

**TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
ELEKTROENERGEETIKA INSTITUUT**

ELEKTRIVÕRGUD

LOENGIKONSPEKT

EELI TIIGIMÄGI

Tallinn 2004

Käesolevas loengukonspektis käsitletakse suhteliselt kompaktselt elektrivõrgu põhimõisteid, võrgu elementide konstruktsiooni, parameetreid ja karakteristikuid. Põhirõhk on elektrivõrgu püsitalitluse arvutusel. Lühidalt käsitletakse ka reaktiivvõimsuse kompenseerimise ja elektrienergia kvaliteedi küsimusi.

Konspekt on mõeldud Tallinna Tehnikaülikooli elektroenergeetika õppesuuna bakalaureuseõppe üliõpilastele õppeaines *Elektrivõrgud*.

KIRJANDUS

1. Eesti standard EVS-IEC 38:1996 “IEC standardpinged”
2. Eesti standard EVS-EN 50160:2000 “Elektrijaotusvõrkude tunnussuurused”
3. Elovaara, J., Laiho, Y. Sähkölaitostekniikan perusteet. Otakustantamo. Hämeenlinna, 1988
4. Glover, J. D., Sarma, M. Power System Analysis and Design, PWS-KENT Publishing Company. Boston, 1989
5. Gross, C. A. Power System Analysis, 2nd Ed., John Wiley & Sons. New York, 1986
6. Lakervi, E., Holmes, E. J. Electricity Distribution Network Design. Peter Peregrinus Ltd. London, 1989
7. Lakervi, E. Sähkönjakeluverkkojen suunnittelu. Otatieto Oy. Helsinki, 1996
8. Nagrath, I. J., Kothari, D. P. Modern Power System Analysis, 2nd Ed., Tata McGraw-Hill Publishing Company. New Dehli, 1993
9. Teknisiä tietoja ja taulukoita. ABB Strömberg. Vaasa, 2000
10. Tiigimägi, E. Elektrivõrgud. Tallinn, 1997
11. Идельчик В.И. Электрические сети и системы. Москва, 1989

SISUKORD

1	SISSEJUHATUS	5
1.1	Põhimõisted	5
1.2	Elektrivõrkude kujunemine	7
1.3	Nimipinged	9
1.4	Elektrivõrkude liigitus	11
1.5	Elektrivõrkudele esitatavad nõuded	13
1.6	Kolmefaasiline süsteem ja neutraali maandamine	14
1.7	Põhisuurused ja lähtevalemid	16
2	ELEKTRILIINIDE KONSTRUKTSIOON	19
2.1	Õhuliinid	19
2.2	Õhuliinide juhtmed	20
2.3	Õhuliinide mastid	22
2.4	Õhuliinide isolaatorid ja tarvikud	23
2.5	Kaabelliinid	26
3	ELEKTRIVÕRGU ELEMENTIDE ASEESKEEMID JA PARAMEETRID	28
3.1	Elektrivõrgu elemendi kujutamine neliklemmina	28
3.2	Elektriliini parameetrid	30
3.3	Elektriliini aseseemid	32
3.4	Kahemähiselised trafod	34
3.5	Kolmemähiselised trafod ja autotrafod	36
3.6	Tarbijate koormused ja koormusgraafikud	38
3.7	Koormuste staatilised karakteristikud ja modelleerimine püsitalitluse arvutusel	40
3.8	Toiteallikate kujutamine püsitalitluse arvutusel	42
4	ELEKTRIVÕRGU ELEMENTIDE TALITLUS	44
4.1	Homogeenne liin	44
4.2	Homogeense liini modelleerimine Π -aseskeemiga	47
4.3	Liinis edastatav võimsus	48
4.4	Võimsuskaod elektrivõrgu elementides	50
4.5	Energiakaod	53
4.6	Pingelang ja pingekadu	55
5	LIHTSATE ELEKTRIVÕRKUDE PÜSISEISUNDI ARVUTAMINE	59
5.1	Püsiseisundi arvutamise ülesanne ja selle lihtsustamine	59
5.2	Radiaalülekandevõrgu arvutamine	60
5.3	Jaotusvõrgu arvutamine	63
5.4	Ühtlaselt jaotatud koormusega liini arvutamine	65

5.5	Mitme nimipingega võrgu arvutamine	67
5.6	Ringliini arvutamine	68
5.7	Kahepoolse toitega liini arvutamine	71
5.8	Silmusvõrgu arvutamine	72
5.9	Võrgu ligikaudne arvutamine lõhestusmeetodil	74
6	SILMUSVÕRKUDE PÜSISEISUNDI ARVUTAMINE	77
6.1	Ülesande piiritlemine	77
6.2	Lineaarsed sõlmevõrrandid	78
6.3	Lineaarsete sõlmevõrrandite maatrikskuju	81
6.4	Lineaarsete sõlmevõrrandite lahendusmeetodid	83
6.5	Gaussi meetod	85
6.6	Sõlmevõrrandite lahendamine sõlmejuhtivuste maatriksi pööramise teel	86
6.7	Lineaarsete sõlmevõrrandite iteratiivne lahendamine	87
6.8	Mittelineaarsed sõlmevõrrandid	88
6.9	Sõlmevoolude balansivõrrandite lahendamine	90
6.10	Newtoni meetod	91
6.11	Sõlmevõimsuste balansivõrrandite lahendamine	95
6.12	Võimsusvoogude ja võimsuskadude arvutamine	98
7	AKTIIV- JA REAKTIIVVÕIMSUSED ELEKTRISÜSTEEMIS JA ELEKTRIVÕRGUS	100
7.1	Võimsuste balanss	100
7.2	Reaktiivvõimsuse genereerimine elektrisüsteemis	102
7.3	Reaktiivvõimsuse kompenseerimisseadmed	104
7.4	Reaktiivvõimsuse kompenseerimisseadmete valik ja paigutus	108
8	ELEKTRIENERGIA KVALITEET JA PINGE REGULEERIMINE	112
8.1	Elektrienergia kvaliteedinäitajad	112
8.2	Sageduse ja pinge lubatavad hälbed	113
8.3	Tarbija talitluspinget mõjutavad faktorid	115
8.4	Pinge reguleerimise üldpõhimõtted elektrivõrgus	116
8.5	Pinge reguleerimine trafodega	118
8.6	Pinge reguleerimine jaotusvõrgu toitealajaamas	121
8.7	Pinge reguleerimine pingekao muutmise kaudu	123
8.8	Pinge ja reaktiivvõimsuse vastastikune sõltuvus	124
8.9	Pinge asümmeetria ja mittesiinusus	126

1 SISSEJUHATUS

1.1 PÕHIMÕISTED

Elektrijaam on ehitis, mis sisaldab elektrienergia genereerimiseks ja muundamiseks vajalikke põhi- ja abiseadmeid. Elektrijaam toodab (genereerib) kas ainult elektrienergiat või elektri- ja soojusenergiat.

Kasutatava esmase energia alusel on elektrijaamade põhiliikideks **soojus- elektrijaamad** (süsi, gaas, masuut, põlevkivi, turvas), **hüdroelektrijaamad** (vesi) ja **tuumaelektrijaamad** (uraan). Soojuselektrijaamad jagunevad omakorda **kondensatsiooni-** ja **koostootmisjaamadeks**. Esimesed toodavad ainult elektrienergiat ehk elektrit, kusjuures turbiinist väljunud aur kondenseeritakse kohe uuesti veeks. Koostootmisjaamadest antakse osa energiast tarbijaile soojusenergiana ehk soojusena (aur, kuum vesi).

Elektrijaamade elektriossa kuuluvad generaatorid, kogumislaidid, trafod, omatarbe-, lülitus-, juhtimis- jm seadmed.

Elektrivõrk on ehitiste ja seadmete kogum elektrienergia ülekandmiseks ja jaotamiseks. Elektrivõrk koosneb **elektriliinidest** ja **alajaamadest**.

Elektriliin (**õhu-** või **kaabelliin**) on juhtidest, isolatsioonist ja abikonstruktsioonidest koosnev rajatis, mis on mõeldud elektrienergia edastamiseks elektrivõrgu ühest punktist teise.

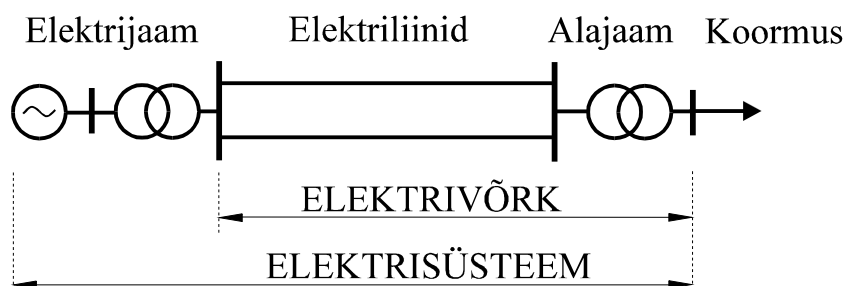
Alajaam on üldjuhul ette nähtud elektrienergia muundamiseks ja jaotamiseks. Muundatavateks parameetriteks on tavaliselt pinge ja vool, harvemini sagedus. Alajaam on elektrivõrgu osa, mis hõlmab sisenevate ja väljuvate ülekande- või jaotusliinide otsi, lülitusseadmestikku, trafosid, juhtimisahelaid ning hooneid. Alajaamas on tavaliselt ka kaitse- ja juhtimisaparatuur. Alajaamad liigitatakse võrkude järgi, millesse nad kuuluvad (nt ülekandevalajaamad, jaotusalajaamad, 110 kV alajaamad, 10 kV alajaamad).

Alajaama, milles on küll lülitusseadmestik ja kogumislaidid, kuid puuduvad jõutrafod, nimetatakse ka **lülituspunktiks**. Lülituspunktis toimub elektrienergia jaotamine ilma selle parameetreid, sealhulgas pinget, muutmata.

Elektrienergiasüsteem ehk lühemalt **elektrisüsteem** on ehitiste ja seadmete kogum elektrienergia tootmiseks, ülekandmiseks ja jaotamiseks. Elektrisüsteem koosneb elektrijaamadest ja elektrivõrkudest. Kuna elektrisüsteemi põhiülesandeks on varustada tarbijaid elektrienergiaga, siis nimetatakse elektri-

süsteemi sageli ka **elektrivarustussüsteemiks**. Samas tähenduses on laialt kasutusel veel termin **energiasüsteem**, arvestades seda, et süsteemi koostootmisjaamadel on kõrvalfunktsiooniks soojustarbivate varustamine soojusega.

Kuna elektrienergia edastamine elektrijaamadest toimub võrgus tavaliselt jaamade generaatorpingest kõrgemal pingel, võib kujutada elektrisüsteemi ka tinglikult lihtsustatud ekvivalentse skeemina (jn 1.1).



Joonis 1.1 Elektrisüsteemi ekvivalentne skeem

Tänapäeval on elektrisüsteemid, millesse võib kuuluda palju elektrijaamu, üldjuhul ühendatud süsteemidevaheliste ühendustega suurteks **ühend-süsteemideks**. Suurematel elektrisüsteemidel ja ühendsüsteemidel on väiksematega võrreldes olulisi eeliseid:

- suurem töökindlus
- süsteemide ühendamisega väheneb summaarne vajalik ülesseatud võimsus, kuna ühendatavate süsteemide või süsteemiosade koormusmaksimumid on ajaliselt hajutatud
- väiksem suhteline summaarne vajalik reserv
- võimalik on kasutada suurema nimivõimsusega ökonoomsemaid agregate
- efektiivsemalt saab juhtida erinevat tüüpi jaamade talitlust

Elektrisüsteemide ühendamise majanduslik tulu ületab tavaliselt ühendamiseks vajalike liinide rajamise lisakulud.

Tihti on elektrivõrkude arvutamisel otstarbekas kasutada üldistatud mõistet **toiteallikas** (võrgu toitesõlmes), milleks võib olla elektrijaam või võrku toitev alajaam. Analoogselt mõistetakse termini **koormus** (võrgu koormussõlmes) all nii üksiktarviti, võrguga ühendatud tarvitite grupi kui ka vaadeldavast võrgust toidetava alajaama koormust. Mõisted **toiteallikas** ja **koormus** võimaldavad reaalsest elektrisüsteemist või elektrivõrgust tinglikult eraldada võrgu mingit

osa oma toiteallikate ja koormustega. Nii saab, lugedes toiteallikate ja koormuste parameetrid etteantuks, piirduda palju väiksema ja lihtsama ülesande lahendamisega.

1.2 ELEKTRIVÕRKUDE KUJUNEMINE

Inimkonna areng on olnud tihedalt seotud energia üha intensiivsema kasutusega. Kõige universaalsemaks, mugavamaks ja kvaliteetsemaks energiavormiks on tänapäeval elektrienergia.

Koos elektrienergia tootmisega elektrijaamades tekkis selle tarbijaile edastamise vajadus. Ehitati esimesed alalisvooluelektriliinid. Vahelduvvool, millega kaasneb pinge transformeerimise võimalus, võeti kasutusele hiljem.

Esimene kolmefaasiline vahelduvvoolu kõrgepingeliin (15 kV) rajati Saksamaal 1891. a. Sellest alates kuni tänaseni on kogu maailmas jätkunud kolmefaasilise vahelduvvoolusüsteemi võidukäik. Kasutusele on võetud üha kõrgemaid pingeid üha suuremate võimsuste ülekandmiseks järjest kaugema maa taha. Ainult väga suurte kauguste puhul, sõltumatu sagedusega elektrisüsteemide ühendamiseks või mereliinide puhul on viimasel ajal vahelduvvooluliinidega hakanud jälle konkureerima alalisvooluülekanded.

Esimene tööstuslik elektrijaam Eestis oli Kunda tsemenditehase elektrijaam võimsusega 200 kW (1893). Esimeseks üldkasutatavaks elektrijaamaks Eestis ja kogu Baltikumis sai Pärnu elektrijaam (1907). Edasi rajati elektrijaamad Tallinnas, Tartus, Viljandis, Narvas jm.

Eesti esimene kõrgepingeliin (15 kV) Kunda–Rakvere (16,5 km) hakkas tööle 1918. Enne seda olid ainult Tallinnas kasutusel 3 kV kaabelliinid. Aastat 1918 loetakse Eesti elektrisüsteemi alguseks.

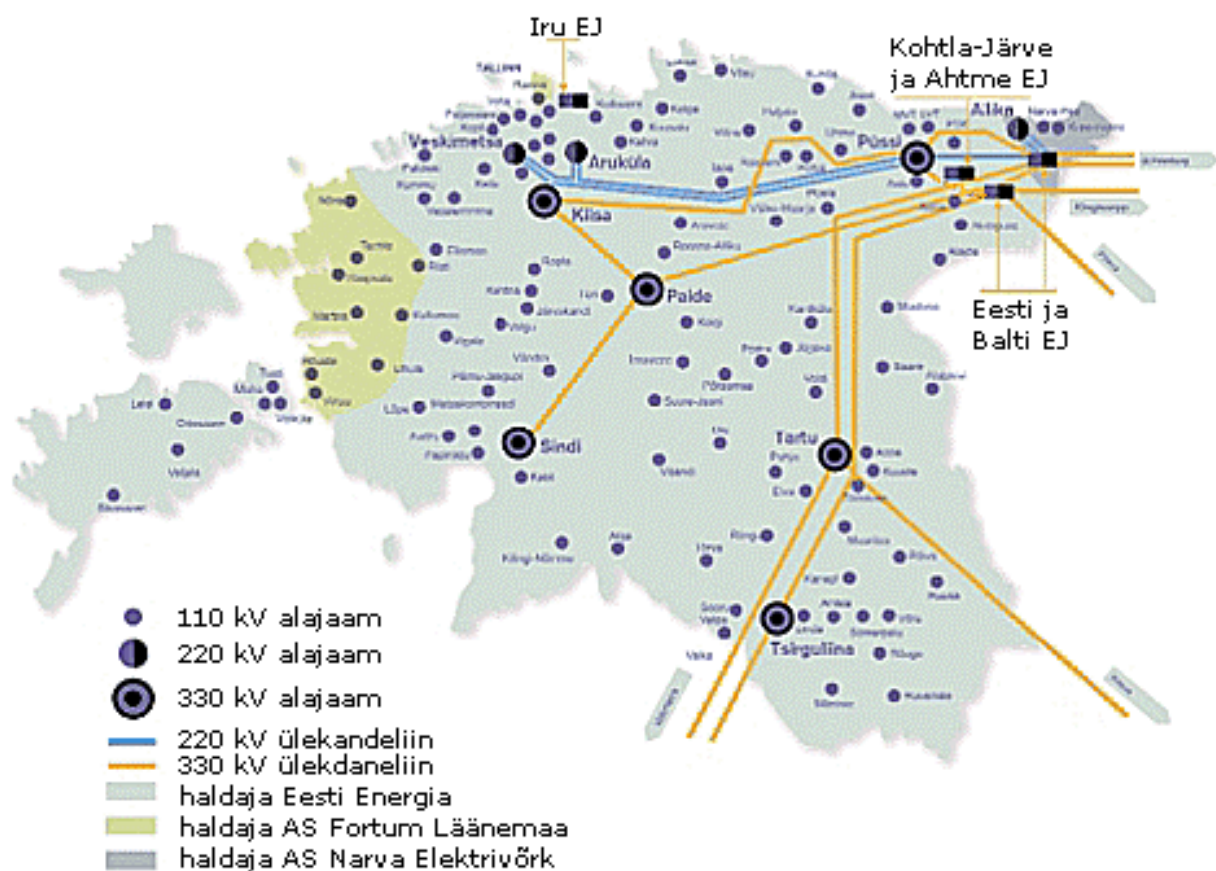
Koos suuremate elektrijaamade rajamisega Tallinnas, Ellamaal, Ulilas, Narvas ja Püssis võeti kasutusele ka kõrgemad liinipinged: 35 kV (Ellamaa–Tallinn, 1924) ja 55 kV (Narva–Kiviõli, 1931). Algas Eesti elektrisüsteemi ja elektrivõrkude plaanipärane areng.

1939. a moodustati Eesti Elektrikeskus, mida loetakse “Eesti Energia” alguseks. Põlevkivi suurenergeetika algas 50ndatel aastatel Kohtla-Järve ja Ahtme soojus-
elektrijaamaga ning Ahtme–Tallinna ja Ahtme–Narva 110 kV elektriliiniga.

1955 käikulastud Narva hüdroelektrijaam jäi Leningradi elektrisüsteemi käsutusse.

Eesti suuremad elektrijaamad – Balti (1435 MW) ja Eesti (1610 MW) soojuselektrijaam – rajati 1956...1973. Aastal 1974 alustati Iru soojuselektrijaama ehitust, mille projektvõimsuseks kavandati 410 MW. Mitu vanemat elektrijaama on tänaseks töö juba lõpetanud.

Praegu on elektrienergia edastamiseks tarbijaile ja Eesti energiasüsteemi ühendamiseks naabersüsteemidega olemas suhteliselt hästi välja arendatud elektrivõrk. Põhivõrgu moodustavad 330, 220 ja 110 kV elektriülekanaliinid ning alajaamad (jn 1.2).



Joonis 1.2 Eesti elektrisüsteem

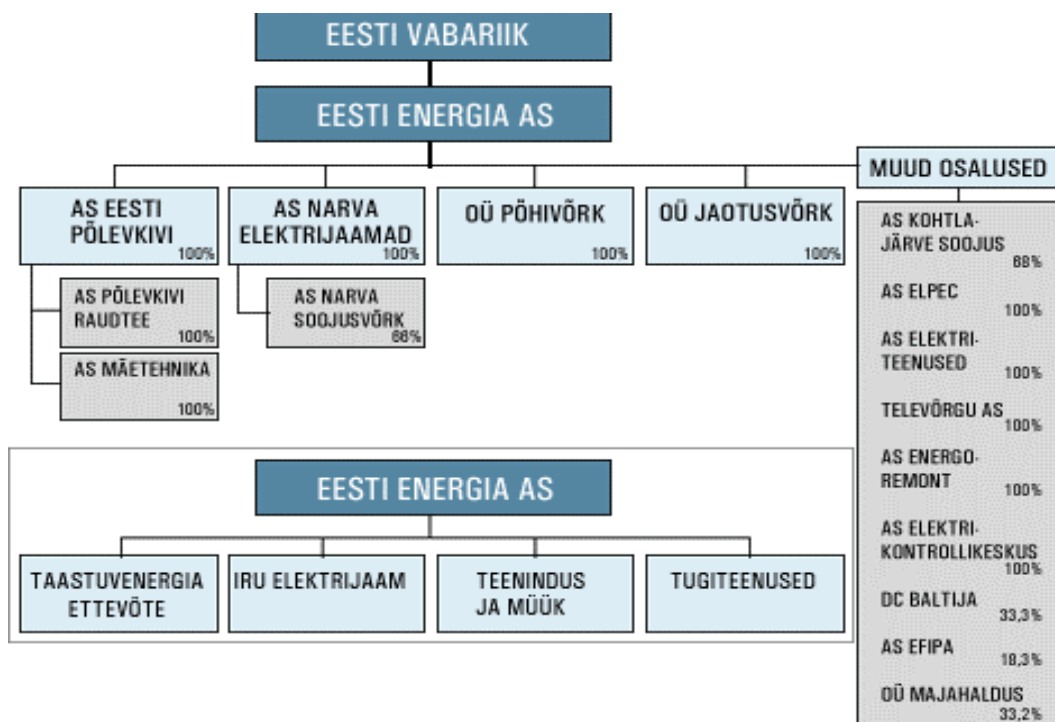
Põhivõrk vastutab Eesti elektrisüsteemi töökindla toimimise eest, et tagada pidev elektrienergia ülekanne tootjalt tarbijatele. Põhivõrk koosneb 137 alajaamast ja ca 5100 km ülekanaliinidest pingetel 110-330 kV. Põhivõrgule kuuluvad ka Eestit naaberriikide elektrisüsteemidega ühendavad elektriliinid. Põhivõrgu koosseisus olev elektrisüsteemi juhtimiskeskus hoiab võimsus-

bilanssi ja juhib reaajas elektrisüsteemi. Eesti põhivõrk on suhteliselt tihe, arvukate suletud kontuuridega.

Jaotusvõrgu põhiülesandeks on klientide liitmine elektrivõrguga ning nende elektrivarustuse tagamine.

Jaotusvõrkudes kasutatakse pingeid 35, 20, 15, 10 ja 6 kV ning madalpingena peamiselt 220/380 V.

Kokku on jaotusvõrgul ca 53 000 km õhuliine ja üle 6000 km kaabelliine.



<http://www.energia.ee>

Joonis 1.3 Eesti elektrisüsteemi struktuur

1.3 NIMIPINGED

Nimipingeks nimetatakse pinget, millele elektriseade või elektrivõrk on ette nähtud ja millega teda määratletakse või iseloomustatakse. Tegelik töö- ehk **talitluspinge** võib nimipingest erineda lubatud piirides.

Elektrisüsteemi kõik elemendid (masinad, seadmed, aparaadid) projekteeritakse optimaalselt talitlema nimipingel. Ka elementide karakteristikud antakse nimipingele. Elektrimasinate, -seadmete ja -aparatuuri seeriaviisilise tootmise huvides on nimipinged standarditud.

Tänapäeval leiavad üha laiemalt tunnustust rahvusvahelised IEC (*International Electrotechnical Commission*) standardid. IEC-standardid on soovituslikud.

Kui Eesti madalpingesüsteemi ($U \leq 1000$ V) nimipingeteks oli seni endise NSVL-i standardi kohaselt 220/380 ja 380/660 V, siis IEC-standardi kohaselt on nimipinged 230/400 ja 400/690 V. Praegu toimub nende üleminen.

Eesti kõrgepingevõrkudes vastavad seni kasutatavatest nimipingetest IEC-standarditele nimipinged 10, 20, 35, 110 ja 220 kV. Pinged 6 ja 15 kV on küll standardsed, kuid perspektiivis üldjuhul mittesoovitavad.

Kõrgemate pingete puhul ei kasutata IEC kohaselt enam nimipinge, vaid **suurima lubatava kestevpinge** mõistet. Soovitatakse võrkude standardseid suurimaid lubatavaid kestevpingeid 420, 525, 765 ja 1200 kV. Tulevikus rajatavate uute võrkude jaoks loetakse mittesoovitavaks ka praegu standardset suurimat lubatavat kestevpinget 363 kV, mis vastab meil kasutatavale nimipingele 330 kV (p 1.4, tabel 1.1).

Arvestades takistustest tingitud pingekadusid elektrisüsteemi elementides ja tarbijate koormuse ajalisi muutusi, pole võrgu kõikides punktides võimalik kindlustada täpselt nimipingega võrdset talitluspinget. Seega erinevad elektrisüsteemi elementide, sealhulgas ka tarbijate tegelikud talitluspinged mõningal määral nimipingest. Standarditega normeeritakse ka talitluspinge **lubatud maksimaalsed hälbed (kõrvalekalded)** nimipingest tarbijate liitumispunktides. **Liitumispunkti**ks nimetatakse elektrivõrgu punkti, millest tarbijat varustatakse elektrienergiaga.

Selleks et tagada tarbijaile keskmiselt nimipingele võimalikult lähedast talitluspinget, peaksid võrgu toiteallikate (elektrijaamad või toitealajaamade trafode sekundaarmähised) talitluspinged olema võrgu nimipingest veidi kõrgemad. Majanduslikult peetakse otstarbekaks, et generaatorite nimipinge oleks 5% ja trafode sekundaarmähiste nimipinge 5 või 10% kõrgem nende poolt toidetava elektrivõrgu nimipingest. Nii võib olla generaatori nimipingeks näiteks 10,5 kV, 10 kV võrku toitva trafo sekundaarmähise nimipingeks aga 10,5 või 11 kV.

Mida suurem on võrgus edastatav võimsus ja elektrienergia edastamiskaugus, seda kõrgem peaks keskmiselt olema võrgu nimipinge. Selles on kerge veenduda, kui analüüsida võimsuse ja võimsuskao avaldise (p 1.7). Mida kõrgem on pinge, seda suurem on võrgu läbilaskevõime ja seda väiksemad on võimsuskaod.

1.4 ELEKTRIVÕRKUDE LIIGITUS

Elektrivõrguks nimetatakse elektrisüsteemi kogu ühendvõrku või ka selle osa, tihti aga mingi piirkonna ühe nimipingega osa. Seetõttu tuleb vaadelda väga erineva struktuuri, otstarbe ja nimipingega võrke. Sellest tuleneb ka praktiline vajadus liigitada elektrivõrke olulisemate tunnuste alusel, olgugi et üldtunnustatud ja ranget süsteemi siin alati pole.

Vastavalt vooluliigile jaotatakse võrgud **vahelduv-** ja **alalisvooluvõrkudeks**. Tavalisemaks vooluliigiks elektroenergeetikas on vahelduvvool.

Nimipinge alusel liigitatakse võrke **madal-, kesk-, kõrge-** ja **ülikõrgepingevõrkudeks**. Eesti nimipingetele vastav liigitus on toodud tabelis 1.1.

Soomes ja Lätis on keskpingevõrkudes kasutusel nimipinge 20 kV. Meil tuleks kaaluda 20 kV kasutuselevõttu tulevikus.

Ohutusnõuetest lähtudes liigitatakse võrke nimipinge järgi ka **madalpingevõrkudeks** ($U_N \leq 1000 \text{ V}$) ja **kõrgepingevõrkudeks** ($U_N > 1 \text{ kV}$).

Otstarbe järgi liigitatakse võrke **süsteemi-, ülekande-** ja **jaotusvõrkudeks**.

Tabel 1.1 Eesti elektrivõrkude nimipinged

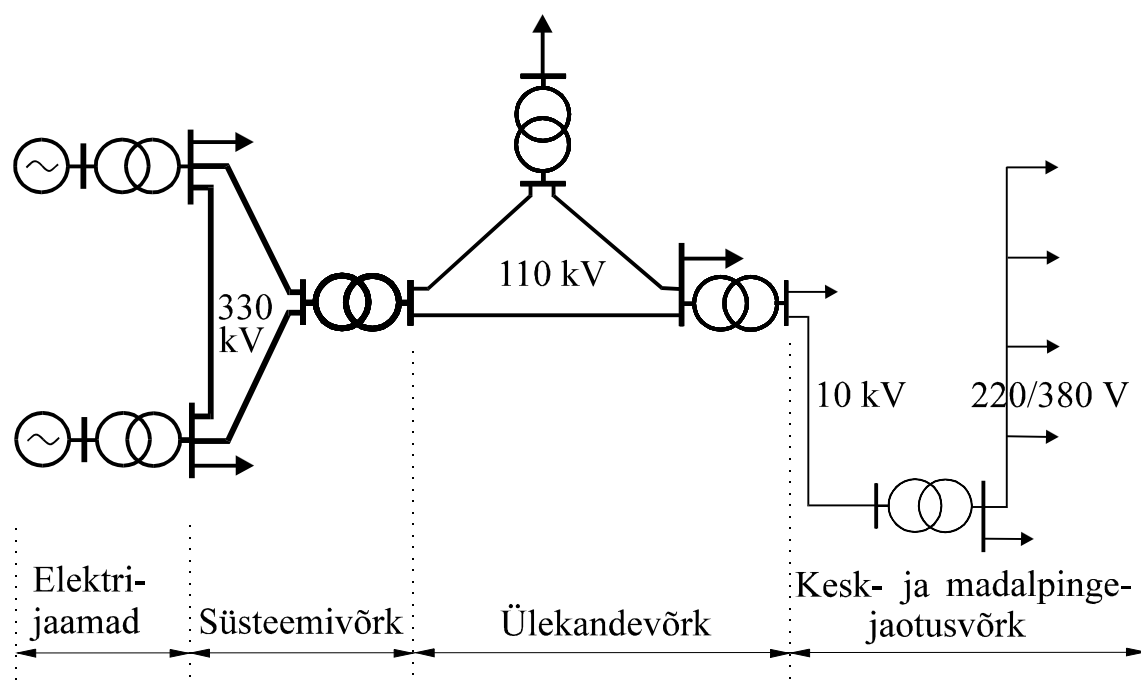
Elektrivõrgu liik	Eesti võrkude nimipinged U_N kV	Suurim lubatav kestevpinge IEC järgi U_M kV
Madalpingevõrgud	220/380 → 230/400 V 380/660 → 400/690 V	
Keskpingevõrgud	6 10 15 20 35	7,2 12,0 17,5 24,0 40,5
Kõrgepingevõrgud	110 220	123,0 245,0
Ülikõrgepingevõrgud	330	363,0

Võrkude liigitamine otstarbe järgi on võrdlemisi tinglik. Süsteemivõrkude all mõeldakse tähtsamaid ülikõrgepingevõrke, mis ühendavad elektrisüsteeme ja suuremaid elektrijaamu. Ülekandevõrgud ($U = 110...220 \text{ kV}$) edastavad elektrienergiat suurematesse alajaamadesse, kus toimub elektrienergia jaotamine ning edastamine tarbijatele läbi jaotusvõrkude ($U_N \leq 35 \text{ kV}$). Kasutatakse ka mõistet **põhivõrk**, mille all tavaliselt mõeldakse süsteemivõrku koos ülekandevõrgu olulisema osaga.

Jaotusvõrke liigitatakse tarbijate järgi **tööstus-, linna- ja maavõrkudeks**.

Konfiguratsiooni järgi liigitatakse võrke **suletud** ehk **silmusvõrkudeks** ja **avatud** ehk **radiaalvõrkudeks**. Tavaliselt on süsteemi- ja ülekandevõrgud silmusvõrgud (sisaldavad suletud kontuure). Sellised võrgud on küll kallimad, kuid kindlustavad elektrivarustuse suurema töökindluse. Jaotusvõrgud on konfiguratsioonilt tavaliselt hargnevad radiaalvõrgud või avatuna talitlevad silmusvõrgud.

Joonisel 1.4 on näide mingi elektrisüsteemi osa lihtsustatud skeemist. Skeemil kujutatud nooled on üldistatud koormused (p 1.1), mis tähistavad väljuvate liinide, alajaamade või tarbijate koormusi.



Joonis 1.4 Elektrisüsteemi osa lihtsustatud skeem

1.5 ELEKTRIVÕRKUDELE ESITATAVAD NÕUDED

Elektrivõrgu põhiülesandeks on tarbijate ökonoomne ja töökindel varustamine kvaliteetse elektrienergiaga. Kui seejuures pidada silmas ka ohutust ja keskkonnakaitset, on võrkudele esitatavad põhinõuded juba formuleeritud. Neid nõudeid tuleb silmas pidada nii võrkude planeerimisel ja projekteerimisel kui ka käidus.

Ökonoomsus

Võrkude planeerimisel, projekteerimisel ja talitluse juhtimisel tuleb leida lahendusi, mis vastavad minimaalsetele kulutustele. Põhimõtteliselt võiks ökonoomsuse nõue haarata ka töökindlust, energia kvaliteeti ja isegi keskkonnakaitset. Kuna aga paljudele nähtustele ja suurustele vastavaid otseseid ja kaudseid kulutusi pole alati praktiliselt võimalik hinnata, võib neid optimeerimises ülesandes käsitleda kitsendustena näiteks lubatud piiride kujul.

Töökindlus

Töökindlus on nõue, mida vajalike lähteandmete (piisava avariistatistika, tarbijaile andmata jäänud energia hinna jm) olemasolul ning tülivate tõenäosusarvutuste tegemisel on võimalik osaliselt lugeda ökonoomsusnõude hulka kuuluvaks. Praktikas on tihti kasutatud lihtsamaid töökindluse nõudeid.

Elektrienergia kvaliteet

Elektrivõrk peab tagama tarbijaile nõuetele vastava elektrienergia kvaliteedi (pinge, kolmefaasilise pinge sümmeetrilisuse, siinuselisuse jm). Osaliselt sõltub kvaliteet ka tarbijaist.

Käidu ohutus ja mugavus

Elektrivõrgu ja selle elementide projekteerimisel ja rajamisel tuleb arvestada kõiki ohutusnõudeid ja ehituseeskirju. Lisaks sellele peetagu silmas ka käidu mugavust. Loomulikult tähendab see lisakulusid, millega tuleb arvestada.

Keskkonnakaitse

Kogu energeetika, sealhulgas elektrisüsteem, avaldab kahjulikku toimet keskkonnale. Elektrivõrgud kahjustavad keskkonda põhiliselt sellega, et hõivatud ehitistele ja rajatistele vajalikke maa-alasid (liinitrassid läbi metsade ja üle põldude, alajaamadele vajalikud maa-alad jm) ning elektriseadmed tekitavad elektromagnetvälju. Seetõttu tuleb täita keskkonnakaitse nõudeid, mis

puudutavad õhuliinitrasside keskkonnasäästlikku valikut, õhuliinide võimalikku asendamist kaabelliinidega jne.

Viimasel ajal tegeldakse palju elektriliinide ja teiste energeetikaobjektide ning maastiku arhitektuurilise sobitamisega, aga ka elektromagnetvälja mõju uurimisega elusloodusele, esmajärjekorras inimesele.

1.6 KOLMEFAASILINE SÜSTEEM JA NEUTRAALI MAANDAMINE

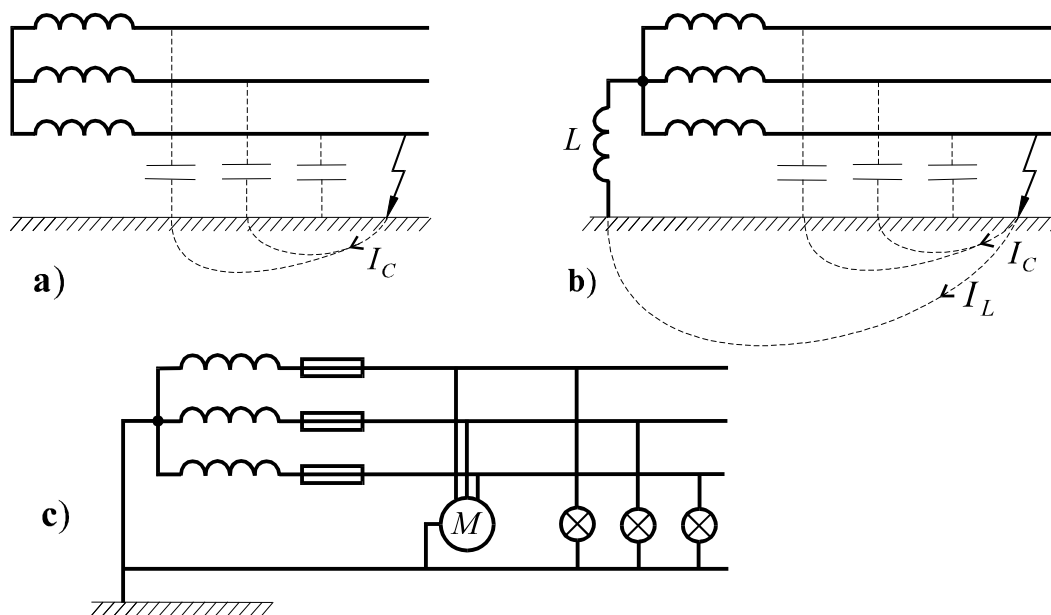
Tänapäeval kasutatakse elektroenergeetikas valdavalt kolmefaasilist vahelduvvoolu, mida peetakse kõige ökonoomsemaks. Nii näiteks on kolmefaasilises süsteemis sama metallikulu ja edastatava võimsuse puhul võimsuskaod 30% väiksemad kui ühefaasilises süsteemis.

Tavaliselt on kolmefaasiline liin kas kolme- või neljajuhiline (kolm faasijuhti ja neutraal- ehk nulljuht). Neljajuhilist süsteemi kasutatakse madalpingevõrkudes, et toita samast võrgust nii kolme- kui ka ühefaasilisi tarbijaid (jn 1.5c). Viimasel ajal on tarbijate madalpingevõrkudes hakanud levima ka viiejuhiline süsteem, kus häirekindluse tõstmiseks kasutatakse peale neutraaljuhi veel eraldi kaitsejuhti.

Kolmefaasilise süsteemi neutraal võib olla maast isoleeritud (**isoleeritud neutraaliga võrk**), vahetult maandatud (**jäikmaandatud neutraaliga võrk**) või maandatud läbi kompenseerimisreaktori ehk kaarekustutuspooli (**resonantsmaandatud neutraaliga võrk**).

Keskpingevõrgud on enamuses maast **isoleeritud neutraaliga** (jn 1.5a). Kõige tavalisema vigastuse, ühefaasilise lühise puhul võrgu mingis punktis tekib maaühendusvool läbi võrgu mahtuvuslike juhtivuste. Kuna keskpingevõrkudes eriti alla 35 kV õhuliinide puhul on mahtuvuslik juhtivus faaside ja maa vahel tavaliselt suhteliselt väike, on ka maaühendusvool I_C väike ning ei kujuta alati praktilist ohtu. Seetõttu pole vigastatud liini kiire väljalülitamine meie praegustes võrkudes alati vajalik ning tarbijad võivad jääda tööle. Sageli on sellised maaühendused mööduva iseloomuga. Faasidevahelised pinged seejuures ei muutu ja maandamata faaside pinged maa suhtes saavad võrdseks liinipingega, s.o tõusevad umbes $\sqrt{3}$ -kordseks. Seda peab arvestama ja elektrivõrgu isolatsiooni vastavalt tugevdama.

Juhul kui maaühendusvool on siiski arvestatavalt suur (eriti 35 kV kaablite puhul), kasutatakse mahtvusliku maaühendusvoolu kompenseerimiseks neutraali maandamist läbi kaarekustutuspooli (jn 1.5b). Maaühenduse puhul kaasneb sellega induktiivse iseloomuga suletud kontuuri ja induktiivse maaühendusvoolu komponendi I_L teke, mis suurelt osalt kompenseerib maaühendusvoolu mahtvusliku komponendi I_C .



Joonis 1.5 Kolmefaasilise süsteemi neutraali maandus:

- a) isoleeritud neutraal; b) resonantsmaandatud neutraal;
 b) c) jääkmaandatud neutraaliga madalpingevõrk
 c)

Selline maaühendus **resonantsmaandatud neutraaliga** võrgus pole tavaliselt enam ohtlik, see võib iseenesest mööduda ega vaja alati tingimata kiiret väljalülitamist.

Kõrgepingevõrkudes ($U \geq 110$ kV) oleksid isoleeritud neutraali puhul tingituna suhteliselt suurtest mahtvuslikest juhtivustest ja kõrgest pingest maaühendusvoolud juba nii suured, et vajaksid kohest väljalülitamist. Releekaitse kindlama töö huvides tehakse sellised võrgud **jääkmaandatud neutraaliga**. Sel juhul on ühefaasilise lühise vool maaühenduse kohas suur, kuna tekib suletud kontuur väga väikese takistusega. Mahtvuslikud voolud on sellega võrreldes väikesed.

Jäikmaandatud neutraaliga võrgus ei teki ühe faasi maanduse puhul teiste faaside pingete ohtlikku tõusu.

Madalpingevõrkudes on pikemat aega eelistatud neljajuhulist jäikmaandatud neutraaliga süsteemi (jn 1.5c). Paiguti on veel säilinud vana maast isoleeritud kolmnurklülituses kolmejuhiline madalpingevõrk (220 V), kus ühe faasi maaühenduse puhul väljalülitamist ei toimu ja teiste faaside pinged maa suhtes tõusevad.

Elektrivõrgu neutraali maandusviis ei mõjuta kolmefaasilise võrgu sümmeetrilist talitlust ega ka vastavaid arvutusi, kuna kolme faasi voolude summa neutraalis on sümmeetrilisel talitlusel null. Kuna käesolevas kursuses piirduakse võrkude sümmeetrilise talitluse vaatlemise ja arvutamisega, ei ole neutraali maandusviis edaspidi oluline.

1.7 PÕHISUURUSED JA LÄHTEVALEMID

Elektrisüsteemide ja -võrkude käsitlemisel puututakse kokku võrgu elementide iseloomustavate suuruste ehk (elemendi)**parameetritega** (takistused, juhtivused jm), mida võib praktikas tavaliselt lugeda konstantseteks. Elektrisüsteemide ja -võrkude **talitlust** või **seisundit** talitluse mingil ajahetkel iseloomustavaid suurusi (pinged, voolud, võimsused jm) võib nimetada **seisundiparameetriteks** ehk **seisundimuutujateks**.

Tabelis 1.2 on tähtsamate suuruste tähised ja mõõtühikud. Kõik kursuses antavad valemid on kasutatavad ilma täiendavate kordajateta (kümne astmete kujul kui tabeli mõõtühikute kahest süsteemist kasutatakse järjekindlalt ainult üht.

Tähtsamad seosed tabelis 1.2 toodud suuruste vahel:

$$\begin{aligned} \underline{Z} &= R + jX & \underline{Y} &= G - jB & \underline{S} &= \underline{U}\underline{I}^* = P + jQ \\ P &= S \cos\varphi & Q &= S \sin\varphi & S &= \sqrt{P^2 + Q^2} \end{aligned}$$

Aseskeemides võib eristada piki- ja põikharusid. **Pikiharul** läbib talitlusvool \underline{I} ja tavaliselt kujutatakse seda takistusena \underline{Z} . Sel juhul leitakse pingelang ja võimsuskadu valemitega

$$\Delta \underline{U} = \underline{Z}\underline{I} \quad \Delta \underline{S} = \Delta \underline{U}\underline{I}^* = \underline{I}^2 \underline{Z} = \underline{I}^2 R + j\underline{I}^2 X = \Delta P + j\Delta Q$$

Tabel 1.2 Põhisuurused ja mõõtühikud

Suurus	Tähis	Mõõtühik	Suurenergeetikas sobiv mõõtühik
Näivtakistus	Z	Ω	Ω
Aktiivtakistus	R	Ω	Ω
Reaktiivtakistus	X	Ω	Ω
Näivjuhtivus	Y	S	S
Aktiivjuhtivus	G	S	S
Reaktiivjuhtivus	B	S	S
Pinge	U	V	kV
Vool	I	A	kA
Näivvõimsus	S	VA	MVA
Aktiivvõimsus	P	W	MW
Reaktiivvõimsus	Q	var	Mvar
Energia	W	Wh	MWh

Põikharule on rakendatud talitluspinge \underline{U} ja seda kujutatakse tavaliselt juhtivusena \underline{Y} . Sel juhul on vool Ohmi seaduse kohaselt

$$\underline{I} = \underline{Y}\underline{U}$$

ning võimsuskadu

$$\Delta S = \underline{U}\underline{I}^* = U^2 \underline{Y}^* = U^2 G + jU^2 B = \Delta P + j\Delta Q$$

Neid ühefaasilise juhu jaoks saadud valemeid võib üldistada ka kolmeefaasilisele süsteemile (tabel 1.3), eeldades, et **kolmeefaasilise süsteemi puhul antakse elemendiparameetrid (takistused, juhtivused) alati ühe faasi kohta, võimsused ja võimsuskadod kolme faasi kohta ning pinge, pingelangu ja pingekao all mõistetakse faasidevahelisi suurusi.**

Tabelis 1.3 antud lihtsad ja üldtuntud seosed elemendiparameetrite ja seisundimuutujate vahel on suurel määral lähtevalemiteks kursuse ülejäänud valemite tuletamisel.

Tabel 1.3 Lähtevalimid

Suurus	1-faasiline süsteem	3-faasiline süsteem	Fiktiivne 3-faasiline süsteem $\underline{I} = \sqrt{3}\underline{I}_{teg}$
Võimsus $\underline{S} =$	\underline{UI}^*	$\sqrt{3}\underline{UI}^*$	\underline{UI}^*
Pingelang $\Delta\underline{U} =$	\underline{ZI}	$\sqrt{3}\underline{ZI}$	\underline{ZI}
Aktiivvõimsuskadu			
pikiharus $\Delta P =$	$I^2 R$	$3I^2 R$	$I^2 R$
põikharus $\Delta P =$	$U^2 G$	$U^2 G$	$U^2 G$
Reaktiivvõimsuskadu			
pikiharus $\Delta Q =$	$I^2 X$	$3I^2 X$	$I^2 X$
põikharus $\Delta Q =$	$U^2 B$	$U^2 B$	$U^2 B$

Tabeli viimases veerus on elektroenergeetikas vahel kasutatav põhivalemite süsteem, kus voolu all mõeldakse fiktiivset voolu $\underline{I} = \underline{I}_{fikt} = \sqrt{3}\underline{I}_{teg}$, mis on võetud $\sqrt{3}$ korda suurem tegelikust voolust. Tulemuseks on valemid, mis langevad kokku ühefaasilise süsteemi valemitega. Käesolevas elektrivõrkude kursuses seda süsteemi ei kasutata.

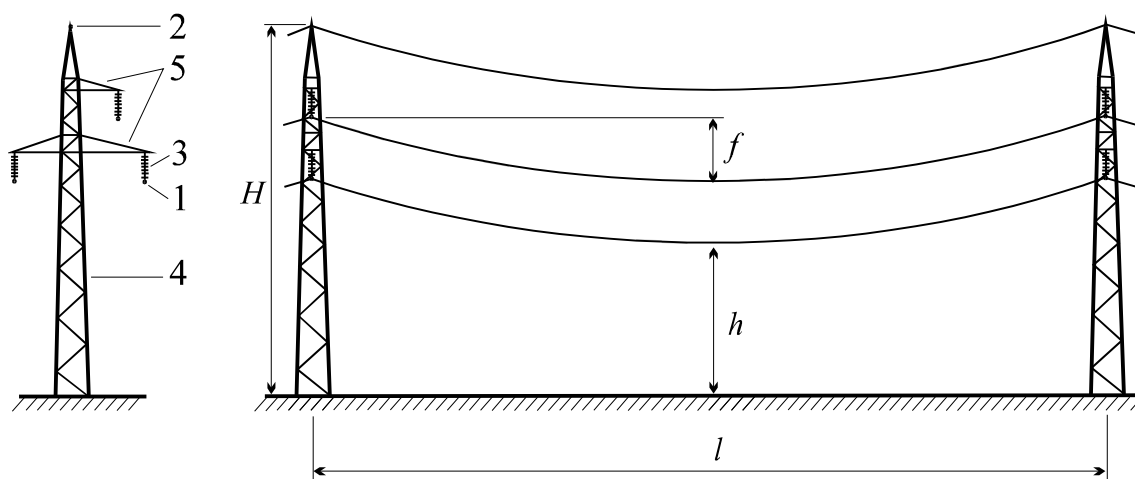
2 ELEKTRILIINIDE KONSTRUKTSIOON

2.1 ÕHULIINID

Elektrienergia ülekandmiseks ja jaotamiseks kasutatakse õhu- ja kaabelliine. Kui **kaabelliinide** kaablid on paigutatud maasse, vette, spetsiaalsetele kaabli-riiulitele jne, siis **õhuliinide** juhtmed on riputatud isolaatoritega mastidele või vastavatele tarinditele ning paiknevad õhus. **Paljasjuhtmetele** on siis põhi-isolatsiooniks õhk. Vahel kasutatakse õhuliinide puhul ka isoleeritud juhtmeid või õhukaableid.

Õhuliinid peavad vastu pidama omakaalust, tuulest ja jäitest põhjustatud mehaanilistele koormustele, temperatuuri muutusele ja mitmesugustele keemilistele mõjutustele. Arvestada tuleb ka tuule dünaamilist mõju, mis põhjustab **juhtmete vibratsiooni** ja vahel ka **hüplemist**.

Tavaliselt koosneb õhuliin (jn 2.1) juhtmetest (1), ühest või mitmest **piksekaitsejuhtmest** ehk **kaitsetrossist** (2), mastidest, isolaatoritest (3) ja **liinitarvikutest** ehk **liiniarmatuurist**. Masti põhiosadeks võivad olla **tüves** ehk **püstik** (4), **traaversid** (5) ja **vundamendid** või **jalandid**.



Joonis 2.1 Õhuliini põhielemendid

Piksekaitsetrossi kasutatakse üldjuhul metall- ja raudbetoonmastidega kõrgema pingega liinidel kogu ulatuses, madalama pingega või puitmastidega kõrgepingeliinidel aga ainult alajaamade juures paari kilomeetri ulatuses.

Õhuliinid võivad olla **ühe-** või **mitmeahelalised**. Eestis kasutatakse tavaliselt ühe- ja kaheahelalisi liine. Kolmefaasilise liini üks **ahel** koosneb kõigi kolme faasi juhtmetest. **Mitmeahelalise** liini ahelad riputatakse ühistele mastidele.

Õhuliini kahe naabermasti vahelist lõiku nimetatakse liini **visanguks** (jn 2.1). Õhuliini tähtsamad mõõtmed on **visangu pikkus** l , **juhtmete riipe** f , **liini maagabariit** (juhtmete minimaalkõrgus maapinnast) h , masti kõrgus H , isolaatorketi pikkus, faasidevahelised kaugused jm. Need parameetrid määratakse liini projekteerimisel, lähtudes liini pingest, juhtme margist, kohalikest tingimustest, kehtivatest normidest jm. Tabelis 2.1 on toodud orienteerivaid mõõtmeid või keskmisi andmeid paljasjuhtmetega kõrgepingeõhuliinide kohta.

Tabel 2.1 Kõrgepingeõhuliinid

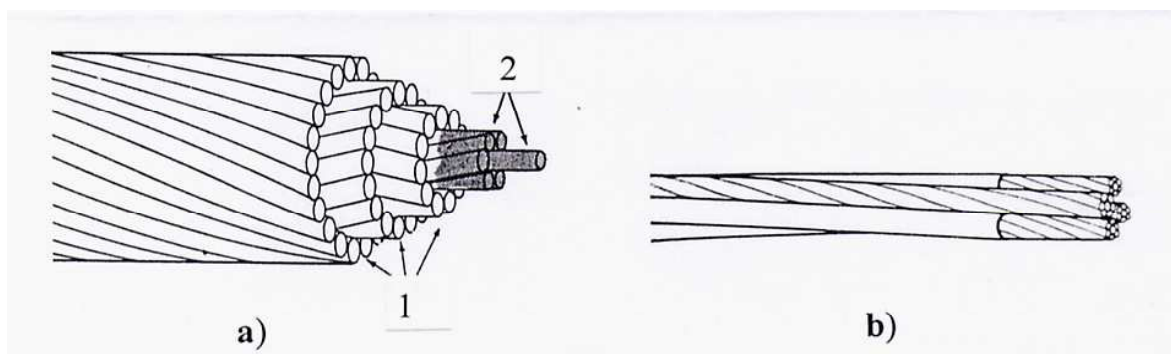
Mõõtmed m	Õhuliini nimipinge kV		
	110	220	330
Visangu pikkus	170...250	250...350	300...400
Faasidevaheline vähim lubatud kaugus rõhtpaigutusel	3,0...4,5	4,2...5,5	5,5...6,5
Vähim lubatud maagabariit:			
raskesti juurdepääsetaval alal	5	6	6,5
hoonestamata alal	6	7	7,5
hoonestatud alal	7	8	8,5

2.2 ÕHULIINIDE JUHTMED

Enamuses kasutatakse õhuliinidel isolatsioonkatteta nn **paljasjuhtmeid**. Juhtme materjal peaks olema hea elektrijuhtivusega, suure mehaanilise tugevusega, vastupidav keemilisele toimele ning odav. Kuna ükski tavaline juhtmematerjal (vask, alumiinium, alumiiniumisulamid, teras) kõigile tingimustele ei vasta, otsitakse kompromisslahendusi. Tänapäeval on õhuliinide voolujuhtivaks metalliks tavaliselt alumiinium, mida sageli tugevdatakse terasega.

Konstruksioonilt on enam levinud traatidest kihiti kokkukeerutatud painduvad ja töökindlad **kõisjuhtmed**, mitte aga **traat-** ehk **massiivjuhtmed**. Kui jao-

tusvõrkudes kasutatakse ka alumiiniumist köisjuhtmeid, siis põhivõrkudes tavaliselt ainult alumiiniumist ja terasest kombineeritud **terasalumiinium-** ehk **teraljuhtmeid**, mis on ümber galvaniseeritud teraskiududest südamiku punutud ühest või mitmest alumiiniumkiudude kihist koosnevad kombineeritud juhtmed (jn 2.2a). Valmistatakse mitmesuguseid teraljuhtme tüüpe (alumiiniumi-terase ristlõike erineva suhtega, korrosioonikindlaid jne).



Joonis 2.2 Õhuliini juhtmed: a) teraljuhe (1 – alumiinium, 2 – teras);
b) keerutatud õhukaabel

Kuigi juhtmed on standarditud, on maailmas juhtmemarkide arv suur. N Liidu standardites tähistas näiteks A alumiiniumi, AC terasalumiiniumi ning sellele järgnev esimene number alumiiniumi ja teine terase ristlõikeid ruutmillimeetrites. Tabelis 2.1 on valik tavalisematest teraljuhtmetest, mis on kasutusel Eesti ja naaberriikide kesk- ning kõrgepingevõrkudes. Tabelis on antud ka juhtme kilomeetri aktiivtakistus r ja maksimaalselt lubatud kestevvool I_{\max} .

Kõrgematel pingetel ($U_N \geq 110$ kV) tuleb arvestada õhu ioniseerumist juhtmete pinna läheduses (koroonat), millega võivad kaasnedä märgatavad energiakaod ja raadiohäired. **Koroonat** põhjustava elektrivälja tugevuse vähendamiseks peab 110 kV liinidel kasutama suuremaid ristlõikeid (vähemalt AC 70). Veelgi kõrgematel pingetel lõhestatakse liini faasijuhid kaheks või enamaks osajuhtmeks vahekaugusega 25...45 cm. **Lõhisfaasijuhi osajuhtmed** on kindla vahemaa tagant omavahel fikseeritud **distantsi-** ehk **vahehoidikutega**. Faasijuhtide lõhestamine vähendab juhtmete pinnal elektrivälja tugevust ning seega ka koroonakadusid ja raadiohäireid. Lõhisfaasidel on väiksem induktiivtakistus, mis suurendab liinide läbilaskevõimet. Eestis on 330 kV liinide faasijuhid lõhestatud enamuses kaheks osajuhtmeks.

Tabel 2.1 Teraljuhtmeid

Eestis tavalised			Soomes		
Juhe mm ²	r Ω/km	I_{\max} A	Juhe mm ²	r Ω/km	I_{\max} A
AC 35/6	0,86	175	Sparrow 34/6	0,85	210
AC 50/8	0,59	210	Raven 54/9	0,54	280
AC 70/11	0,42	265	Pigeon 85/14	0,34	360
AC 95/16	0,31	330	Suursavo 106/25	0,27	430
AC 120/19	0,25	390	Al 132 132	0,22	495
AC 150/24	0,20	450	Ostrich 152/25	0,19	550
AC 185/29	0,16	510			
AC 240/39	0,12	610	Al 236 236	0,12	720
AC 300/48	0,10	690	Duck 305/39	0,09	
AC 400/51	0,08	825			
AC 500/64	0,06	945	Finch 565/72	0,05	

Piksekaitsetrossideks on tavaliselt **terasköisjuhtmed** ehk **terastrossid**.

Tänapäeval on õhuliinide keskkonnasõbralikkuse ja töökindluse tõstmiseks hakatud kasutama ka plastisolatsioonkattega juhte. Eestis on tuntumad Soome madalpingevõrkudes laialdaselt kasutatavad isoleerkattega juhid ehk **keerutatud õhukaablid** (AMKA). Need koosnevad mehaaniliselt tugevamast alumiiniumisulamist paljaskandepuhtmest ja selle ümber keerutatud isolatsioonkattega alumiinium-faasijuhtidest (jn 2.2b). Kandejuhe on ühtlasi neutraaljuhiks. Ka keskpingevõrkude tarbeks on välja töötatud isoleerkattega juhtmeid, kus faasijuhe on kaetud plastisolatsiooniga sellise arvestusega, et liini faaside omavaheline lühiajaline kokkupuude või kontakt näiteks puudega poleks ohtlik.

2.3 ÕHULIINIDE MASTID

Õhuliini juhtmete ülevaheldamiseks kasutatakse põhiliselt **kandemaste**, mis moodustavad keskmiselt 80...90% mastide koguarvust. Lisaks kandemastidele

kasutatakse liinis suuremate pikisuunaliste jõudude vastuvõtmiseks tugevdatud maste – **ankrumaste**, millele juhtmed on kinnitatud isolaatorpingutuskettide abil. Samuti on tugevdatud ja mitmesuguse konstruktsiooniga **nurgamastid** (paiknevad liini suuna märgatava muutuse punktides), **lõpumastid** (paiknevad liini alguses ja lõpus ning on projekteeritud töötamiseks juhtmete ühepoolsele tõmbele), **üleviigumastid** (kohtades, kus liin ületab rajatisi või takistusi), **harumastid** (liinide hargnemiskohtades) ja **transpositsioonimastid** (faasijuhtmete omavahelise paigutuse muutmiseks).

Mastimaterjaliks kasutatakse tavaliselt puitu, terast ja raudbetooni, harvemini alumiiniumi või armeeritud plastmassi. Metsarikastes piirkondades on puit suhteliselt odav, kuid ta tööiga on lühike. Seetõttu immutatakse puitu anti-septikutega. Raudbetoonmastidel on küll pikk tööiga, kuid nad on haprad. Sellele vaatamata on nad meil laialt levinud. Alumiinium- ja plastmastid on kallid ning neid kasutatakse vaid eriolukordades. Kõrgematel pingetel on parimad siiski terasmastid, mida tuleb korrosioonikaitseks värvida või tsinkida.

Mastide konstruktsioon võib olla väga mitmesugune sõltuvalt liini ahelate arvust, masti funktsioonist, materjalist, liini nimipingest jm. Tihti kasutatakse mastide stabiilsuse tõstmiseks **tõmmitsaid**. Meie tavalisemate liinimastide konstruktsiooninäiteid on toodud joonisel 2.3.

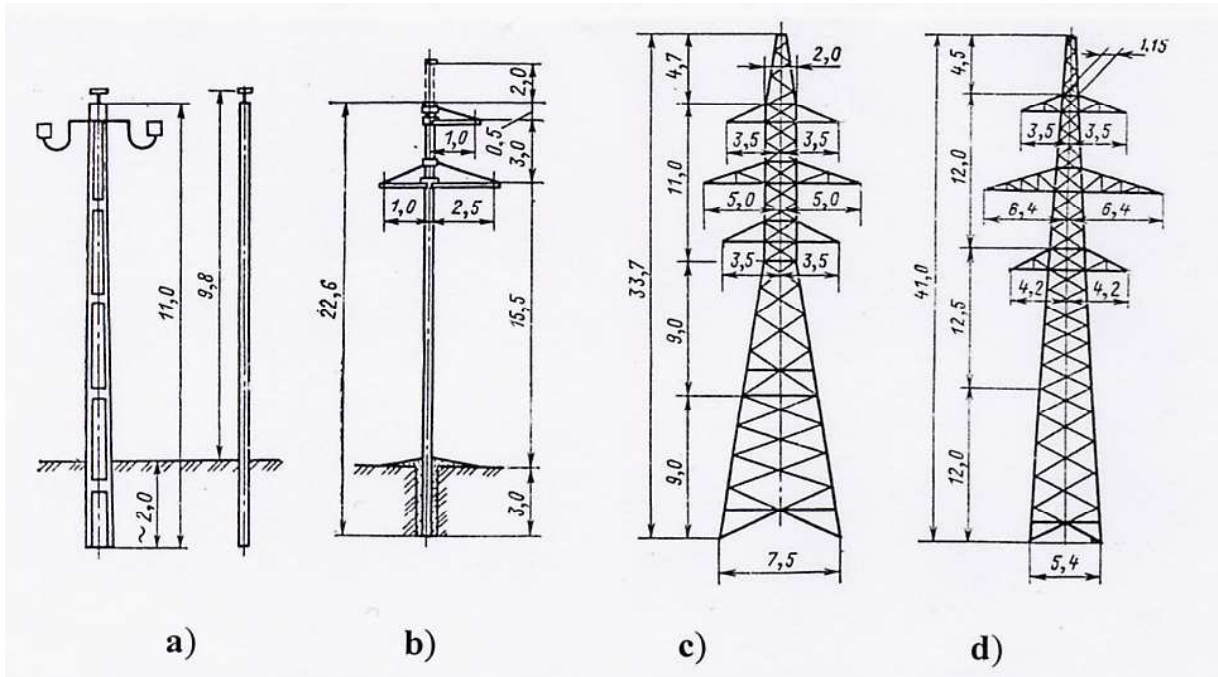
2.4 ÕHULIINIDE ISOLAATORID JA TARVIKUD

Isolaatorid

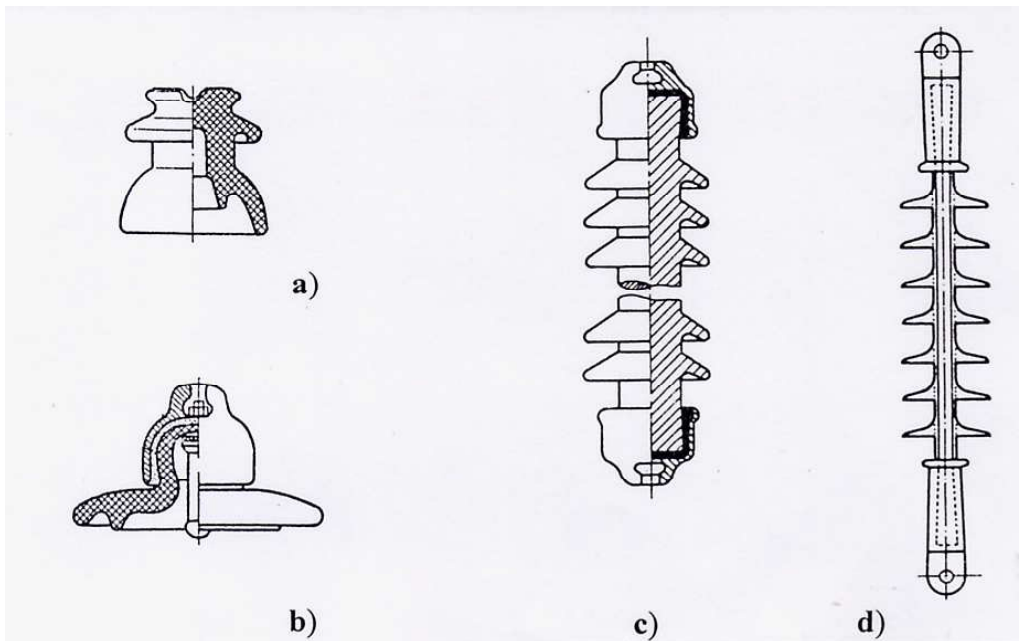
Õhuliini juhtmed isoleeritakse mastist isolaatoritega. Isolaatorimaterjaliks on tavaliselt portselan või klaas. Viimasel ajal on hakatud kasutama ka plastmassi.

Madalamate pingete puhul, kaasa arvatud väiksemate juhtmeristlõigetega 35 kV liinid, kasutatakse **liinitugiisolaatoreid**. Konstruktsioonilt võivad nad olla kas **tõirisolaatorid** (isoleeriv osa on ühendatud tugikonstruktsiooni küljest ülespoole suunatud ja jäigalt kinnitatud tõiri külge (jn 2.4a) või **varras-tugiisolaatorid** (isoleeriv osa on metalläärikuga jäigalt kinnitatud tugikonstruktsioonile).

Kõrgema pingega õhuliinidel, alates 35 kV, kasutatakse laialdaselt **taldrikisolaatoritest** (jn 2.4b) koosnevaid paindühenduses **isolaatorkette** (jn 2.5a,b). Taldrikisolaatorite arv ketis sõltub põhiliselt liini nimipingest, masti materjalist



Joonis 2.3 Õhuliini mastid: a) raudbetoonkandemast 6-10 kV; b) raudbetoon-kandemast 35 kV; c) kaheaahelaline metallankrumast 110 kV; d) kaheaahelaline metallkandemast 220 kV



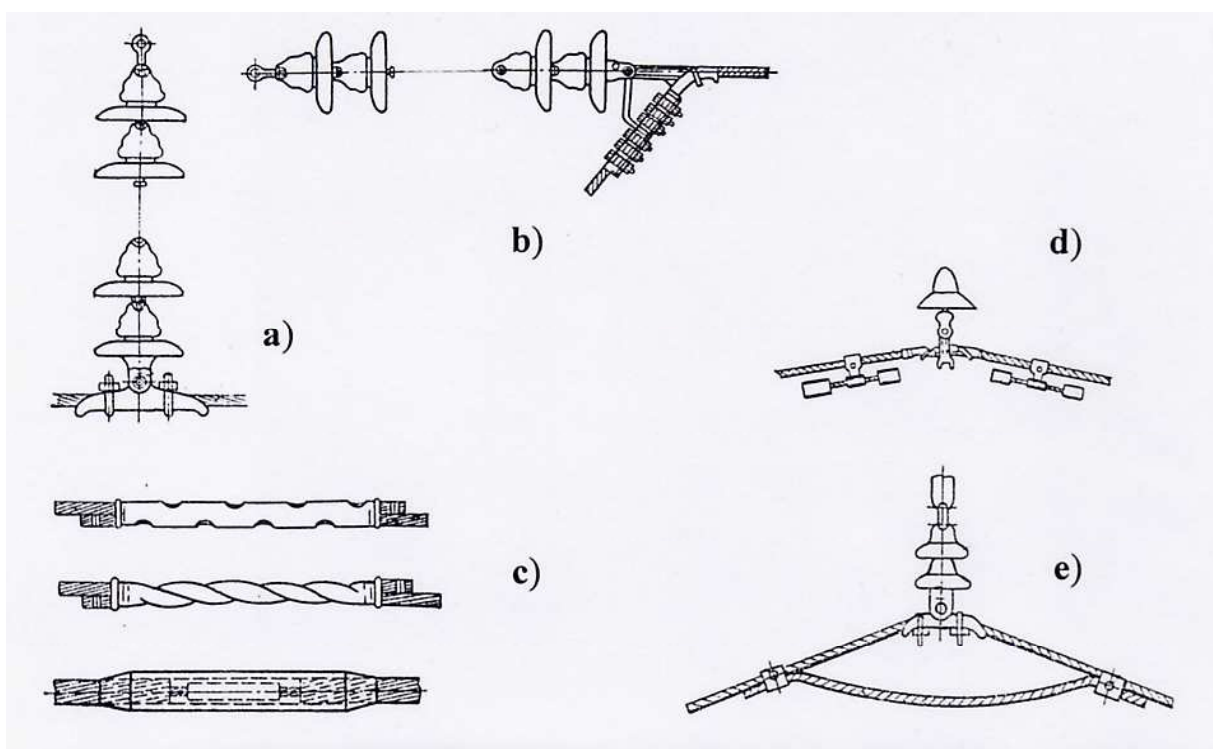
Joonis 2.4 Õhuliini isolaatorid: a) 6–10 kV tõrisolaator; b) taldrikisolaator; c) tavaline varrasrippisolaator; d) komposiitisolaator

ja tüübist (35 kV – 2...3 taldrikut; 110 kV – 6...8; 220 kV – 10...14; 330 kV – 14...20). Samaks otstarbeks kasutatakse ka jäiku **varrasrippisolaatoreid** (jn 2.4c). Viimasel ajal kasutatakse üha enam kombineeritud varrasrippisolaatoreid, nn **komposiitisolaatoreid** (jn 2.4d), milles põhiosa ehk isolaatori keha moodustab klaasplastist südamik, millele on monteeritud polümeerist seelikutega kate. Sellised isolaatorid on suhteliselt kerged ja mehaaniliselt vastupidavad.

Liinitarvikud

Liinitarvikute (varasem termin **liiniarmatuur**) hulka kuuluvad klemmid, vardad, konksud, sangad jms, mis on vajalikud juhtmete jätkamiseks, isolaatorite kinnitamiseks mastidele, juhtmete kinnitamiseks isolaatoritele, isolaatorketi kokkumonteerimiseks jne. Juhtmete kinnitamiseks kandemasti isolaatoritele kasutatakse **kandeklemme** (jn 2.5a), ankru- jm pingutusmastide puhul aga jäigemaid **pingutusklemme** (jn 2.5b).

Juhtmeid jätkatakse juhtmemargile vastavate **jätkuklemmidega** (jn 2.5c).



Joonis 2.5 Õhuliini armatuur: a) isolaatorkandekett kandeklemmiga; b) isolaatorpingutuskett juhtme pingutusklemmiga; c) juhtmete jätkuklemmid; d) vibratsioonisummutid; e) summutusaas

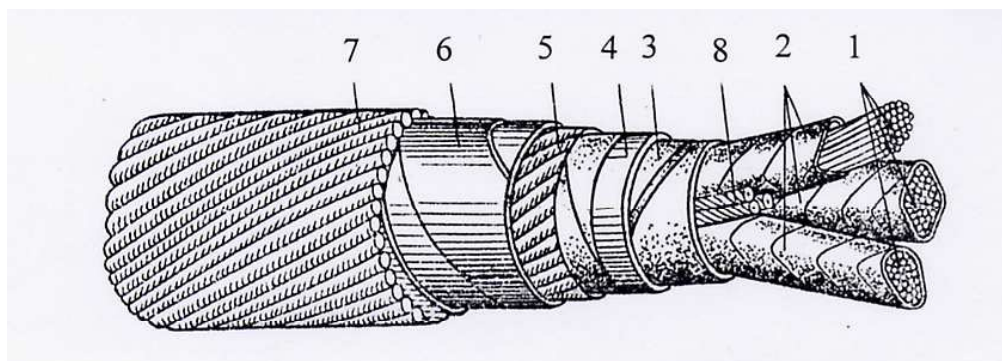
Liinitarvikute hulka kuuluvad ka juhtmete vibratsiooni summutavad **vibratsioonisummutid** ja **summutusaasad** (jn 2.5d, e) ning lõhisfaaside osa-juhtmete vahekaugusi fikseerivad **distantsihoidikud**.

2.5 KAABELLIINID

Linnades, tehaste ja energeetikaobjektide territooriumil jm on sageli otstarbekam kasutada elektrienergia edastamiseks kaabelliine. Kaablid paigutatakse seejuures maasse, tunnelitesse, torudesse, plokkidesse vm. Kaabelliinid nõuavad õhuliinidega võrreldes vähem ruumi, on välismõjude eest paremini kaitstud ning töökindlamad ja ohutumad. Nende puuduseks on aga suhteliselt kõrge hind.

Kaablid

Elektriliinide **jõukaablid** kujutavad endast juhte, kus niiskuse, korrosiooni ja mehaaniliste vigastuste kaitseks ette nähtud **mantli** sees on üks või mitu isoleeritud volujuhtivast materjalist **kaablisoont**. Lisaks mantlile võib kaablil olla veel täiendavaid kaitsekihte. Tegelikult võib kaabli konstruktsioon mitmesoonelise kaabli puhul olla üsna keerukas ja sõltub paljudest asjaoludest (nimipingest, soonte arvust, materjalist, kasutustingimustest jm). Joonisel 2.6 on toodud näitena laialdaselt kasutusel oleva 10 kV kolmesoonelise kaabli üks võimalik konstruktsioon.



Joonis 2.6 Kolmesooneline 10 kV paberisolatsiooniga kaabel:

1 – kaablisooned; 2 – sooneisolatsioon; 3 – vööisolatsioon; 4 – plii- või alumiiniummantel; 5 – polster; 6 – kaitsesoomus; 7 – välismantel; 8 – täidis

Kaablisoone moodustab isolatsiooni ja vajadusel ka ekraaniga kaetud juht, mis koosneb peenematest kokkukorrotatud alumiinium- või vasktraatidest. Madal-

pingekaablid on harilikult neljasoonelised, kõrgepingekaablid (kuni 35 kV) kolmesoonelised. Alates 110 kV on kaablid ühesoonelised.

Kaablihooded isoleeritakse õliga immutatud paberi või spetsiaalse kummi, viimasel ajal aga üha enam polümeeridega. Isolatsioonil on määrav tähtsus kaabli elueale.

Kaabli mantel kaitseb isolatsiooni niiskuse eest ja kindlustab hermeetilisuse. Mantli materjaliks võib olla plii, alumiinium, plastmass (polüetüleen) või ka kummi. Pliimantel on tavaliselt kaablitel, mida kasutatakse korrosiooniohtlikus keskkonnas ja vee all. Kaabli mantlit tuleb kaitsta mehaaniliste vigastuste eest. Selleks võidakse kasutada terasest või alumiiniumist **kaitseoomust**. Nii kaabli metallmantel kui ka kaitseoomus vajavad korrosioonitõrjeks omakorda **välismantlit**, milleks on tavaliselt bituumeniga immutatud kiudmaterjal või plastmass. Tuleohtlikes kohtades on nõutavad tulekindla välismantliga kaablid.

Kõrgematele pingetele valmistatakse ka **gaas-** ja **õlikaableid**, kus inertse gaasi või õli ülerõhk kaablis võimaldab oluliselt tõsta isoleermaterjalina kasutatava paberi isoleerivaid omadusi.

Kaabelliinide konstruktsioon

Kaablid paiknevad hoonete sees, väljas, maa all, vees, õhus. Seejuures tuleb arvestada ehitusnõudeid, kaabli jahutustingimusi jm.

Meie oludes on olnud üks tavalisemaid ja odavamaid mooduseid kaablite paigaldamine **kaablikraavidesse** ehk **tranšeedesse**. Kaabli vigastuste vältimiseks kaetatakse kraavi põhi sõelutud liiva või pinnasega, sellele asetatakse kaabel, mis kaetakse samuti pehme pinnase või liivaga ja kaitstakse pealt kaitseplokkide või tellistega. Pärast seda kraav täidetakse pinnast kihiti tihendades. Kaabelliinide ristumisel teede ja muude takistustega viiakse kaablid nende alt läbi, kasutades tavaliselt asbesttsement- või betoontorusid.

Suure hulga kaablite puhul paigaldatakse kaablid kollektorisse või tunnelisse. **Kollektorid** on ette nähtud mitmesuguste kaablite ja soojus- ning veetorude paigaldamiseks. **Tunneleis** on ainult jõu- ja sidekaablid. Väiksema hulga kaablite puhul kasutatakse **kaablikanaleid** ja **-plokke**.

Kaablite jätkamiseks kasutatakse **jätkumuhve** ja kaabli otstes **otsamuhve**, mis tagavad isolatsiooni, hermeetilisuse ja mehaanilise kaitse. Jätku- ja otsamuhvide konstruktsioon sõltub kaabli margist ja võib olla väga mitmesugune.