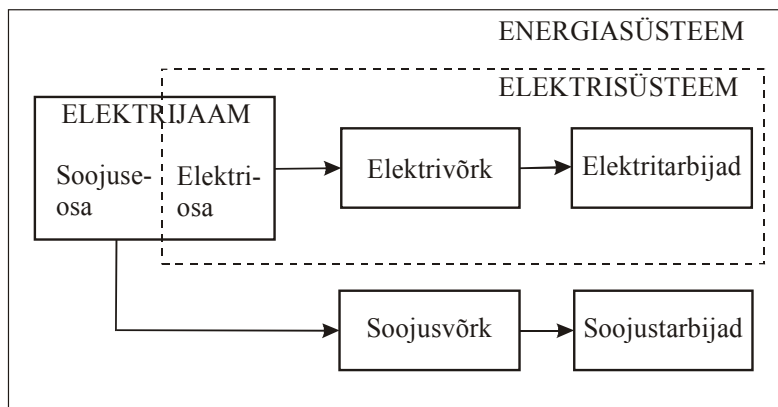


## 2 Elektrisüsteem

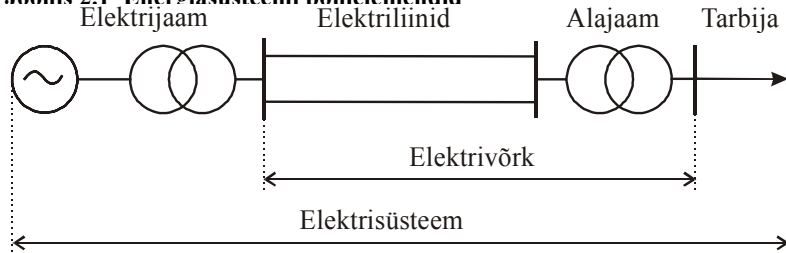
### 2.1 Põhimõisted

#### 2.1.1 Energiasüsteem

**Energiasüsteem** on elektriijaamade, elektrivõrkude ja elektritarbijate (elektrisüsteemi koormuse) ühendus, kuhu lisanduvad elektriijaamadega seotud soojusvõrgud ja -tarbijad. Energiasüsteemi elektriline osa on **elektrisüsteem** (joonis 2.1). Olulise osa sellest moodustab elektrivõrk (joonis 2.2).



**Joonis 2.1 Energiasüsteemi põhielemendid**



**Joonis 2.2 Elektrisüsteemi põhielemendid**

Energiasüsteemid töötavad tänapäeval suurte ühendüsteemidena, sest energiasüsteemi majanduslikud ja tehnilised eelised on seda suuremad, mida laiem ja võimsam süsteem on.

Ühendüsteemide eelised.

- *Töökindluse suurenemine.* Kui mõni energiasüsteemi element (katel, turbiin, generaator, transformator, liin) langeb rivist välja ja süsteemis tekib võimsuse defitsiit, siis saavad tarbijad toite mõnest teisest süsteemist.

- *Koormustippude nihkumine.* Ülisuurtes süsteemides ei lange ajaarvestusest (ida-lääne suund) ja aastaaegadest (põhja-lõuna suund) tulenevad koormustipud tarbimise erineva iseloomu tõttu kokku. See võimaldab vähendada elektrijaamade koguvõimsust, jaamu ühtlasemalt koormata ning seega alandada elektrienergia tootmiskulusid.
- *Vajaliku reservi vähenemine.* Süsteemis peab olema reserv vähemalt suurima agregaaadi võimsuse ulatuses. Süsteemide ühendamisel vajaliku reservi suhteline määr väheneb, mis võimaldab taas vähendada tootmiskulusid.
- *Agregaatide nimivõimsuse suurenemine.* Suures süsteemis on majanduslikult otstarbekas kasutada suure nimivõimsusega agregate, mille kasutegur on suurem ja tootmiskulud toodetava energiaühiku kohta väiksemad.
- *Koormusjaotuse optimeerimine.* Koormuse optimaalne jaotamine elektri- jaamade vahel võimaldab säästa kütust. Efektivsemalt saab ära kasutada eri tüüpi elektri jaamu (soojus-, tuuma-, hüdrojaamad).

Energiasüsteemide ühendamisest saadav majanduslik tulu ületab tavaliselt nende ühendamiseks vajalike liinide rajamise kulud. Ent energiasüsteemide ühendamine toob kaasa ka probleeme. Nendest olulisim on, kuidas säilitada süsteemi stabiilsus (generaatorite sünkroonne töö ja vajalik pingeniivo). Probleemi tõsiduse mõistmiseks piisab, kui märkida, et energiasüsteemi kõigi generaatorite rootorid peavad pöörlema sünkroonselt, s.t generaatorite rootorite vaheline nurk, õigemini, elektromotoorjõudude faaside erinevus, ei tohi ületada kindlat väärtust. Olukorda võib ette kujutada ka nii, et ühend süsteemis võib avariisituatsioon kanduda ühest süsteemi osast teise, põhjustades *avarii* laviinitaolise laienemise. Eristatakse järgmisi laviinitaolisi protsesse:

- staatilise ja dünaamilise stabiilsuse kadumine
- asünkroontalitluse teke
- sageduslaviin
- pingelaviin.

Laviinitaolised protsessid levivad elektrisüsteemis sedavõrd kiiresti, et süsteemi operatiivpersonal vahele astuda ei jõua. Seetõttu seatakse avariide leviku tõkestamiseks üles automaatikaseadmed nn **süsteemi-** ehk **avariitõrjeautomaatika**.

Elektrisüsteemi **talitluseks** nimetatakse elektrisüsteemi seisundi ajas muutumist, mis määrab ära elektrienergia tootmise, ülekandmise ja tarbimise ning mis on määratud **seisundimuutujatega** (pinged, voolud, võimsused, nurgad jm). Talitlused liigitatakse

- normaalseteks
- raskendatuteks
- avariilisteks
- avariijärgseteks.

Normaalitalitlusel tagatakse tarbijatele toite töökindlus, elektrienergia kvaliteet (ettenähtud pinge ja sagedus) ning elektrivarustuse ökonoomsus. Raskendatud

talitlusel on üks või mitu seisundimuutajat väljunud lubatud piiridest. Avariitalitus ilmneb kas ootamatult (nt lühisel) või tuleneb raskendatud talitlusest. Avariitalitus tuleb võimalikult kiiresti likvideerida. Avariijärgsesse talitlusse satub energia-süsteem peale avarii likvideerimist (nt peale lühistunud elektriliini väljalülitamist). Avariijärgne talitus on enamasti samuti raskendatud talitus, mistõttu avarii kordumise vältimiseks tuleb võimalikult kiiresti taastada normaaltalitus.

Elektrisüsteemi töö põhilised iseärasused tulenevad asjaolust, et energia akumuleerimise võimatuse tõttu peab toodetav ja tarbitav võimsus igal ajahetkel olema tasakaalus. Sellepärast ei saa agregaatide tootlikkust enamasti maksimaalselt kasutada. Ka peab süsteemis alati olema genereeriva võimsuse **reserv** avarii või tarbimise ettenägematu kasvu puhuks. Muidugi tuleb arvestada remontide ja muude asjaoludega, mis piiravad agregaatide kasutamist. Kasutusel on järgmised mõisted:

- *üllesseatud (installeeritud) võimsus* – elektrijaamades käitusse antud agregaatide nimivõimsuste summa
- *kasutatav võimsus* – agregaatide tegelik tootmisvõime, arvestades tehnilisi piiranguid
- *töövõimsus* – kasutatav võimsus miinus reservagregaatide võimsus
- *tegelik võimsus* – agregaatide tegelik koormus antud hetkel
- *pöörlev ehk kuumreserv* – ühendatud võimsuse ja tegeliku võimsuse vahe
- *operatiivreserv* – kuumreservi ja mobiilsete mittetöötavate agregaatide (nt hüdro- ja gaasiturbiinid) võimsuste summa
- *külmreserv* – agregaatide võimsus, mille käikulaskmine võtab aega paarikümnest minutist mõne tunnini.

Elektrienergia tootmist ja tarbimist käsitledes tuleb tähele panna elektrijaamade omatarvet, kadusid elektrivõrkudes ning elektrienergia ekspordi ja impordi vahet. Põhimõisted on siin järgmised:

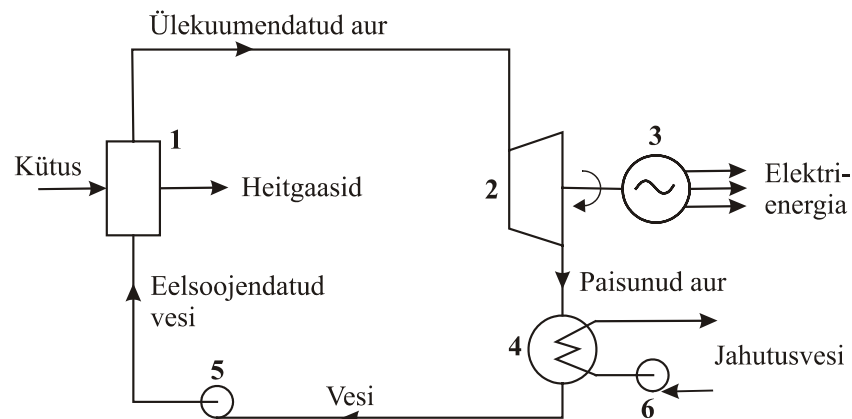
- *elektrienergia brutotoodang* – elektrijaamade generaatoritest väljastatud energia
- *elektrijaama omatarve* – osa brutotoodangust, mida elektrijaam kasutab tootmistsüklis oma vajadusteks
- *elektrienergia netotoodang* – energia, mida elektrijaam tegelikult väljastab (brutotoodangu ja omatarbe vahe)
- *eksport ja import* – energia, mis saadetakse teistesse riikidesse ja tuuakse sealt sisse
- *netoeksport ja netoimport* – ekspordi ja impordi vahe või vastupidi
- *kogutarbimine* – energia, mis väljastatakse elektrijaamadest riigi elektritarbimise katmiseks (netotoodangu ja netoeksporti vahe)
- *kasulik tarbimine* – energia, mida kasutab tarbija (leitakse tarbijate arvestinäitade summeerimise teel)
- *kaod* – kogutarbimise ja kasuliku tarbimise vahe.

### 2.1.2 Elektriijaamad ja alajaamad

Elektriijaamu liigitatakse tavaliselt energiaressursi alusel järgmiselt:

- soojuselektriijaamad (süsi, gaas, nafta, põlevkivi, turvas)
- tuumaelektriijaamad (uraan)
- hüdroelektriijaamad (vesi).

Peale selle on veel gaasiturbiinjaamad, diiseljaamad, tuulejaamad jm. Soojuselektriijaamad jagunevad omakorda kondensatsioonijaamadeks ning koostootmisjaamadeks. Esimesed toodavad ainult elektrienergiat. Neis kondenseeritakse turbiinist väljuv aur taas veeks ja suunatakse tagasi katlasse. Koostootmisjaamades suunatakse turbiinidest väljuv aur ja sellega soojendatud vesi



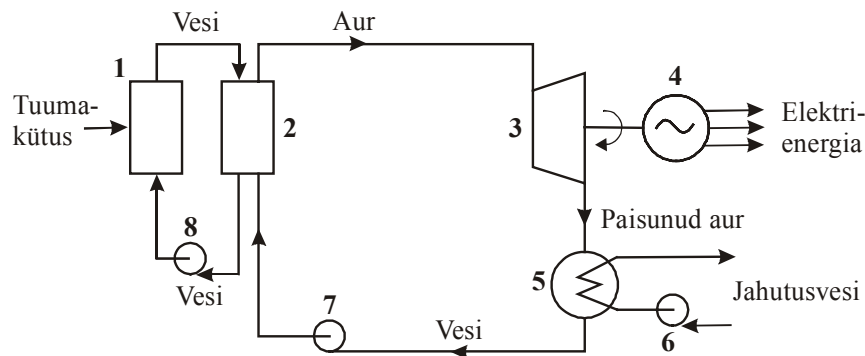
**Joonis 2.3 Kondensatsioonielektriijaama skeem**

soojustarbijatele.

Joonisel 2.3 on kondensatsioonijaama skeem. Aurukatlas (aurugeneraatoris) 1 toodetakse kütuse – kivisöe, põlevkivi, maagaasi, nafta vms põletamise teel ülekuumendatud auru, mille rõhk ulatub 30 MPa-ni, temperatuur aga 600 °C. Aur suunatakse auruturbiini 2, kus auru sisalduv soojusenergia muutub kineetiliseks energiaks – turbiini pöörlemiseks. Turbiin paneb pöörlema elektriijaama põhielemendi – generaatori 3, mis toodab elektrienergiat. Turbiinis veeldatakse paisunud aur temperatuuril 20...25 °C kondensaatoris 4, kus auru rõhk on 3...4 kPa. Oluline on auru jahutada võimalikult madala temperatuurini, kuna soojuselektriijaama kasutegur on teatavasti võrdeline temperatuuride vahega auruturbiini sisenemisel ja väljumisel. Kondensaatorist pumbatakse külm vesi toiteveepumpade 5 abil tagasi katlasse. Kasuteguri tõstmiseks soojendatakse toitevett enne katlasse jõudmist turbiinist võetud kuuma nn vaheltvõtuauru abil (joonisel pole eelsoojendeid näidatud). Kondensaatori jahutamiseks kasutatakse järve-, jõe- või merevett, mida pumpab jahutusveepump 6.

Põhimõtteliselt samasugune on ka soojus- ja elektriijaama ehk koostootmisjaama

tehnoloogiline skeem. Koostootmisjaamas annab aur osa oma energiast elektrienergia tootmiseks ära turbiinis, ülejäänud väljub elektri jaamast soojusena. Selliseid turbiine on kahte liiki: vasturõhu- ja vaheltaururbiinid. Esimestel puudub kondensaator ja nende elektriline võimsus on määratud soojuskoormusega. Teistel on kondensaator olemas ja nende elektri- ja soojuskoormus on eraldi reguleeritavad. Soojust kasutatakse auru vahendusel tööstusprotsesside tarbeks ja vee vahendusel kaugkütteks. Seega on selliste jaamade ülesanne toota nii elektri- kui soojusenergiat, millest ka nimetus koostootmisjaam. Kuigi koostootmisjaamas on elektrienergia tootmise kasutegur madalam kui kondensatsioonijaamas (turbiinist väljuva auru temperatuur on palju kõrgem), on jaama üldine energeetiline kasutegur 70...80% kondensatsioonijaama 30...40% vastu.



Joonis 2.4 Kahekontuurilise tuumajaama tehnoloogiline skeem

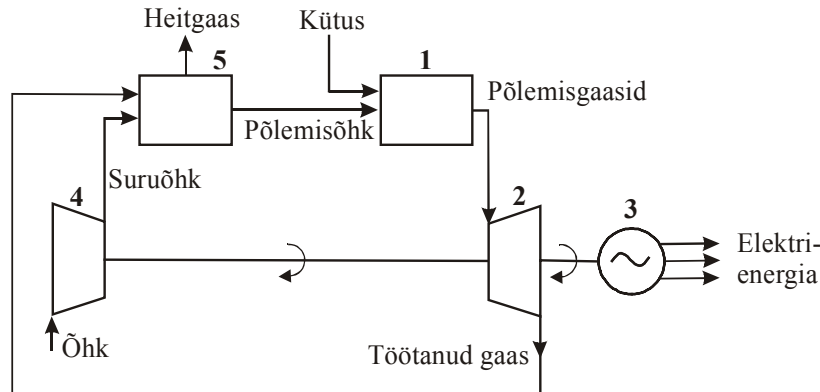
**Tuumaelektrijaama** põhiliseks erinevuseks soojusjaamast on, et aurugeneraatorina kasutatakse neis tuumareaktoreid, kus tuumakütuse lõhustumise energia muudetakse auru soojusenergiaks (joonis 2.4). Lisanduvad rajatised kiirusohutuse tagamiseks. Tuumaelektrijaamade liigituse aluseks on

- energiakandekontuuride arv (ühe-, kahe- ja kolmekontuurilised)
- reaktorite tüüp (aeglased või kiired neutronid)
- soojuskandja (vesi, gaas, vedelmetall)
- reaktori konstruktsioon (keevvee- või rõhkveereaktorid jm)
- aeglusti (grafiit, vesi, raskevesi).

Kahekontuurilise tuumajaama tehnoloogiline skeem on joonisel 2.4. Reaktoris 1 kuumutatud vesi suunatakse aurugeneraatorisse 2. Nende kahe kontuuri isoleeritus tagab selle, et aur ei ole praktiliselt radioaktiivne. Muus osas on skeem nagu kondensatsioonijaama korral. Erinevused on vaid auru parameetrites, mis tuumajaama puhul on madalamad nii temperatuuri kui rõhu osas.

Viimasel ajal on energiasüsteemides hakatud rohkem kasutama **gaasiturbiine**, mis kiire käivitamise tõttu sobivad eriti tipuenergia tootmiseks. Joonisel 2.5 on gaasiturbiinitsükli põhimõtteskeem. Turbiini 2 paneb pöörlema gaas, mis tekib põlemiskambri 1. Kasuteguri tõstmiseks suunatakse töötanud gaas soojusvahetisse 5, kus

ta soojendab kompressori 4 kaudu tulnud põlemisõhku. Gaasiturbiinjaamade efektiivsuse tõstmiseks rakendatakse lihtsüklit, mis ühendab joonisel 2.3 ja 2.5 toodud auru- ja gaasitsüklid. Sellistes **kombijaamades** kasutatakse gaasiturbiinist väljunud kuumade gaaside soojust auru tootmiseks. Aur suunatakse kondensatsiooni- või vasturõhuturbiini. Kombijaamade kasutegur võib ulatuda 55%.



Joonis 2.5 Gaasiturbiinjaama põhimõtteskeem

**Hüdroelektrijaamades** kasutatakse generaatoreid hüdroturbiinid, mis muundavad vee langemise energia pöörlemise energiaks. Hüdroturbiinid jaotatakse reaktiiv- ja aktiivturbiinideks. Reaktiivturbiini tööratas pöörleb vees, talle kandub üle vee potentsiaalne ja kineetiline energia. Aktiivturbiini tööratas pöörleb õhus veejooa kineetilise energia varal.

Turbiinide põhitüübid.

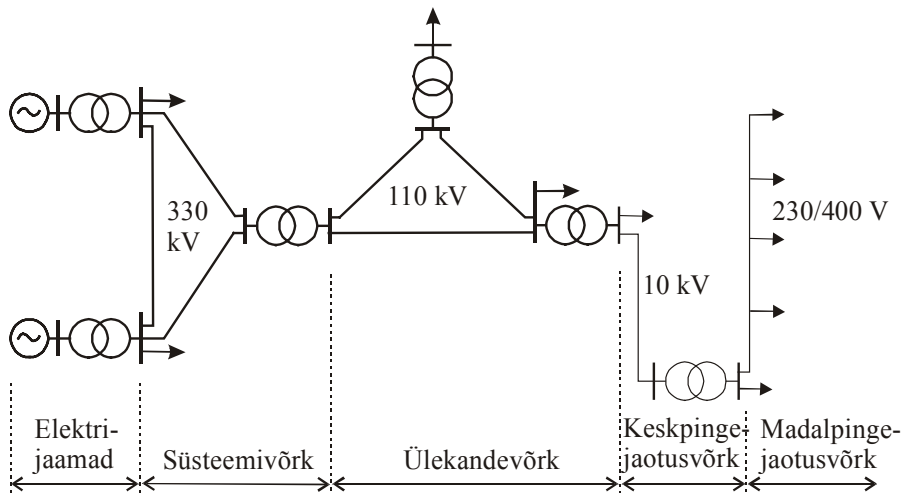
- *Kaplani ehk pöördlabaturbiin* on reaktiivturbiin. Kasutatakse väikestel rõhkudel (kuni 50 m) ja võimsustel (kuni 50 MW). Pöörlemiskiirus 70...250 p/min.
- *Propellerturbiin* on Kaplani turbiin, mille töölabad ei ole pööratavad. Kasutatakse lihtsa konstruktsiooni ja madala hinna tõttu väikestel võimsustel.
- *Francise ehk radiaalaksiaalturbiin* on reaktiivturbiin. On maailmas enim levinud turbiinitüüp. Kasutatakse muuhulgas suurtel rõhkudel (kuni 700 m) ja võimsustel (kuni 1000 MW). Pöörlemiskiirus 150...500 p/min.
- *Pelton- ehk koppturbiin* on aktiivturbiin. Kasutatakse eriti suure veerõhu ja väikese veehulga korral. Pöörlemiskiirus 1000...3000 p/min.

Hüdroelektrijaamu liigitatakse veel veehoidla, paisu jm ehituslike iseärasuste järgi. Elektrisüsteemi talitluse juhtimise seisukohalt on soodus veehoidla suhteliselt suur maht. Elektrienergia akumulatsiooniks kasutatakse pumphüdroelektrijaamu, mille agregaadid (enamasti Francise turbiinid) töötavad nii pumbana kui turbiinina. Pumphüdroelektrijaama kasutegur on 75% ringis.

**Alajaam** on ette nähtud elektrienergia muundamiseks ja jaotamiseks. Alajaam on elektrivõrgu osa, sisaldades sisenevate ja väljuvate ülekande- või jaotusliinide otsi, lülitusseadmeid, trafosid, juhtimisahelaid ning hooneid. Alajaamas on tavaliselt ka kaitse- ja juhtimisaparatuur. Alajaama, milles on küll lülitusseadmed ja kogumislaidid, kuid puuduvad jõutrafod, nimetatakse **lülituspunktiks**. Alajaama osa, mis hõlmab lülitusseadmeid koos nende juurde kuuluvate juhtimis-, mõõte-, kaitse- ja reguleerimiseseadmetega, nimetatakse **jaotlaks**. Konstruktiivselt eristatakse välis- ja sisejaotlaid.

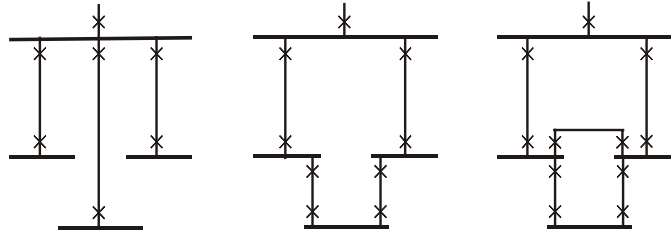
### 2.1.3 Elektrivõrk

Elektrivõrku määratletakse kui rajatiste ja seadmete kogumit elektrienergia ülekandmiseks ja jaotamiseks. Elektrivõrguks nimetatakse ka suure võrgu osa, arvestades näiteks nimipinget, tarbijate iseloomu või mingit muud tunnust. Nimipinge alusel liigitatakse võrke **madal-, kesk-, kõrge- ja ülikõrgepingevõrkudeks**. Eestis on nimipinged 0,4; 6; 10; 15; 20; 35; 110; 220 ja 330 kV. Mujal maailmas kasutatakse ka muid nimipingeid. Nii on keskpingevõrkudes laialdaselt kasutusel nimipinge 20 kV. Ülikõrgepingevõrkudes on pinged enamasti 400...760 kV. Ehitatud on ka **ultrakõrgepingevõrke** tööpingega üle 1000 kV.



Otstarbe järgi liigitatakse võrke **süsteemi-, ülekande- ja jaotusvõrkudeks**. Liigitus on võrdlemisi tinglik ja sõltub riigist, isegi vaadeldavast probleemist või vaatlejast. Süsteemivõrkude all mõeldakse tähtsamaid ülikõrgepingevõrke, mis ühendavad elektrisüsteeme ja suuri elektrijaamu (joonis 2.6). Ülekandevõrkude (tavaliselt  $U_N = 110...220$  kV) ülesanne on suurte elektrienergia koguste transport elektrijaamadest tarbimispiirkonna suurtesse alajaamadesse. Kasutatakse ka mõistet **põhivõrk**, mille all mõeldakse tavaliselt süsteemivõrku koos ülekandevõrgu olulise

osaga. **Jaotusvõrkude** (meil  $U_N \leq 35$  kV) ülesanne on jaotada ning edastada elektrienergiat tarbimispiirkonnas tarbijaile. Jaotusvõrke liigitatakse tarbijate järgi **tööstus-, linna- ja maavõrkudeks**.



**Joonis 2.7 Radiaal-, ring- ja silmusvõrk**

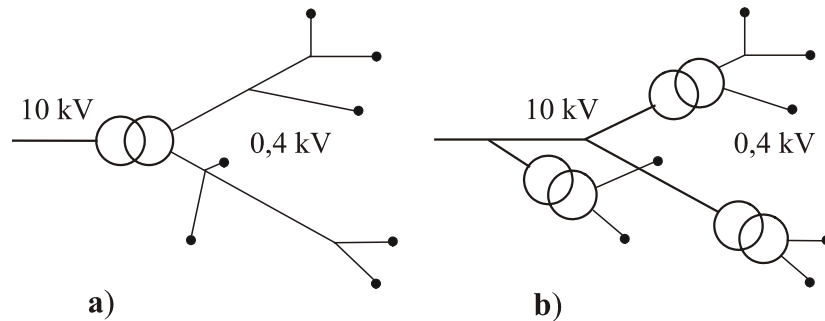
Elektrivõrgu konfiguratsioon on otseselt seotud tarbijate elektrivarustuskindlusega. Elektrivarustuskindlusest jaotatakse tarbijad kolme kategooriasse ehk elektrivarustuskindluse gruppi. Esimese grupi tarbijad vajavad toidet kahest sõltumatust toiteallikast (alajaamast) või ka lisatoidet kolmandast allikast (haiglad, keeruka tehnoloogilise protsessiga ettevõtted jm). Teises grupis kasutatakse kas ühte eritingimustel ehitatud või kahte sõltumatut toiteallikat, kusjuures automaatikata reservallika lülitab sisse valvepersonal või operatiivbrigaad. Seda süsteemi kasutavad enamasti tööstusettevõtted. Kolmandasse gruppi kuuluvad kõik ülejäänud objektid, mida varustatakse ühest toiteallikast (nt elamud). Elektrivõrke liigitatakse konfiguratsiooni järgi **radiaalvõrkudeks, hargnevateks radiaalvõrkudeks, ringvõrkudeks ja silmusvõrkudeks** (joonis 2.7). Erinevate võrgu konfiguratsioonide eeliseid ja puudusi on kirjeldatud tabelis 2.1.

Tabel 2.1 Võrguskeemide võrdlus

Skeem	Eelised	Puudused
Radiaalvõrk	Skeemi lihtsus ja selgus Lihtne releekaitse	Madal elektrivarustuskindlus
Ringvõrk	Kõrge elektrivarustuskindlus Parem pingepüsivus ehk pingestabiilsus Väikesed võimsuskaod	Keerukas releekaitse Keerukas käit
Silmusvõrk	Veelgi kõrgem varustuskindlus Veelgi parem pingepüsivus Veelgi väiksemad võimsuskaod	Keerukas ja kallis releekaitse Keerukas käit

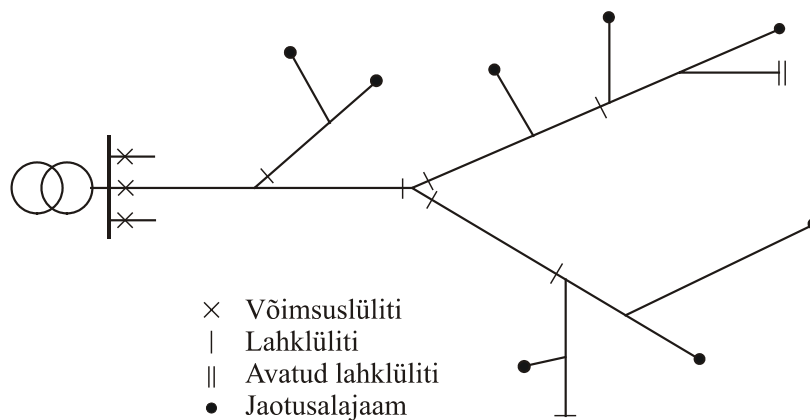
Jaotusvõrkude skeemi valikul tuleb arvestada, et kui jaotusfunktsioonid jätta madalpingele (joonis 2.8 a), tuleb võrk odavam; kui jaotada rohkem keskpingel (joonis 2.8 b), on kaod väiksemad.





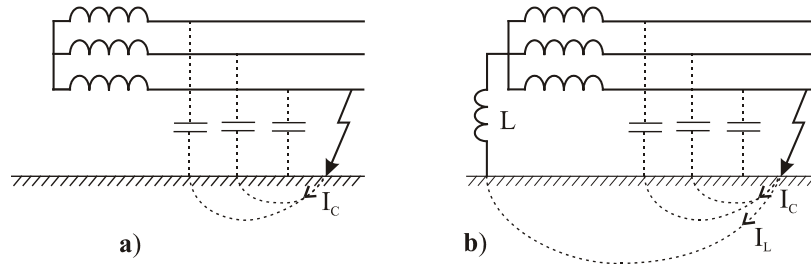
**Joonis 2.8 Jaotusvõrgu jaotusfunktsioonid madal- ja keskpingel**

Toitealajaamad ülepingsega tavaliselt 110 kV ja alampingega 6...35 kV on keskpingejaotusvõrkude toitepunktid (joonis 2.9). Nende alajaamade trafode arv ja lülitusskeemid nii ülem- kui alampinge poolel sõltuvad ülekandevõrgu ja jaotusvõrgu skeemidest, tarbijatele vajalikust elektrivarustuskindlusest jm.



**Joonis 2.9 Jaotusvõrgu keskpingefiidri skeem**

Keskpingejaotusvõrgu neutraal võib olla maast isoleeritud või maandatud läbi kompenseerimisreaktori ehk kaarekustutuspooli (resonantsmaandatud neutraaliga võrk). Kõige tavalisema vigastuse, ühefaasilise maalühise puhul võrgu mingis punktis tekib isoleeritud neutraaliga võrgus maaühendusvool läbi mahtuvuslike juhtivuste (joonis 2.10). Kuna keskpingevõrkudes, eriti alla 35 kV õhuliinide puhul, on mahtuvuslik juhtivus faaside ja maa vahel enamasti suhteliselt väike, on ka maaühendusvool  $I_C$  väike ning ei kujuta tavaliselt otsest ohtu. Seetõttu pole vigastatud liini kiire väljalülitamine alati vajalik ning tarbijad võivad jääda tööle. Sageli on sellised maaühendused mööduva iseloomuga. Seejuures ei muutu faasidevahelised pinged ja maandamata faaside pinged maa suhtes saavad võrdseks liinipingega, s.o tõusevad umbes  $\sqrt{3}$  korda. Seda peab arvestama ja elektrivõrgu isolatsiooni vastavalt tugevdama.



**Joonis 2.10 Keskpingevõrgu neutraali maandus: a) isoleeritud neutraal; b) resonantsmaandatud neutraal**

Juhul kui maaühendusvool on siiski arvestatavalt suur (eriti 35 kV kaabli puhul), kasutatakse mahtvusliku maaühendusvoolu kompenseerimiseks neutraali maandamist läbi kaarekustutuspooli (joonis 2.10 b). Maaühenduse puhul kaasneb sellega induktiivse iseloomuga suletud kontuuri ja induktiivse maaühendusvoolu komponendi  $I_L$  teke, mis suurelt osalt kompenseerib maaühendusvoolu mahtvusliku komponendi  $I_C$ . Selline maaühendus nn resonantsmaandatud neutraaliga võrgus pole tavaliselt enam ohtlik, see võib iseenesest mööduda ega vaja alati kiiret väljalülitamist. Elektrivõrgu neutraali maandamisviisi ei mõjuta kolmefaasilise võrgu sümmeetrilist talitlust ega ka arvutusi, kuna kolme faasi voolude summa on null. Tänapäeval on hakatud ühefaasiliste maaltühiste kiiremaks kõrvaldamiseks kasutama maaltühiskaitset. Suur **maaltühisvool** esineb ainult neutraali jäikmaanduse korral. Ülejäänud juhtudel nimetatakse seda **maaühendusvooluks**. **Rikkevool** hõlmab mõlemat mõistet. Kõrgpingevõrkudes ( $U_N \leq 10$  kV) oleksid isoleeritud neutraali puhul tingituna suurtest mahtvuslikest juhtivustest ja kõrge pingest maaühendusvoolud nii suured, et vajaksid kohe väljalülitamist. Releekaitse kindlama töo huvides tehakse sellised võrgud **jäikmaandatud neutraaliga**. Ka ei teki jäikmaandatud neutraaliga võrgus ühe faasi maanduse puhul teistes faasides pinge ohtlikku tõusu.

#### 2.1.4 Elektri ülekanne

Elektriliin on ühtlaselt jaotatud parameetritega elektriahel ehk homogeenne liin. Liini **naturaalvõimsuseks**  $\underline{S}_{nat}$  nimetatakse võimsust, mida edastatakse liinis, kui tema lõpus oleva koormuse takistus on võrdne liini **lainetakistusega**  $\underline{Z}_\lambda$

$$\underline{S}_{nat} = \frac{U_N^2}{\underline{Z}_\lambda^*}, \quad \underline{Z}_\lambda = \sqrt{\frac{r + jx}{g + jb}} \approx \sqrt{\frac{x}{b}}$$

Naturaalvõimsuse ülekandmisel kadudeta liinis ( $r = g = 0$ ) on pinge ja voolu moodulid kogu liini ulatuses muutumatud ning pinge ja vool igal pool faasis, mis tähendab, et edastatakse ainult aktiivvõimsust ning et reaktiivvõimsuskadod mis tahes liini lõigus on võrdsed liini sama lõigu mahtvuses genereeritava võimsusega. Kui liinil edastatav võimsus aga suureneb, suurenevad ka

reaktiivvõimsuskaod ja tekib liini sisenev reaktiivvõimsus. See suurendab pingelangu ja liini pinget hakkab reaktiivvõimsuse suunas vähenema. Edastatava aktiivvõimsuse vähenemisel on olukord vastupidine. Üks homogeense liini parameeter on veel **liini lainepikkus**  $\lambda$ , mis näitab, missugune osa elektromagnetilisest lainest mahub liini pikkusega  $l$ . Sagedusele 50 Hz vastab lainepikkus 6000 km. Ilma lisaseadmeteta võib võimsust üle kanda praktiliselt kuni 500 km kaugusele. Tänapäeval on lisaseadmetena kasutusel staatilised türistorjuhitavad kompenseerimisseadmed (*Flexible AC Transmission Systems, FACTS*), mis koosnevad kondensaatorpatareist ja sellega rööpühenduses türistorjuhitavast reaktorist. Sellised kompenseerimisseadmed toimivad nii püsikui siirdetalitluses, kindlustades elektrisüsteemi stabiilsuse. Põiklülituses kompenseerimisseade stabiliseerib pinget, pikilülituses aga kompenseerib (praktiliselt kuni 50%) liini reaktiivtakistust. Mõlemal juhul tõuseb liini läbilaskevõime ja suureneb ülekande kaugus.

Elektri ülekandmine toimub enamasti vahelduvvoolu abil. **Alalisvooluülekannet** kasutatakse järgmistel juhtudel.

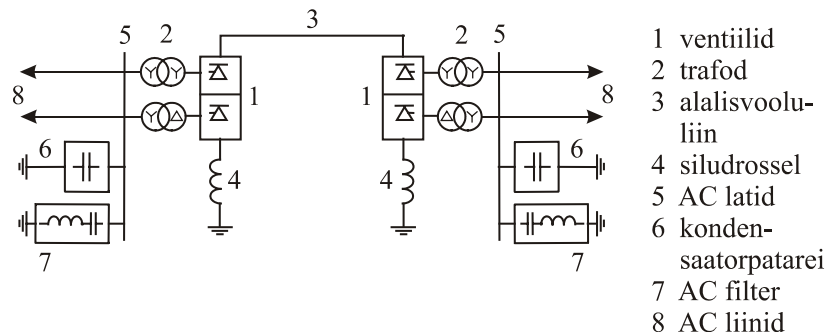
- Eriti pikkade ülekannete korral. Kuigi alalisvooluseadmed on kallid, on liinid see-eest odavamad, mistõttu kogu alalisvooluülekande õigustab end, kui ülekande kaugus on 700 km või enam. Pealegi puuduvad alalisvooluülekandel traditsioonilised stabiilsuseprobleemid.
- Pikad (nt merealused) alalisvoolu kaabelliinid on odavamad kui vahelduvvoolu kaabelliinid juba alates 50 km. Palju pikemaid vahelduvvoolu kaabelliine ei ole tehniliselt võimalikki ehitada nende suure mahtuvuse tõttu.
- Elektri ülekande erineva sagedusega töötavate elektrisüsteemide vahel on võimalik üksnes alalisvoolu abil. Alalisvooluliin võib ka puududa, kui ühes ja samas alajaamas toimub muundamine mõlemas suunas. Sel juhul on tegemist alalisvoolu vahelüliga (*back-to-back* ühendusega).

Klassikalise muundusalajaama põhiplokk on trafost ja türistorventiilidest koosnev kolmefaasiline sildmuundur, mis muundab kolmefaasilise vahelduvpinge alalispingeks või vastupidi (joonis 2.11). Alaldit saab juhtida türistoride sisselülitushetke (tüürnurga) muutmisega. Tüürnurga suurendamisel nullist kuni 90° väheneb alaldatud pinget väärtus maksimumist nullini. Tüürnurga edasisel suurenemisel muutub alalispinge negatiivseks. Sellega muutub ka võimsuse suund ja muundur läheb alalditalitlusest üle vaheldi- ehk invertertalitluse. Seega saab alalisvooluülekandeid kasutada elektrienergia edastamiseks mõlemas suunas. Kuna ventiilide tüürnurga muutmine toob kaas vahelduvvoolu nihkumise pinget suhtes, tähendab see, et muundur tarbib vahelduvvooluvõrgust märkimisväärselt reaktiivvõimsust, mida kompenseeritakse kondensaatoritega. Voolu mittesiinuseelisuse tõttu on vajalik veel kõrgemate harmooniliste filtreerimine.

Alalisvoolu ülekandesüsteem võib olla ühe- või kahepooluseline. Ühepooluselise ehk unipolaarse ülekande puhul on voolu tagasiteeks meri või maa. Seda skeemi

saab täiendada teise samasuguse skeemiga, mis moodustab alalisvooluülekanne teise pooluse. Nii saadakse bipolaarne ülekanne. Bipolaarse ühenduse ühe pooluse avarii korral jääb teine poolus tööle unipolaarse ülekandena.

Viimastel aastatel on klassikalist alalisvooluülekanne tööpõhimõtet tunduvalt täiustatud. Kõige perspektiivsem on nn kergtehnoloogial põhinev alalisvoolu ülekandesüsteem (*HVDC Light*), kus kasutatakse uusi bipolaartransistore, mille lülitussagedus võib ulatuda kümnete kilohertsideni. See võimaldab ventiilide avamisaegade asemel juhtida muundurit kõrge modulatsioonisagedusega impulsside laius reguleerimisega. Tulemuseks on reaktiivvõimsuse tarbe vähenemine ja silufiltrite probleemi lihtsustamine. Kergtehnoloogial põhinev alalisvooluülekanne annab uusi võimalusi elektrisüsteemi talitluse reguleerimiseks ja stabiilsuse kindlustamiseks.



**Joonis 2.11** Alalisvooluülekanne põhimõtteskeem

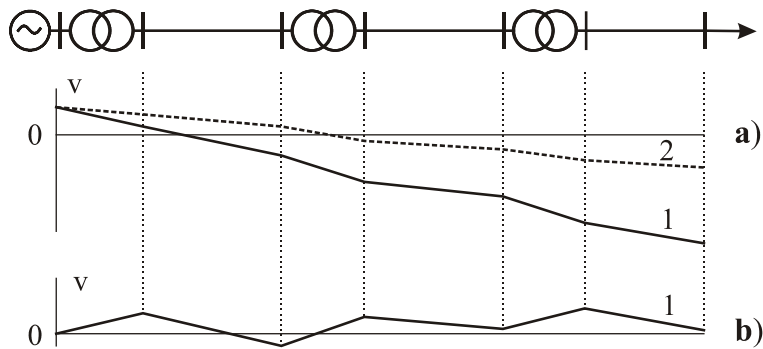
Kuna elektrienergiat salvestada pole praktiliselt võimalik, peab igal ajahetkel valitsema tarbitava ja genereeritava võimsuse tasakaal ehk **võimsusbilanss**. See kehtib nii aktiiv- kui ka reaktiivvõimsuste kohta. Suuremad reaktiivvõimsuse tarbijad on asünkroonmootorid, muundurid, induktsioonahjud jm. Reaktiivvõimsuse kogutarbimisest moodustavad elektritarvitite kõrval olulise osa reaktiivkaod, moodustades ligi 50% võrku antavast võimsusest. Elektrivõrgu reaktiivvõimsuskad on põhjustatud peamiselt trafodest, kuna kõrgepingeliinid praktiliselt oma kaod kompenseerivad.

Generaator annab võrku reaktiivvõimsust, kui ta on üleergutatud ( $E > U$ ), alaergutatud ( $E < U$ ) generaator aga vastupidi tarbib reaktiivvõimsust. Generaatori reaktiivvõimsust piiravad järgmised tegurid:

- generaatori staatorivool ei tohi ületada suurimat lubatud väärtust
- ergutusvool (rootorivool) ei tohi ületada suurimat lubatud väärtust
- tagatud peab olema generaatori stabiilne talitus.

Reaktiivvõimsuse allikateks elektrisüsteemis on elektrijaamade generaatorite kõrval veel reaktiivvõimsuse kompenseerimisseadmed. Suurte reaktiivvõimsuskadude tõttu trafodes pole märkimisväärse reaktiivvõimsuse edastamine ühe nimipingega võrgust teise (läbi trafode) otstarbekas, mistõttu kasutatakse

reaktiivvõimsuse kohalikku genereerimist ehk **reaktiivvõimsuse kompenseerimist**. Kompenseerimisseadmeteks on sünkroonkompensaatorid, kondensaatorpatareid, põikreaktorid ja staatilised reaktiivvõimsuse allikad. Sünkroonkompensaatori eeliseks on lisaks reaktiivvõimsuse sujuvale reguleerimisele pinge reguleerimise võimalus. Kahjuks on sünkroonkompensaatorite hankimine ja käit kulukas, mistõttu tänapäeval kasutatakse neid vaid erijuhtudel põhivõrgu sõlmalajaamades. Kondensaatorpatareid on küll suhteliselt odavad ja töökindlad, aga kuna nende poolt genereeritav reaktiivvõimsus on võrdeline pinge ruuduga, siis soodustavad nad pinge kõikumist. Ainuke võimalus kondensaatorpatarei reguleerimiseks seisneb rööptalitusel olevate kondensaatorite sisse- või väljalülitamises. Tõsi, kondensaatorpatarei talitluse juhtimisega türistorseadmete abil võib saavutada näiliselt sujuva reguleerimise. Põikreaktorid kasutatakse ülikõrgpingega õhuliinides genereeritud liigse reaktiivvõimsuse kompenseerimiseks. Staatilise reaktiivvõimsuse allika all mõeldakse komplekti, mis koosneb kondensaatorpatareist ja sellega rööbiti



**Joonis 2.12** Pinge elektrivõrgu suurimal (1) ja vähimal (2) koormusel:  
a) suhteliste pingehälvete diagramm trafode pingelisata, b) diagramm trafode pingelisaga

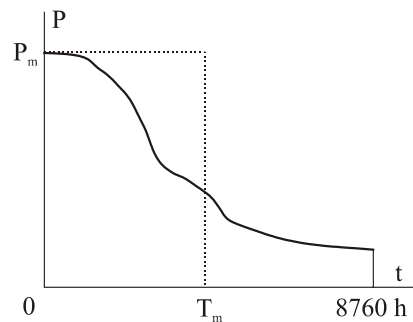
ühendatud reaktorist, mille südamikuga eelmagneetumise taset võib sujuvalt muuta.

Pinge taseme põhivõrgus määrab reaktiivvõimsuste tasakaal. Mõningal määral toimub pinge reguleerimine siin ka trafode ülekandesuhete muutmise teel. Pinget tarbija juures määravad ka pingekaod võrguelementides ja trafode ülekandesuhted. Joonisel 2.12 a on suhteliste pingehälvete  $v = (U - U_N)/U_N$  diagramm juhul, kui trafode ülekandesuhted oleksid võrdsed võrkude nimipingete suhetega. Kuna võrgu suurim ja vähim koormus võib oluliselt erineda, erinevad ka diagrammid 1 ja 2. Kuna elektrivõrgu summaarsed pingekaod ulatuvad suurimal koormusel üle 50% nimipingest, on vaja pingelisat, mis tagatakse trafode ülekandesuhete muutmise teel (joonis 2.12 b).

### 2.1.5 Elektri tarbimine

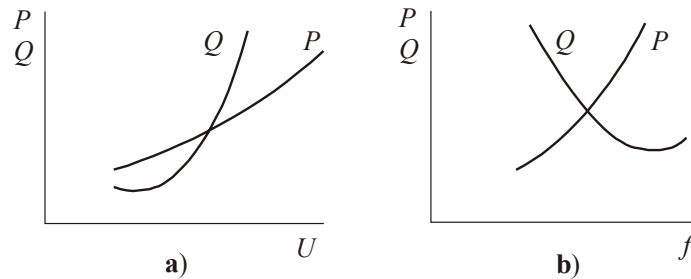
Elektritarbija koormuse all mõistetakse tavaliselt elektritarvitite summaarset aktiiv- ja reaktiivvõimsust, millele lisanduvad kaod kohalikus elektrivõrgus. Koormus muutub ajas ning sõltub süsteemi sagedusest ja sõlme pingest

$$P = P(t, f, U), \quad Q = Q(t, f, U)$$



Praktikas vaadeldakse koormuse sõltuvust igast mõjurist eraldi. Koormuse muutumist ajas näitab **koormusgraafik**, sõltuvust sagedusest ja pingest – **staatilisid karakteristikud**. Kasutusel on veel aasta **koormuskestusgraafik**, mis näitab antud väärtusega võrdse või seda ületava koormuse kestust ajavahemiku (aasta) jooksul. Joonistel 2.13 ja 2.14 on toodud koormuskestusgraafik ja staatilised karakteristikud.

Joonis 2.13 Aasta koormuskestusgraafik



Joonis 2.14 Koormuse staatilised karakteristikud  
a) pinge järgi, b) sageduse järgi

Kui vaadelda elektrivõrgu talitlust olukorras, kus pinge ja sagedus ei erine oluliselt nimiväärtusest, võib staatilisi karakteristikuid selles piirkonnas lineariseerida ning pinge ja sageduse mõju koormusele iseloomustada aktiiv- ja reaktiivkoormuse **pinge- ja sagedustundlikkusega**

$$\frac{\partial P}{\partial U}, \quad \frac{\partial Q}{\partial U}, \quad \frac{\partial P}{\partial f}, \quad \frac{\partial Q}{\partial f}$$

Ligikaudselt võib maksimaalkoormust  $P_m$  hinnata tippkoormuse kasutusaja  $T_m$  ja aasta energia  $W$  järgi, arvestades, et

$$W = \int_0^T P dt = P_m T_m$$

Veidi täpsema tulemuse annab **Velanderi valem**

$$P_m = k_1 W + k_2 \sqrt{W}$$

Nii maksimaalkoormuse kasutusaeg  $T_m$  kui Velanderi valemi kordajad  $k_1$  ja  $k_2$  on antud käsiraamatutes sõltuvalt tarbija liigist.

Elektritarvitid on projekteeritud nii, et nende töö on optimaalne talitluse nimiparameetrite (pinge, sagedus) juures. Seejuures eeldatakse, et pinge on siinuseline ja kolmefaasilises süsteemis sümmeetriline. Elektrihaamast väljastatud elektrienergia kvaliteeti rikuvad pingekaod elektrivõrgus, ühefaasilised ning mittelineaarseid elemente sisaldavad tarvitid jne. **Elektri kvaliteedi** all mõeldakse üldjuhul elektritarbijate elektrivarustuskindlust ja talitusparameetrite vastavust nimisuurustele. Kvaliteedinõuded võivad erineda sõltuvalt tarbijast. Elektrivõrk peab andma tarbijale kvaliteetset elektrit, kuid ka tarbija ei tohi oma seadmetega võrku saastata, sest üks olulisem halva kvaliteedi põhjustaja on tarbija ise.

Elektri kvaliteet mõjutab majanduslikult elektrisüsteemi, võrguettevõtete seadmete ja kõigi elektritarbijate tööd. Tänapäeval on tõusnud tööstuses elektroonika ja automaatika osakaal, samuti infotehnoloogia tähtsus. Kõik elektroonikaseadmed on aga väga tundlikud toitepinge häiretele. Elektrienergia kvaliteet on tihedalt seotud mõistetega nagu seadmete töökindlus, eluiga, kasutegur, stabiilsus, valeoperatsioonid, rikked jne. Suur on pikkadest katkestustest tingitud nn andmata ja saamata jäänud elektrienergia maksumus. Liigpinged võivad nii tarbija kui ka võrguettevõtte elektriseadmed rikkuda või täielikult hävitada.

Vahelduvvoolu elektriseadme normaalseks toimimiseks peab võrgusagedus olema lähedane nimisagedusele, toitepinge lähedane nimipingele, pinge siinuseline ja kolmefaasilise tarbija puhul ka sümmeetriline. Nii elektrivõrgu kui muude elektriseadmete häiretundlikkust ja häirete tagasimõju hõlmab mõiste **elektromagnetiline ühilduvus**. Elektromagnetilist ühilduvust käsitlevaks rahvusvaheliseks standardiks on seeria IEC 1000, Eestis EN 61000. Eesti standard *EVS-EN 50160 Pinge tunnussuurused avalikes elektrivarustusvõrkudes* normib avalike võrkude pinge kvaliteedinäitajaid ehk tunnussuursi (efektiivväärtust, sagedust, kõrgemate harmoonikute sisaldust jne) ning nende lubatud hälbeid.

Elektrienergia kvaliteedinäitajad.

- **Võrgusagedus.** Eestis on toitepinge nimisagedus 50 Hz. Normaaltalitusel peab põhisageduse 10-sekundiline keskvärtus olema järgmistes piirides:
  - 50 Hz  $\pm$  1% (49,5...50,5 Hz) 95% nädalas
  - 50 Hz -6/+4% (47...52 Hz) 100% nädalasVõib normeerida ka sageduse kõikumist  $\Delta f = f_{\max} - f_{\min}$ , s.o vahet suurima ja vähima sageduse väärtuse vahel kindlaksmääratud ajavahemikul ning nn elektrilist aega

$$t_e = \frac{1}{f_n} \int_0^{t_a} f dt_a$$

kus  $t_a$  – astronoomiline aeg

$f$  – talitlussagedus

$f_n$  – nimisagedus.

- **Aeglated pingemuutused** on pinge efektiivväärtuse suurenemised või vähenemised, mida iseloomustatakse pinge kõrvalekaldega ehk **pingehälbega**

$$\Delta U = U - U_n \quad \text{või} \quad \Delta U = \frac{U - U_n}{U_n} 100 \%$$

Standardi kohaselt peab toitepinge efektiivväärtuse 10-minutiline keskvärtus 95% juhtudel olema igas nädalaintervallis piirides  $U_n \pm 10\%$ .

- **Pinge kõikumine** on järjestikku pingemuutuste kogum või pingekõvera mähisjoone tuiklemine. Pinge kõikumist hinnatakse pinge muutumise ulatusega

$$\delta U = U_{\max} - U_{\min} \quad \text{või} \quad \delta U = \frac{(U_{\max} - U_{\min})}{U_n} 100\%$$

Suurim pinge kõikumistega seotud probleem on **värelus (flikker)**. Värelus on nägemisaistingu ajaline ebäühtlus, mis on tingitud valguse kõikuvast heledusest või muutlikust spektraaljaotusest.

- **Pingelohk** on toitepinge järsk langus lühikeseks ajaks tasemeni 90% kuni 1% lepingulisest nimipingest. Pingelohu kestus on tavaliselt 10 ms (poolperiood) kuni 1 min. Pingelohu sügavus on nimipingest ja pingelohu ajal esineva vähima pinge efektiivväärtuste vahe.
- **Toitekatkestus** on seisund, mille puhul pinge liitumiskohas on väiksem kui 1% nimipingest. Toitekatkestused on plaanilised või juhuslikud. Piiriks lühiajalise ja pikaajalise katkestuse vahel loetakse standardis EVS-EN 50160 kolme minutit, praktikas on kasutusel ka ühe minuti piir.
- **Liigpinged** on ajutised võrgusageduslikud liigpinged ja transientliigpinged. Ajutine liigpinge on suhteliselt pika kestusega liigpinge mingis kohas. Ajutised liigpinged tekivad tavaliselt lülitustoimingute või rikete tõttu. Üks tüüpilisemaid ajutiste võrgusageduslike liigpingete põhjuseid on ühefaasilise maalühise puhul pinge tõus teistes faasides. EVS-EN 50160 järgi on selliste liigpingete väärtus äärejuhi ja maa vahel madalpingel tavaliselt 1,5 kV. **Transientliigpinge** on lühikest aega võnkuv või mittevõnkuv liigpinge, mis on tugevalt sumbuv ning kestab mõni millisekund või vähem. Transientliigpinge tekib äikese ajal, lülitamistoimingutel või sulavkaitsmete läbipõlemisel. Madalpingel ei ole transientliigpinge tippväärtus harilikult üle



6 kV.

- **Pinge asümmeetria** on mitmefaasilise võrgu seisund, mille puhul faasipingete efektiivväärtused või faasidevahelised nihkenurgad pole võrdsed. Asümmeetriat iseloomustavaks näitajaks on pinge vastujärgnevus- ja pärijärgnevuskomponendi suhe – asümmeetriategur

$$k_a = \frac{U_2}{U_1} \cdot 100 \%$$

Normaaltalitusel ei tohi vastujärgnevuskomponendi efektiivväärtuse 10-minutiline keskvärtus madal- ja keskpingel ületada 2% pärijärgnevuskomponendist iganädalaste mõõtmiste 95% juhtudel. Mõnes piirkonnas, kus tarbijajärgne on ositi ühendatud ühe- või kahefaasiliselt, võib 3-faasilises liitumispunktis asümmeetria olla kuni 3%.

- **Pinge mittesiinuselisus** tähendab lainekuju häiritust. Lainekuju häired on
  - alaliskomponendi sisaldus
  - kõrgemad harmoonikud
  - vahe- ehk interharmoonikud
  - toitepingele pealdate signaalpinged.

Kõrgema harmooniku pinge on siinuspinge, mille sagedus on täisarv korda suurem toitepinge põhisedusest. Kõrgemad harmoonikud saadakse lainekuju arendamisel Fourier' ritta. Kõrgemaid harmoonikuid võib hinnata üksikult või ühiselt **harmoonmoonutusteguriga** (*Total Harmonic Distortion Factor, THD*), mis arvutatakse valemiga

$$THD = \sqrt{\frac{\sum_{h=2}^{40} (U_h)^2}{U_1}}$$

Vaeharmooniku pinge on siinuspinge, mille sagedus pole täisarvkordne põhiline sagedus. Vaeharmoonikud võivad esineda ühel ajal lähedaste sagedustega ja moodustada laiaribalise spektri. Toitepingele pealdate signaalpinge on toitepingele moduleeritud signaal teabe edastamiseks avalikus elektrivarustusvõrgus ja tarbijajärgne. EVS-EN 50160 sätestab piirid vaid kõrgematele harmoonikutele ja toitepingele pealdate signaalpingetele.

## 2.2 Kommutatsiooni- ja mõõteaparatuur

Elektrienergiat suunatakse võimsus- ja lahkülitite abil. Võimsuslüliti on võimeline sisse lülitama, juhtima ja välja lülitama elektriahela normaaltalitusvoolu, samuti sisse lülitama, juhtima etteantud aja kestel ja välja lülitama voolu elektriahela anomaaltalitusel, näiteks lühisel. Lülitamine toimub käsitsi või automaatselt releekaitse ja automaatika (nt taaslülitusautomaadi) toimel. Võimsuslülitite

põhitüübid on

- õlilüliti
- õlivaene lüliti
- suruõhklüliti
- elegaas(SF6)lüliti
- vaakumlüliti.

Lahklülitid on ette nähtud elektriahelate kommuteerimiseks põhiliselt koormuseta olukorras, kuid nad peavad sisselülitatuna taluma normaalset talitusvoolu ja etteantud aja kestel anormaalitalitusvoolu, näiteks lühisvoolu. Lahklülititega luuakse nähtavad katkestuskohad, tagamaks ohutu töötamise elektriahela väljalülitatud osal. Lahklülitid on käsitsi lülitatavad või mootorajamiga (kaugjuhitavad).

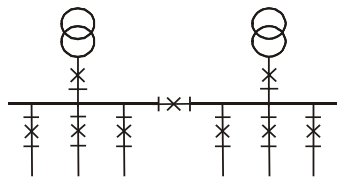
### 2.2.1 Põhivõrgu alajaamade skeemid

Põhivõrgu jaotlate skeemid valitakse ennekõike jaotlate otstarbe ja suuruse järgi. Tegemist võib olla elektri jaotamisega, transformeerimisega jne. Skeemi täpsem valik on töökindluse ja kulude vahelise optimeerimise küsimus. Suurema võimsuslülitite arvuga skeemid on üldiselt töökindlamad ja paindlikumad, kuid kallid. Kasutatavamad skeemilahendused on järgmised.

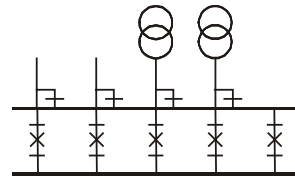
*Ühe latisüsteemiga skeem* (joonis 2.15) on kõige lihtsam ja odavam, aga ka kõige ebatöökindlam. Puudused:

- seadmete rikke korral vältab elektrikatkestus kogu remondi aja
- elektrikatkestus esineb ka seadmete (nt võimsuslülitite) hoolduse ajal
- liine ei saa ümber rühmitada.

Mõningal määral parandab olukorda lahk- või võimsuslülititega sektioneerimine, kuid enamasti põhivõrgus ühelatisüsteemiga skeemi ei kasutata.



Joonis 2.15 Ühelatisüsteem



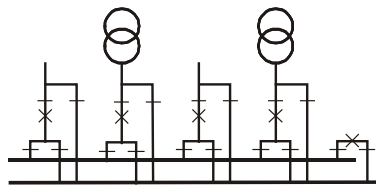
Joonis 2.16 Möödaviiklatisüsteem

*Möödaviiklatisüsteemiga* (joonis 2.16) võib ühendada mis tahes ahela, minnes mööda selle ahela oma lahtri seadmetest (võimsuslüliti, voolutrafo). Ahela juhtimine tagatakse kõikide ühenduste tarbeks kasutatava ühe ja sama erilahtri kaudu. Skeem võimaldab võimsuslülitite hooldamist ja on lihtsalt laiendatav. Lahtri rikke korral vältab elektrikatkestus vaid ümberlülituse aja. Puudused:

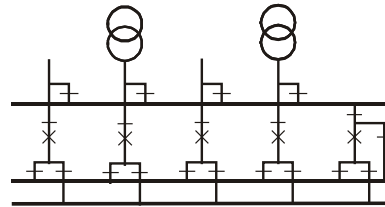
- põhilattide rikke korral on elektrikatkestuse kestus suur
- ümberlülitamine võib kesta vaid lühikest aega.

*Kahe latisüsteemiga jaotlas* (joonis 2.17) on liinid ja trafod ühendatud lahkülilite vahendusel kahe latisüsteemiga. Selline skeem võimaldab fiidrite rühmitamist. Remondiks võib ühe latisüsteemi teha pingevabaks. Kuna võimsuslüli hooldamise ajaks tuleb lahter välja lülitada, võib skeemi täiendada möödaviiklahklülitiga. Sel juhul korvab remondis olevat võimsuslülitit lattidevaheline lülit. See võib asendada muid võimsuslülititeid ka häiringu korral.

*Kahe latisüsteemiga ja möödaviiklatisüsteemiga skeem* (joonis 2.18) on eelmisest täiuslikum, aga ühtlasi kallim. Selline skeem võimaldab remontida nii latte kui võimsuslülititeid elektrikatkestuseta. Ka võib fiidreid vabalt rühmitada ja vajaduse korral ühendada kaks fiidrit ühe võimsuslülitiga. Skeem on põhivõrgus levinuim, sest on piisavalt paindlik ja ka majanduslikult vastuvõetav.

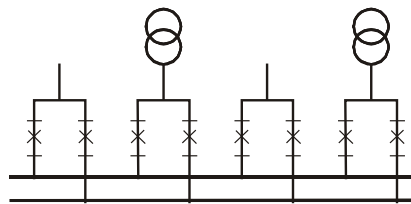


**Joonis 2.17 Kahelatisüsteem**

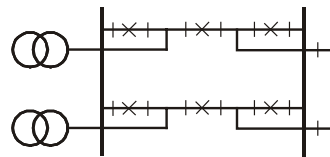


**Joonis 2.18 Kahe põhi- ja möödaviiklatisüsteem**

*Kakslülitiskeem (dupleks)* (joonis 2.19) on kahe kogumislattide süsteemiga jaotla, milles latisüsteemidega ühendamine toimub võimsuslülitite vahendusel. Transformatorilahtris võib teine lülit ka puududa. Selline skeem on eriti paindlik ja töökindel. Ka relekaitse ja automaatika on lihtsam kui kahelatisüsteemi puhul, sest lattidevaheline võimsuslülit puudub. Skeemi on lihtne laiendada. Puuduseks on eelmistest skeemilahendustest kõrgem maksumus. Skeemi kasutatakse näiteks ülikõrgpinge korral, aga ka elektrijaamades ja mujal.



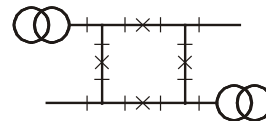
**Joonis 2.19 Kakslülitiskeem**



**Joonis 2.20 Poolteistlüliti skeem**

*Poolteistlüliti skeem* (joonis 2.20) on veidi odavam kui kakslülitiskeemiga alajaam, kuid tal on keerukas relekaitse ja taaslülitusautomaatika. Skeemi kasutatakse maailmas laialdaselt suurtes alajaamades.

*Ringskeem* (joonis 2.21) on otstarbekas siis, kui trafode ja liinide arv ei ole suur. Eeliseks on suhteliselt väike

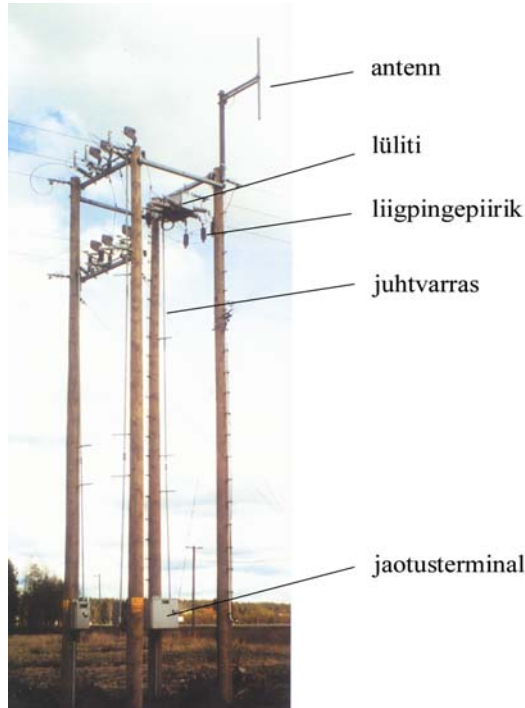


**Joonis 2.21 Ringskeem**

võimsuslülite arv, mis tagavad sellele vaatamata piisava töökindluse ja paindlikkuse. Olenevalt liinide ja trafode arvust on võimalikud muudki ringskeemi lahendused.

### 2.2.2 Jaotusvõrgu lülituspunktid

Jaotusvõrgu operatiivjuhtimise üheks põhivahendiks on kujunemas kaugjuhitavad



Joonis 2.22 Mastlülituspunkt

lahklülid, mis koos mõõte- ja sideseadmetega paigutatakse alajaama või lülituspunkti.

Keskpingevõrgu lülid varustatakse sageli kaarekustutusvahenditega, mistõttu nendega võib sisse ja välja lülitada erineva tasemega voole. Kasutusel on

- vibulüliti
- kamberlüliti
- elegaaslüliti
- vaakumlüliti.

Jaotusvõrkudes on enim levinud vibulülid, millega võib lülitada vaid tühijooksuvoole. Kui lüliti varustada kaarekustutuskambriga on ta võimeline lahutama ka koormusvoole (sisuliselt on tegemist koormuslülitiga). Töökindlamad on suletud kerega elegaas- või



Joonis 2.23 Elegaaslülitiga lülituspunkt

vaakumlülitid.

Keskpingelülitid on käsijuhtimisega või mootorajamiga. Ajam paikneb erilises karbis maapinna lähedal ja ühendatakse lülitiga juhtvarda abil. Ajam võib liituda ka lülitiga (joonis 2.23). Komplekti võivad kuuluda veel liigpingepiirikud ning voolu- ja pingetraford. Ajamiga samasse või, kui ajam liitub lülitiga, siis eraldi karp, paigutatakse mõõte- ja sideaparatuur ning akumulaatorpatarei ja kütteseadmed. Side juhtimiskeskusega toimub tavaliselt raadio teel. Tulemuseks on **jaotusterminal** (*Distribution Terminal Unit, DTU*), mille abil võib jaotusvõrgu talitlust efektiivselt juhtida. Joonisel 2.22 kujutatud mastlülituspunkt on varustatud firma ABB seadmetega.

### 2.2.3 Mõõteandurid

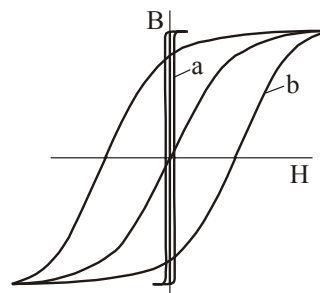
Mõõteandurid on primaarvoolu ja -pinge vahendajad mõõte-, releekaitse- ja teiste juhtimisseadmete tarvis. Andurite ülesanne on

- vähendada voolu ja pinget sekundaarahelale kasutamiseks sobivate väärtusteni
- eraldada (isoleerida) primaarahel sekundaarahelast
- vältida mõõteriistade liigkoormust
- võimaldada seire- ja juhtimisseadmete paigutamist primaarseadmetest eemale.

Mõõteanduritena on kõige enam tuntud **voolu- ja pingetraford**. Kasutatakse ka nn Rogowski võõd vooluandurina ning mahtvuslikke pingejagureid ja -trafosid. Valgusefektidel põhinevad valgusandurid toimivad nii voolu- kui pingeaduritena.

Voolutrafo talitus on lähedane lühistalitlusele ja pingetrafo talitus tühijooksutalitlusele. Seetõttu on ohtlik, kui voolutrafo siirdub sekundaarahela katkemise korral tühijooksutalitlusse. Tulemuseks on ohtlikult kõrge (kuni kümnekond kilovolti) pinge. Ka kuumeneb voolutrafo südamik kuni sada korda enam kui normaaltalitlusel. Pingetrafo ohtlik rike on lühis sekundaarahelas, mille tulemusena kuumenevad trafo mähised.

Voolutraford jagunevad rakenduseesmärkide poolest mõõte- ja kaitsevoolutrafodeks. Aluseks on erinevad ferromagnetilised omadused (joonis 2.24), mis on tingitud trafode toimepiirkondade erinevusest. Nii peavad mõõtevoolutraford täpselt toimima vaid nimivoolu piirkonnas, kaitsevoolutraford aga edastama adekvaatselt ka suuri anormalseid voole. Eristatakse mõõtetrafode voolu- ja nurgavigu. Elektrienergia müügil ei tohi mõõtevoolutrafode täpsusklass olla halvem kui 0,5, mis tähendab, et nimikoormusel ei tohi vooluviga ületada 0,5% ja nurgaviga 30°. Kaitsevoolutrafode põhiprobleem on vea suurenemine suure voolu korral ning aperioidilise

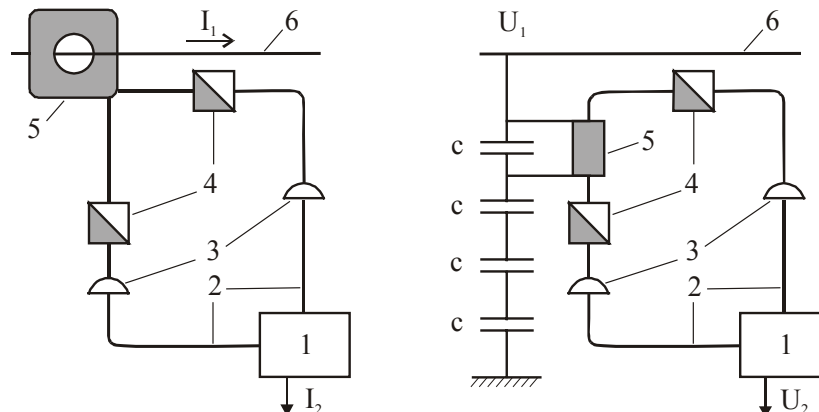


**Joonis 2.24 Mõõtevoolutrafo (a) ja kaitsevoolutrafo (b) südamiku magnetimiskõver**

primaarlühisvoolu ja sellest tingitud südamiku jääkvoomõju.

Ka pingetraford jagunevad mõõte- ja kaitsepingetrafodeks. Ülikõrgepingel kasutatakse peamiselt mahtvuslikku pingetrafort, mis on mahtvusliku pingejaguri ja pingetrafo kombinatsioon.

Mikroprotsessoritel põhinevate releekaitse- ja mõõteseadmete kasutuselevõtt tegi nende väikese sisendvõimsuse tõttu võimalikuks rakendada küllastusnähtusteta voolu- ja pingeandureid. Kuna nendel anduritel puudub magnetsüdamik, siis ei esine ka küllastumist ja kaob vajadus arvestada anduri vea hälvet suure voolu korral. Tõsi, ühes sellega kaob ka võimalus trafo südamiku küllastumisega kaitsta mõõteriistu liigvoolu eest. **Rogowski vöö** on sümmeetriliselt toroidalusele mähitud õhksüdamikuga pool. Toroidi keskelt viiakse läbi voolujuht, näiteks lattu. **Valgusmõõteandurite** tajuriks on sümmeetriakeskmata kristall. Faraday efektil põhinevas voolutajuris muutub võrdeliselt magnetvälja tugevusega valguse võnketasandi pöördenurk. Pockelsi efektil põhinevas pingetajuris muutub võrdeliselt elektrivälja tugevusega valguse murdumisnäitaja. Mõlemal juhul edastab maa potentsiaalile mõõdetabe valgusjuht, mille valgusallikaks on valgusdiodid ja lõppmuunduriks fotodiodid. Joonisel 2.25 on voolu- ja pingeandurite põhimõtteskeemid.



Joonis 2.25 Pinge (a) ja voolu (b) valgusandurid: 1 – elektroonikaplokk, 2 – valgusjuht, 3 – lääts, 4 – polarisaator, 5 – kristall, 6 – primaarahel

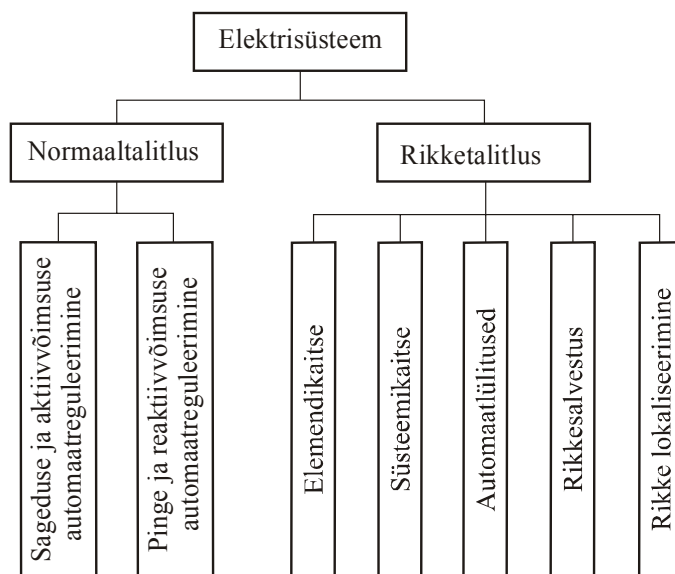
### 2.3 Releekaitse ja automaatika

Tehniliste rikete ja ka personali süü tõttu võib energiasüsteemis tekkida avariiolekord. Operatiivjuhtimise ülesanne on vältida avariilaienemist ning seejärel avariilikvideerida. Enamasti on aga avariikulgu kiire, et seda võivad lokaliseerida ainult automaatikaseadmed.

### 2.3.1 Elektrisüsteemi automaatjuhtimine

Enim kasutatavate automaatide hulka kuuluvad näiteks releekaitseesadmed, reservilülitusautomaadid, taaslülitusautomaadid ja koormuse sagedusautomaadid. Elektrienergia kvaliteedi tagavad sageduse ja pinge automaatregulaatorid. Joonisel 2.26 on elektrisüsteemi automaatjuhtimine. Sellest haarab releekaitse vaatenurgast olenevalt kas ainult elemendikaitset või kõiki rikketalitusega seotud seadmeid.

Releekaitse peab vähendama avariist tingitud kahju avari kiire likvideerimise ja selle laienemise vältimise teel. Releekaitse ei hoia avariid ära. Ta avastab elektriseadmete rikked, enamasti isolatsioonirikked, nendest põhjustatud väga suure lühisvoolu või küllaltki väikese maatühendusvoolu järgi ja lülitab vigastatud elektriseadmed kiiresti ning selektiivselt välja. Kiired ülikõrgepingeliini kaitseesadmed rakenduvad 5 ms jooksul. Kui releekaitse avastab talitlushäiringu (nt ülekoormuse), mis on mõne aja jooksul lubatav, antakse ainult sellekohane signaal. Releekaitseesadmed moodustavad energiasüsteemi automaatikaseadmetest umbes 80%. Mikroprotsessorite laia leviku tõttu võetakse järjest rohkem kasutusele kohtterminale, mis täidavad releekaitse ülesannete kõrval ka automaatjuhtimise ning andmehõive ja -edastamise funktsioone.



Joonis 2.26 Elektrisüsteemi automaatjuhtimine

### 2.3.2 Releekaitse toimimispõhimõtted

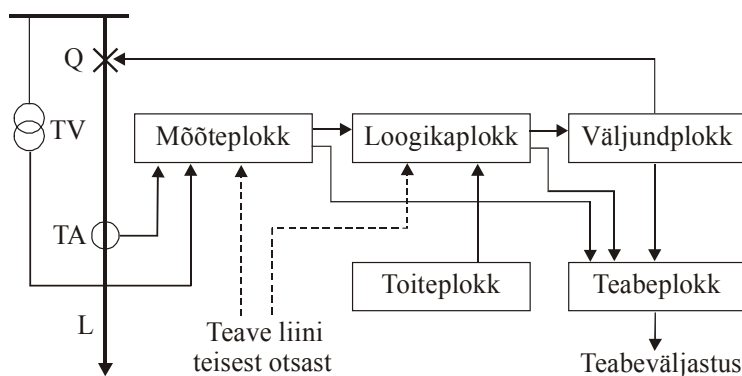
Joonisel 2.27 on elemendikaitse plokkskeem. Kaitse põhiplokid on mõõte- ja loogikaplokk. Nendes töötatakse välja kaitse juhttoime, mis edastatakse väljundploki kaudu võimsuslülile. Mõõteplokk saab teavet kaitseobjekti seisundi kohta

voolu- ja pingetrafast. Vajaduse korral (diferentsiaal- ja võrdluskaitse) kasutatakse teavet ka elemendi teisest otsast. Mõõteplokki väljundtoime suunatakse loogikaplokki. Seal kontrollitakse kaitse rakendumiseks vajalike loogikatingimuste täitmist. Kui loogikatingimused on täidetud ja kaitse mõõteplokk ei ole ettenähtud aja jooksul ennistunud, rakendub kaitse, andes väljundplokki kaudu juhttoime võimsuslülitile. Kaitse ja tema üksikute plokkide toimimise kohta edastatakse teave teabeplokile. Kaitse saab toite akupatareist või **puhvertoiteallikast** (*Uninterruptable Power Supply, UPS*).

Releekaitse näitajateks on

- tunnussuurus
- rakendumise ajaline järgnevus
- toimimiskiirus
- selektiivsus.

Tunnussuurusteks võivad olla elektrilised (vool, pinge, sagedus jm) ja mitte-elektrilised (temperatuur, gaasi rõhk jm) suurused ning nende funktsioonid. Olenevalt sellest kas kaitse rakendub tunnussuuruse suurenemisel või vähenemisel, liigitatakse kaitseid **üle-** ja **alაკaitseteks**. Rakendumise ajalise järgnevuse alusel jagatakse kaitse **põhi-** ja **reservkaitseks**. Põhikaitseid võib olulistel süsteemielementidel olla ka kaks. Reservkaitse rakendub, kui süsteemi rike pole eraldatud etteantud aja jooksul. Toimimiskiiruse järgi jagatakse kaitseid **hetk-** ja **viitekaitseteks**. Selektiivsus on kaitse omadus tuvastada elektrisüsteemi rikkis objekt. Absoluutselt selektiivsed on pikidiferentsiaal- ja võrdluskaitse, mis võrdlevad objekti iga otsa elektrilisi suurusid. Kui mõõtmine toimub objekti ühes otsas, siis on tegemist suhteliselt selektiivse kaitsega. Pikidiferentsiaal- ja võrdluskaitse vajavad toimimiseks sidekanalit, mis võib põhineda abijuhtmel aga ka kõrgsagedus- või mikrolainekanalil.



**Joonis 2.27** Elemendikaitse plokkiskeem: TV – pingetrafo, TA – voolutrafo, Q – võimsuslüüti, L – liin (kaitseobjekt)

Elemendikaitse põhiliigid.



- **Liigvoolukaitse** tunnussuuruseks on kas faasi-, nulljärgnevus- või vastujärgnevusvool. Vajaduse korral täiendatakse voolukaitset pingeloaga (pinge blokeeringuga).
- **Distantskaitse** tunnussuuruseks on takistus, enamasti impedants. Kasutatakse nii faasidevaheliste lühiste kui maalühiskaitsena.
- **Pikidiferentsiaal- ja võrdluskaitse** tunnussuurusteks on voolumoodulite ja -faaside (diferentsiaalkaitse) või voolu suuna (võrdluskaitse) erinevus kaitseobjekti otstes.
- **Põikdiferentsiaalkaitse** tunnussuuruseks on voolu erinevus kaitseobjekti rööpahelate vahel.
- Lisaks nimetatule on kasutusel suur hulk erinevaid kaitse liike, nagu pingekaitse (ala- ja ülepingekaitse, pingekaotuskaitse jm), sünkronismikaotuskaitse, sageduskaitse, võimsuslüliti tõrkekaitse, gaasikaitse jm.

**Süsteemikaitse**, mida nimetatakse ka avariitõrjeautomaatikaks, üheks alaliigiks on koormusvähenduskaitse. Selle kaitse ülesanne on vähendada koormust (osaline väljalülitamine) genereeriva aktiiv- või reaktiivvõimsuse puudujäägi korral elektrisüsteemis. Alasagedusvähenduskaitset nimetatakse ka **sagedusautomaadiks** ja alapingekoormuse vähenduskaitset **koormuse väljalülitusautomaadiks**. Mõlemad kaitsed seatakse üles alajaamades ning neil on palju astmeid erinevate sagedus- või pinge- ning ajasätetega. Tavaliselt liituvad nende kaitsetega ka koormustaastusautomaadid, mis sageduse või pinge normaalväärtuse taastumisel lülitavad koormuse etteantud ajaprogrammi järgi taas sisse, kontrollides seejuures sagedust või pinget. Lisaks üksikute koormuste väljalülitamisele võib alasageduskoormuse vähenduskaitset rakendada ühendsüsteemi jagamiseks üksikuteks eraldi töötavateks süsteemideks, selleks et vältida avarii laienemist, või soojuselektri jaama omatarbe eraldamiseks, tagamaks võimalus jaam taaskäivitada.

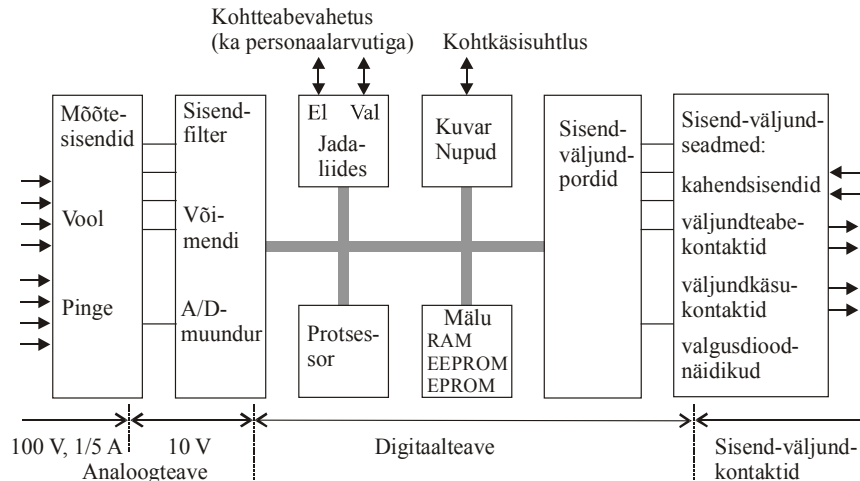
### 2.3.3 Mikroprotsessoripõhine releekaitse

Nüüdisaegsed releekaitse seadmed põhinevad mikroprotsessoritel. Releekaitse kõrval on sellistel seadmetel veel automaatika, andmehõive ja andmeedastuse funktsioonid. Tulemuseks on **kohtterminalid**. Kohtterminalide releekaitsetegevustest on enim levinud liigvoolu- ja maalühiskaitse. Vaid ühe fiidriga piirduvaid kohtterminale nimetatakse ka **fiidriterminalideks**. Mikroprotsessorikaitse funktsionaalne plokkskeem on joonisel 2.28. Kohtterminalil on veel toiteplokk, mis saab välistoite abitoiteallikast (akupatarei, puhvertoiteallikas).

Kaitse põhiplokid.

- Mõõtesisendite plokis eraldatakse (isoleeritakse) kaitseobjekti voolu- ja pingetrafoide väljundsuurused (nimisuurused tavaliselt 1 või 5 A ja 100 V) kaitseahelast.
- Muundurplokis vool ja pinge filtreeritakse, võimendatakse ja

digitaliseeritakse. Diskreetimissagedus on tavaliselt 2...40 voolu ja pinge hetkväärtuse ühe perioodi kohta. Kahte väärtust kasutatakse lihtsa volukaitse korral, mõõtes mõlema poolperioodi amplituudväärtused. Nii saab välistada lühisvoolu aperiodilise komponendi mõju kaitse toimimisele. Muundurploki väljundiks on arväärtused.



Joonis 2.28 Mikroprotsessorkaitse plokk skeem

- Jadaliides on ette nähtud kohtteabevahetuseks (nt alajaamas). Kohtterminali kogu teabevahetus: teave liini teisest otsast, kaitse sätted, mõõte- ja seisundiandmed, rikkosalvestus jm toimub selle liidese kaudu. Liidesed on elektrilised või toimivad valgusjuhi abil, mille suurim pikkus on 2000 m. Kohtterminali andmevahetus suurte kauguste taha toimub kaugterminali vahendusel.
- Kuvar ja sõrmistik võimaldavad suhtlemist terminaliga kohapeal. Nende abil saab terminali sätestada ja kontrollida.
- Protsessoreid on kohtterminalis üks või enam. Täiuslikumatel distantskaitsetel on iga kaitseastme kohta protsessor. Protsessorid teevad tsüklilisi arvutusi kohaliku ja mujalt saabuvate andmete alusel etteantud algoritmide ja sätete järgi. Toimekiirus võib 32-bitiste sõnade puhul olla kuni 100 MIPS (*Millions of Instructions Per Second*).
- Mälusid on kolme liiki: muutmälu (*RAM*), programmeeritav elekterkustutusega püsिमälu (*EEPROM*) ja programmeeritav püsिमälu (*EPROM*). Kaitse kasutajal on ligipääs muutmälule ja sätete osas ka programmeeritavale püsिमälule. Viimases tagab sätete salvestamine nende säilimise ka abitoite katkemisel. Käidu ja rikkeandmeid (sündmusi ja talitusparameetreid koos ajaandmetega) säilitatakse muutmälus. Andmete säilitamise muutmälus tagab patareitoide.

- Sisend-väljundpordid on sisend- ja väljundseadmete liitmikud protsessori siinil.
  - Sisend- ja väljundseadmeid on nelja liiki:
    - kahendsisendid sama kaitseobjekti muude kaitsete (näiteks trafo gaasi- ja rõhukaitse) teabe sisestamiseks
    - väljundteabekontaktid toimivad kaitse rakendumisel ja kaitse tõrke tuvastamisel
    - väljundkäsucontactid annavad väljalülitamiskäsu võimsuslülititele
    - valgusdiodnäidikute süttimine teavitab kaitse rakendumisest või kaitse tõrke tuvastamisest.
- Nii väljundteabe kui väljundkäsucontactid kuuluvad elektromehaanilistele releedele.

Mikroprotsessorkaitsel on traditsioonilise releekaitsega võrreldes eeliseid:

- sama riistvara (kohtterminali) võib tarkvara muutmise abil rakendada eri kaitseadmete realiseerimiseks
- samal kaitsel võib kasutada kuni nelja sätet, millest aktiveeritakse üks koht- või kaugkäsu; võimalik on kaugsätetamine
- oluliselt suurem on kaitse tundlikkus, töökiirus ja täpsus
- kaitse tunnussuurust on lihtne esitada funktsioonina
- mitmekordse viit- ja kiirtaaslülituse võimalus
- kaitse enda korrasoleku autokontroll
- oluliselt väiksem gabariit ja juhtmestusvajadus
- kaitse riistvara võib kasutada mitmesuguste muude (automaat)juhtimis- ja seireülesannete täitmiseks.