduvvoolutrafo patenteeris aastal 1876 Pariisis tegutsev vene elektrotehnik Pavel Jablotškov oma vahelduvvoolu-kaarlampide toiteahelatele. Kuna selle trafo magnetsüdamik ei olnud suletud (nagu Faradayl), vaid kujutas endast sirget traadikimpu, olid tema tehnilised omadused suhteliselt madalad ja mujal see rakendamist ei leidnud. Aastal 1885 valmistasid Budapesti tehase *Ganz & Co.* elektriinsenerid Max Déri (1854–1938), Otto Titus Bláthy (1860–1939) ja Karoly Zipernovsky (1853–1942) suletud toroidaalse traatsüdamikuga trafo ja kasutasid seda edukalt vahelduvvoolu-elektrijaotussüsteemi loomisel. Veel parema ehitusviisiga – E- ja I-kujulistest terasplekkidest kokkulaotud südamikuga trafo valmistas samal aastal USA elektrotehnik William Stanley (1858–1916), misjärel algas vahelduvvoolusüsteemide kiire areng nii Euroopas kui ka Ameerikas. Esimese kolmefaasilise trafo valmistas aastal 1889 Michael von Dolivo-Dobrowolsky.

Alaldid põhinevad nüüdisajal enamasti pooljuht- (tavaliselt räni-) ventiilidel – pooljuhtdiodidel, mis lasevad voolu läbi ainult ühes suunas. Ventiili ja alaldi tingmärgid on kujutatud joonisel 2.14.6.



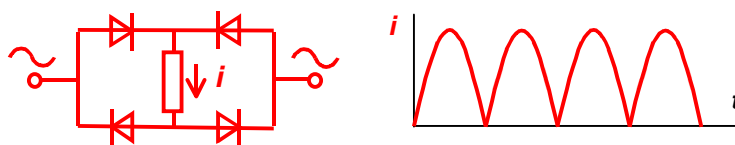
Joonis 2.14.6. Mittetüüritava ventiili (a), tüüritava ventiili (türistori) (b) ja alaldi (c) tingmärk

Lihtsaim alaldi koosneb ühestainsast ventiilist (joonis 2.14.7), kuid kuna alaldatud vool kujutab endast sel juhul üksteisest eraldatud vooluimpulsse (vahelduvvoolu poolperioode, mistõttu sellist alaldit nimetatakse *poolperioodalaldiks*), kasutatakse seda harva.



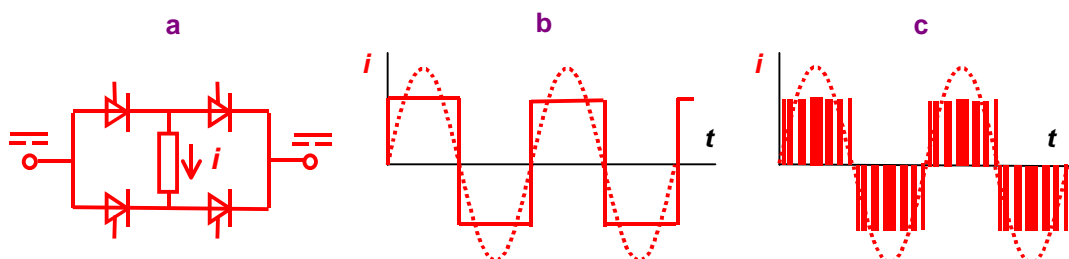
Joonis 2.14.7. Ühest ventiilist koosnev alaldi skeem ja väljundvoolu kuju. i voolu hetkväärtus, t aeg

Kõige sagedamini kasutatakse *sildalaldeid*, mille skeem on kujutatud joonisel 2.14.8. Kuna neis alaldatakse vahelduvvoolu mõlemad poollained, nimetatakse neid *täisperioodalalditeks*. Veel ühtlasem vool saadakse kolmefaasilise sildalaldi abil.

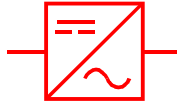


Joonis 2.14.8. Sildalaldi skeem ja väljundvoolu kuju. i voolu hetkväärtus, t aeg

Vaheldis kasutatakse *tüüritavaid* pooljuhtdioode (transistore või türistore), mida saab tüürelektroodile rakendatud pinge abil suvaliselt sulgeda või avada (joonis 2.14.9). Lihtsaima skeemi korral on väljundvoolu kuju nelinurkne, kuid vaheldiga jadamisi lülitatud filtri kasutamisel võidakse saada, nagu enamasti vaja, siinusvool. Arvprogrammjuhtimise kasutamisel võib nelinurkvoolu asemel saada eri laiusega impulssidest koosneva impulspaki, millest filtri abil on kerge saada siinusvoolu. Tugevasti lihtsustatult on sellise *impulsslaiusmodulatsiooni* põhimõtte esitatud joonisel 2.14.9,c. Vaheldi tingmärk on kujutatud joonisel 2.14.10.

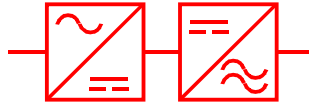


Joonis 2.14.9. Sildvaheldi skeem (a) ja väljundvoolu kuju (b nelinurkvool, c impulsslaiusmodulatsioon). i voolu hetkväärtus, t aeg



Joonis 2.14.10. Vaheldi tingmärk

Sagedusmuundur võib koosneda alaldi ja vaheldi kombinatsioonist (joonis 2.14.11), kuid võib kasutatada ka keerukamaid skeeme (nt ilma alalisvoolu-vahelülita).



Joonis 2.14.11. Alalisvoolu-vahelüluga sagedusmuunduri põhimõtteskeem

Nii alaldid, vaheldid kui ka sagedusmuundurid võivad olla mitmesugusel viisil reguleeritavad. Üksikasjaliselt käsitletakse nende omadusi ja ehitust elektroonika- ja jõuelektroniaalastes õppeainetes.

Ühesuunalise elektrijuhtivuse avastas elavhõbe-huumlahenduslambis aastal 1855 prantsuse metallurg ja füüsik, eraõpetlasena tegutsev Jean-Mothée Gaugain (1811–1880), kes nimetas sellise ahelaelemendi elektriliseks **ventiilik**s (pr *soupe*) [2.24]. Hiljem (aastal 1860) uuris ta põhjalikult ka pooljuhtide elektrijuhtivust ja selle sõltuvust voolu suunast. Alaldite tegelik rakendamine algas aga alles pärast seda, kui elektrivõrkudes tuli kasutusele vahelduvvool ja kui Berliini ülikooli füüsika-privaatdotsent Leo Martin Aron (1860–1919) aastal 1892 oli leiutanud elavhõbe-vaakumventiili. Energiaseadmete jaoks sobivate võimsate alaldite valmistamine sai võimalikuks **elavhõbe-kaarlahendusventiili** leiutamise aastal 1901 USA omaette tegutseva inseneri Peter Cooper Hewitti (1861...1921) poolt ja kuni 1970ndate aastateni olid mitmesugused elavhõbealaldid ja -inverterid jõuelektronikas (nt elektriraudtee alaldusalajaamades) valitseval kohal. Nõrkvooluelektronikas algas 20. sajandi alguses ettekoetava katoodiga vaakumventiilide (*-lampide*) ja aastal 1925 peamiselt seleenil, vaskoksiidil ja germaaniumil põhinevate pooljuhtventiilide kasutamine. 23. detsembril 1947 avastas USA uurimisinstituudi *Bell Laboratories* teadur Walter Houser Brattain (1902–1987) transistoriefekti ja 26. veebruaril 1948 esitas ta koos John Bardeeniga (1908–1991) patendiavalduse **transistori** kohta. Aastal 1956 töötati samas instituudis välja p-n-p-n-pooljuhtstruktuur, mille alusel elektrotehnikakontserni *General Electric* teadurid Gordon Hall ja Frank William Gutzwiller aastal 1957 valmistasid esimesed tüüritavad räniventiilid (*silicon controlled rectifier, SCR*). Ameerika Raadiokorporatsioonis (*Radio Corporation of America, RCA*), kus toimusid samal ajal samasuunalised uurimused, hakati neid sõnade *türatron* (tüüritav elavhõbealaldi) ja *transistor* kombineerimise teel nimetama **türistorideks**. Nüüdisaja jõuelektronika põhinebki eeskätt jõutransistoride ja türistoride kasutamisel.

Muudest elektrimuunduritest võib nimetada

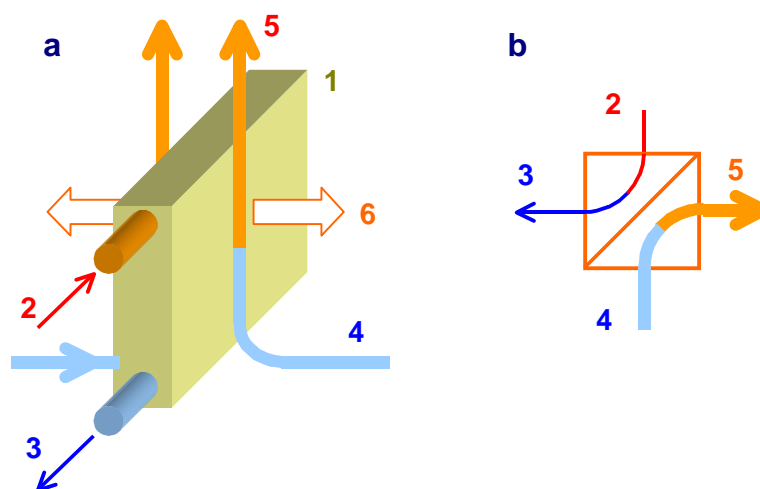
- elektrilisi kuumutusseadmeid, mida lähemalt käsitletakse koos elekterkütte ja elektrotehnoloogiaga (jaotistes 6.4 ja 6.5),
- elektrilisi valgusallikaid (vt jaotis 6.6),
- elektrolüüsi- ja galvaanikaseadmeid (vt jaotis 6.5).

2.15 SOOJUSVAHETID JA -TRANSFORMAATORID

Soojusvaheteid kasutatakse soojust ülekandmiseks ühest keskkonnast teise, soojustransformaatoreid seejuures külmemast keskkonnast soojemasse. Alljärgnevalt vaadeldakse mõningaid soojusvaheteid ja paljude võimalike soojustransformaatorite hulgast ainult

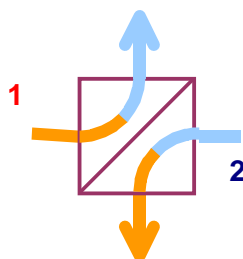
- külmuteid ja
- soojuspumpasid.

Soojusvaheti all mõeldakse seadet soojust ülekandmiseks kuumemast keskkonnast külmemasse. Üks lihtsaimaid on taoliste seadmete hulgas vesikeskkütte küttekeha, millelt soojus siirdub köetavasse keskkonda osalt loomuliku konvektsiooni, osalt kiirguse teel (joonis 2.15.1).



Joonis 2.15.1. Soojusülekanne keskkütte-küttekehalt köetavasse ruumi (a) ja selle põhimõtteskeem (b). 1 küttekeha, 2 sisenev kuum vesi, 3 väljuv jahtunud vesi, 4 külm ruumiõhk, 5 soojenenud ruumiõhk, 6 soojuskiirgus

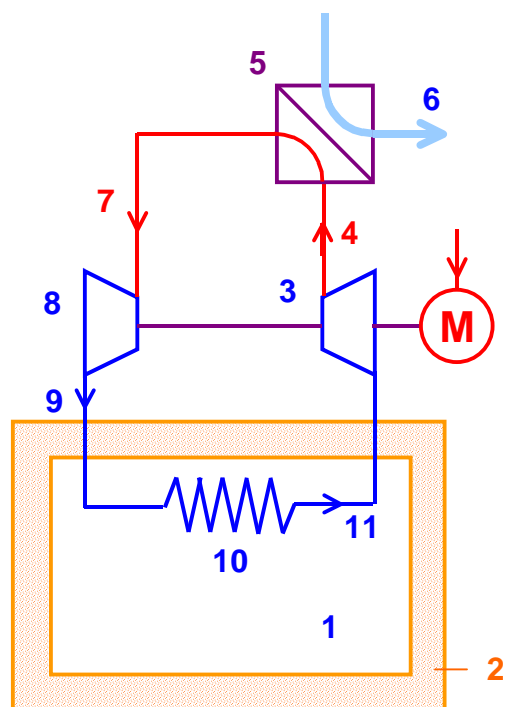
Teise, samuti suhteliselt lihtsa näitena võib esitada mingi ruumi ventileerimisel sissepuhutava värsket õhu eelsoojendamist väljapuhutava soojenenud õhuga (joonis 2.15.2), mis võib anda hoonete küttes küllaltki olulist energiasäästu.



Joonis 2.15.2. Soojusvaheti skeem soojust ülekandel mingist ruumist väljapuhutavalt õhult (1) sissepuhutavale värskel õhule (2)

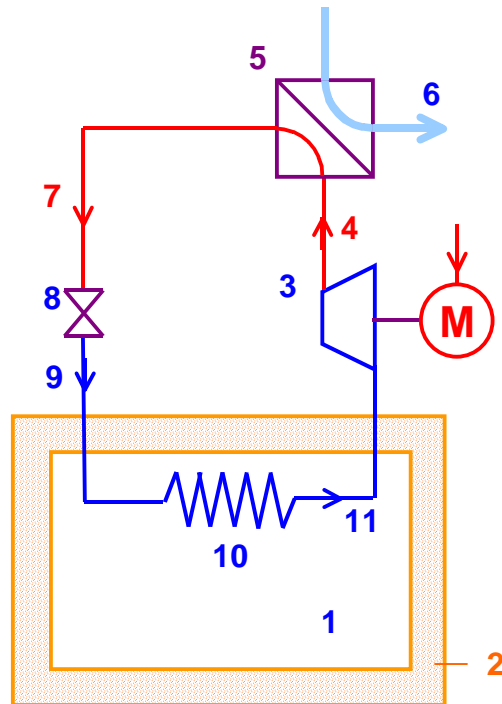
Külmuti ehk **jahuti** on ette nähtud mingi piiratud ruumi temperatuuri alandamiseks allapoole väliskeskkonna temperatuuri mingi nõutava temperatuurini soojuse äraviimise teel kõrgema temperatuuriga väliskeskkonda. Külmute põhimõtteskeeme on palju ja alljärgnevalt on esitatud neist ainult kaks.

Gaasikompressorkülmuti põhineb mingi gaasi komprimeerimisel, kuumenenud gaasi jahutamisel, jahutatud gaasi paisumisel ja selle suunamisel jahutatavas ruumis paiknevasse, enamasti siugtoru taolisesse jahutisse (joonis 2.15.3).



Joonis 2.15.3. Gaasikompressorkülmuti põhimõtteskeem. 1 jahutatav ruum, 2 soojusisolatsioon, 3 kompressor, 4 komprimeeritud kuum gaas, 5 soojusvaheti, 6 jahutusõhk või -vesi, 7 jahutatud gaas, 8 detander, 9 paisunud ning sügavjahutatud gaas, 10 jahuti, 11 külm gaas

Sellises külmutis võib soojuskandjana kasutada õhku, kuid ka muid gaase. Kuna gaaside maht-erisoojus on suhteliselt väike, on taolise külmuti elementide mõõtmed suhteliselt suured. Seetõttu on enam levinud **aurukompressorkülmutid**, milles soojuskandja vaheldumisi veeldatakse ja aurustatakse (joonis 2.15.4).



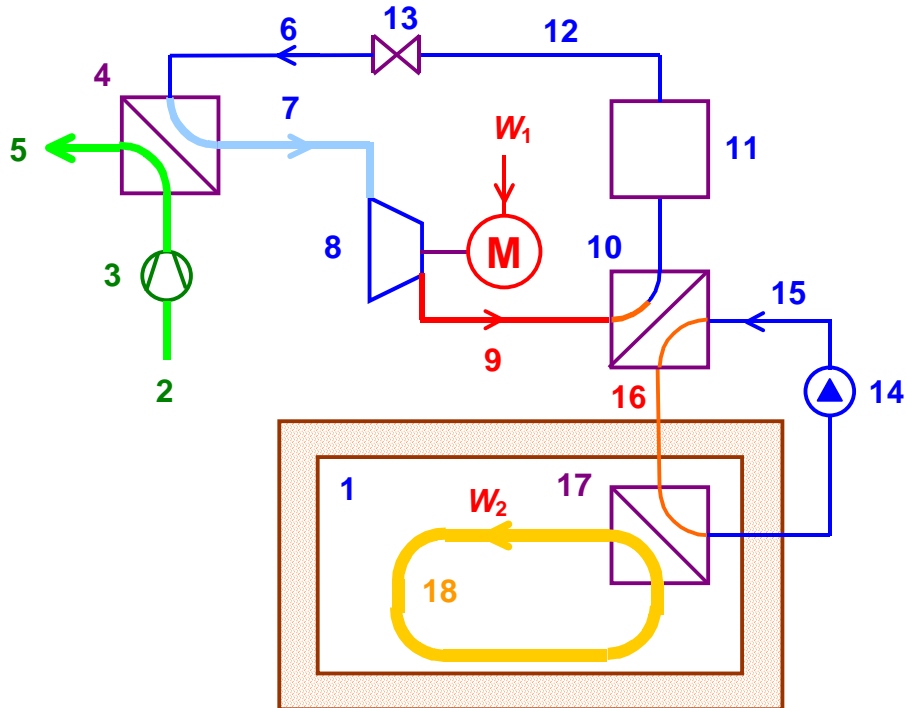
Joonis 2.15.4. Aurukompressorkülmuti põhimõtteskeem. 1 jahutatav ruum, 2 soojustisolatsioon, 3 kompressor, 4 komprimeeritud kuum aur, 5 soojusvaheti, 6 jahutusõhk või -vesi, 7 vedel soojuskandja, 8 drosselventiil, 9 paisunud, jahtunud ning osaliselt aurustunud vedelik, 10 jahuti (aurusti), 11 aurustunud soojuskandja

Soojuskandjana kasutatakse sellises külmutis madala keemistäpiga vedelikke, nt propaani C_3H_8 ($-42\text{ }^\circ\text{C}$), ammoniaaki NH_3 ($-33\text{ }^\circ\text{C}$), butaani C_4H_{10} ($-12\text{ }^\circ\text{C}$) või pentaani C_5H_{12} ($+9,5\text{ }^\circ\text{C}$). Varem kasutati selleks väga laialt (kodukülmituses peaaegu eranditult) mitmesuguseid klorofluoroalkaane (*freoone*), mille keemistäpp oli väga sobivalt $-25\dots-35\text{ }^\circ\text{C}$, kuid nüüdisajal on nende kasutamine keelatud, kuna neis sisalduv kloor, sattudes stratosfääri, lõhub Maa osoonikihti (vt jaotis 7.3). Eriti madalate temperatuuride saamiseks võib kasutada ka nt lämmastikku N_2 (keemistäpp $-196\text{ }^\circ\text{C}$).

Ülalesitatud keemistäpid kehtivad atmosfäärirõhul ($101,325\text{ kPa}$).

Kompressorkülmuti teooria esitas aastal 1871 Müncheneri tehnikaülikooli masinaehitusprofessor Carl Linde (1842–1934). Aastal 1876 realiseeris ta esimese (ammoniaagil põhineva) külmuti ja aastal 1879 asutas nende tootmiseks tehase, mis tegutseb seniajani. Pärast seda töötati välja mitmesuguseid teisi külmutite liike ja aastal 1931 tõi USA keemiakontsern *Du Pont de Nemours & Co.* turule eelnimetatud tõhusad soojuskandjad – freoonid. Algas freoonkylmitute masstootmine. Aastal 1987 otsustati ÜRO kliimakonverentsil Montrealis freoonid keelata ja aastaks 2000 lõpetati nende kasutamine kylmitute soojuskandjana kogu maailmas.

Soojuspump on seade soojuse ülekandmiseks külmemast väliskeskkonnast koetavasse ruumi. Ka selles kasutatakse madala keemistäpiga ($-20\dots+5\text{ }^\circ\text{C}$) soojuskandjaid, mille temperatuuri tõstmiseks rakendatakse komprimeerimist. Joonisel 2.15.5 on kujutatud välisõhust soojust võtva soojuspumba põhimõtteskeem. Välisõhu asemel võib soojust võtta aga ka veekogudest, kaevudest või pinnasest; viimasel juhul paigutatakse pinnasesse rõhtsad või püstsed torud, millest juhitakse läbi vesi või muu (nt mingi külmumiskindel) vahesoojuskandja.



Joonis 2.15.5. Õhksoojuspumba põhimõtteskeem. 1 köetav ruum, 2 välisõhk (nt +6 °C), 3 õhupuhur, 4 aurusti, 5 jahtunud välisõhk (nt +2 °C), 6 vedel soojuskandja (nt 0 °C), 7 aurustunud soojuskandja (sama temperatuuriga nagu enne aurustit, nt 0 °C), 8 kompressor, 9 komprimeeritud kuum aur (nt +60 °C), 10 kondensaator, 11 soojuskandja mahuti, 12 vedel jahtunud soojuskandja (nt +40 °C), 13 drosselventiil, 14 keskkütte ringluspump, 15 jahtunud vesi (nt +35 °C), 16 kondensaatoris kuumenenud vesi (nt +50 °C), 17 vesiküttekeha, 18 köetavas ruumis ringlev õhk. W_1 kompressori tarbitav energia, W_2 köetavasse ruumi antav soojus

Soojuspumba tõhusust iseloomustatakse köetavasse ruumi antava soojushulga W_2 ja kompressori poolt sama aja jooksul tarbitava energia W_1 suhtega, mida nimetatakse **soojusteguriks**. Tavaliselt on soojustegur vahemikus 2,5 kuni 3 ja kompressori võimsus vahemikus 2...20 kW; ühepereelamute puhul piisab nt enamasti võimsusest 4...8 kW.

On olemas ka *pööratavaid* soojuspumpasid, mida võidakse suvel kasutada ruumide jahutamiseks (kliimaseadmeina).

Soojuspumba idee esitas juba aastal 1852 William Thomson, kuid soojuspumpade tegelik laiem kasutamine algas alles 1950ndail aastail, kusjuures alul olid neis soojuskandjais freoonid. Kui 1990ndail aastail tulid kasutusele keskkonnasõbralikumad soojuskandjad ja kui soojuspumpade tõhusaks automatiseerimiseks hakati rakendada töökindlaid, optimaalset talitlust tagavaid ning kergesti häälestatavaid mikroprotsessorsüsteeme, muutusid soojuspumpad majanduslikult soodsateks elamute põhi- või lisaküttevahenditeks. Tähtis on ka see, et soojuspumpade rakendamine võimaldab ühtlasi vähendada kütuste põletamist ja süsinikdioksiidi lisandumist Maa atmosfääri. Eestis arvati 2006. aasta lõpus olevat kasutusel ligi 2000 mitmesugust soojuspumpa ja alates aastast 2010 arvatakse neid lisanduvat igal aastal umbes 1000.

Kirjandus

- 2.1 EVS-EN 60617-2:2000. Skeemide tingmärgid. Osa 2: Märגיעlemendid, omadusmärgid ja muud üldkasutatavad märgid. – 34 lk.
- 2.2 IEC 60027-1:1992. Letter symbols to be used in electrical technology. – 112 p.
- 2.3 Kull, A.; Mikk, I.; Ots, A. Soojustehnika. – Tallinn: Valgus, 1974. – 551 lk.
- 2.4 Ots, A. Formation of Air-Polluting Compounds While Burning Oil Shale. – In: Energy and Environment. 1991 International Symposium on Energy and Environment. August 25–28, 1991, Espoo, Finland. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.– Pp. 284...290.
- 2.5 Ots, A. Põlevkivi põletustehnika. – Tallinn: Eesti Energia, 2004. – 768 lk.
- 2.6 The Pneumatics of Hero of Alexandria. From the original Greek translated for and edited by Bennet Woodcroft. – London: Taylor Walton and Maberly, 1851. – 111 p.
- 2.7 Feldhaus, F. M. Die Technik der Vorzeit, der geschichtlichen Zeit und der Naturvölker. – München: H. Moos, 1965. – 734 S.
- 2.8 Lilley, S. Inimesed, masinad ja ajalugu. – Tallinn: Valgus, 1973. – 340 lk.
- 2.9 Carnegie, A. James Watt. – New York: Doubleday, Page & Co., 1905. – 242 p.
- 2.10 Blueprints for Success. 125 years Babcock & Wilcox. – Alliance (Ohio): Babcock & Wilcox, a McDermott company, 1992. – 30 p.
- 2.11 Jäger, K. Lexikon der Elektrotechniker. – Berlin: VDE-Verlag, 1996. – 478 S.
- 2.12 List. F. Mehr Saft über den Wolken // Bild der Wissenschaft 2006, Nr. 2, S. 100...106.
- 2.13 Johnson, D. Zur Geschichte der Gasturbine // VGB Kraftwerkstechnik **52** (1972) Nr. 2, S. 93...98.
- 2.14 Kitman, J. L. The Secret History of Lead // The Nation, 20.03.2000.
- 2.15 Cogeneration system will power Reichstag // Modern Power Systems **18** (1998) Nr. 8, p. 7.
- 2.16 Uudiseid maailmast // Elektriala **8** (2006), nr. 1, lk. 17...18.
- 2.17 Solar thermal power: 500 MW take-off in US // Renewable Energy World **8** (2005) No. 5, pp. 16...17.
- 2.18 Prohaska, D. The Birth of the Fuel Cell – But Who is the Father? // European Fuel Cell Forum 2001. Press Release 13.08.2001. – 4 p.
- 2.19 Медведев Г. У. Ядерный загар. – Москва: Издательство «Книжная палата», 1990. – 416 с.
- 2.20 Rohstoffgehalt in Spaltprodukten ausgedienter Brennstoffelemente // Brennstoff, Wärme, Kraft **33** (1981) Nr. 10, S. 391.
- 2.21 Mägi, V. Nägus ja kebja. – Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli Kirjastus, 2001. – 252 lk.
- 2.22 Sparsame Schiffe dank Supraleitung. Pressebericht 15.08.2005 // www.siemens.com
- 2.23 Risthein, E. Elektrialamitehnika alusepanija Moritz Hermann Jacobi // Elektriala **3** (2001), 4, lk. 23...26.
- 2.24 Kloss, A. Auf den Spuren der Leistungselektronik. – Berlin / Offenbach: VDE-Verlag, 1990. – 372 S.