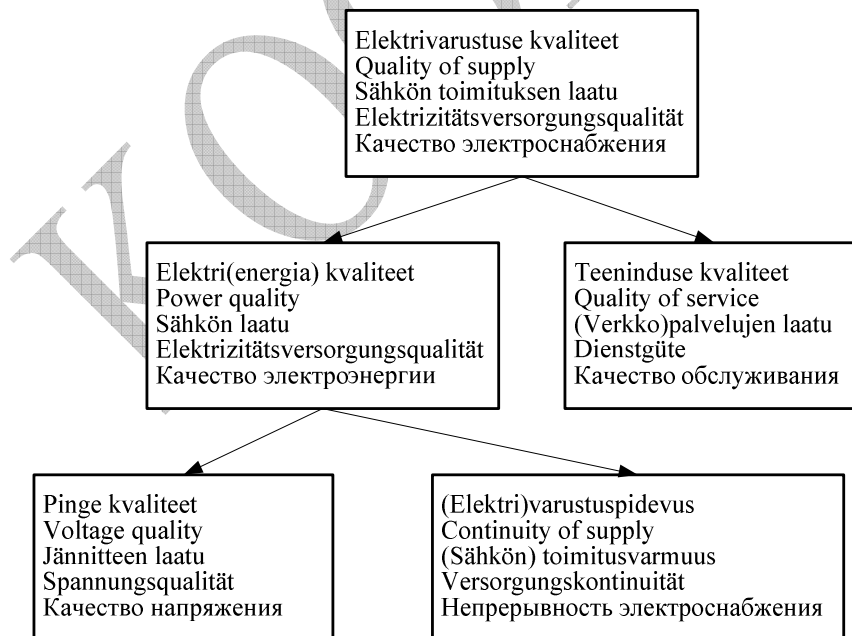


9 Elektri kvaliteet

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

9.1 Elektri kvaliteedi mõiste

Tarbijate elektrivarustusega tegelevad põhimõtteliselt erinevad ettevõtted – ühed edastavad, teised müüvad elektrienergiat. Tarbija olukorra tervikuna määrab elektrivarustuse kvaliteet, mis koosneb elektri kvaliteedist ja elektrienergia tarnimisega seotud teeninduse kvaliteedist (joonis 9.1). Jaotusvõrk peab tagama elektrivarustuse kvaliteedi, mis jaguneb omakorda pinge kvaliteediks ja toitekatkestustega seotud elektrivarustuspidevuseks. Tähelepanu vajab ka elektri tootmise kvaliteet.



Joonis 9.1 Elektrivarustuse kvaliteet

Elektri kvaliteet mõjutab majanduslikult elektrisüsteemi, võrguettevõtete seadmete ja kõigi elektritarbijate tööd. Toitekatkestused ja pinge kõikumised võivad vähendada toodangut ja põhjustada praaki. Teisalt nõuab tarbijate poolt genereeritud häiringute summutamine võrguettevõtetest investeringuid ja tõstab käidukuluseid. Tänapäeval on tööstuses tõusnud elektroonika ja automaatika osakaal, samuti infotehnoloogia tähtsus. Kõik elektroonikaseadmed on tundlikud toitepinge häirimisele, kuid on ka ise häiringute allikad. Elektri kvaliteet on tihedalt seotud mõistetega nagu seadmete töökindlus, eluiga, kasutegur, stabiilsus, valeoperatsioonid, rikked jm. Suur on pikkade katkestuste tõttu andmata ja saamata jäänud elektrienergia maksumus. Liigpinged võivad nii tarbija kui ka võrguettevõtte elektriseadmeid rikkuda või täielikult hävitada.

Vaba elektriturg annab tarbijatele võimaluse elektrienergia tarnijat valida. Ühtlasi on tõusnud ka tarbijate huvi ja nõudmised elektri kvaliteedi vastu. Kuna elektri ülekanne ja jaotamine jäävad monopoolseks, seatakse nõudmised elektri kvaliteedile seadusandlikul teel. Vabal elektriturul sõlmitakse lepingud mitte ainult tarnija ja tarbija vahel, vaid ka tootja ja ülekandevõrgu, ülekande- ja jaotusvõrgu ning jaotusvõrgu ja tarbijate vahel. Nendes lepingutes fikseeritakse elektrienergia mittesaadavuse kõrval ka elektri kehtivate standardite ja normide kohane kvaliteet. Tingimused tarbijate varustamiseks kvaliteetse elektrienergiaga võivad oluliselt erineda. Kuna kvaliteedi tagamine nõuab kulutusi, on kvaliteedistandardid ja muud nõuded koostatud nii, et need ei põhjustaks elektrivarustusettevõtetele põhjendamatult suuri kulutusi. Seetõttu võibki tihedalt asustatud piirkondades, kus elektrivõrgud on paremini välja arendatud, tagada ja nõuda kõrgemat elektri kvaliteeti kui hõredalt asustatud piirkondades. Mõnel pool (nt Soomes) liigitataksegi elektri kvaliteeditingimusi normaal- ja kõrgtasemele vastavateks. Standardite järgimine on vajalik vaid sel juhul, kui need on tehtud kohustuslikuks õigusaktidega. Lõplikult fikseeritakse kvaliteeditingimused elektritarbija ja elektrivarustaja vahelises lepingus.

Elektri kvaliteediga tuleb arvestada elektrivõrgu majanduslikul plaanisel. Plaanimise eesmärk on minimeerida summaarseid kulusid

$$F = K_{inv} + K_{k\u00e4it} + K_{hoold} + K_{kat} = \min$$

kus K_{inv} – investeringud

$K_{k\u00e4it}$ – käidukulud (kaod, personal, tagavarad)

K_{hoold} – hoolduskulud

K_{kat} – katkestuskulud.

Siin avaldub elektri kvaliteet otseselt katkestuskuludes ning piirtingimustena pinge kvaliteedile ja varustuspidevusele.

Elektri kvaliteedi probleemide lahendamine toimub järgmiste etappide kaupa:

- probleemi tuvastamine
- probleemi iseloomustamine
- võimalike lahenduste piiritlemine
- lahenduste tehniline ja majanduslik hindamine.

Esmalt on vaja tuvastada probleem ja määrata kindlaks selle iseloom. Tegemist võib olla näiteks pinge liialt madala või kõrge tasemega, pinge asümmeetriaga, mis tingib elektrimootorite ülekuumenemist. Pingelohud võivad põhjustada kontaktorite väljalülitumist. Pinge värelemine, flikker, väsitab silmi. Iseloomulikud avaldumisviisid on ka transientidel, harmoonikutel ja muudel pinge kvaliteedi hälvetel.

Elektri kvaliteedi rikkumiste täpsemaks iseloomustamiseks tuleb organiseerida kvaliteedinäitajate objektiivne mõõtmine, kasutades sellekohaseid mõõtureid. Kindlaid ja mitmekülgeid tulemusi annavad mõõtesüsteemid, kuhu kuuluvad kümned mõõturid, mille näidud edastatakse ühte keskusesse. Kvaliteedi seiret teevad nii elektrivarustusettevõtted kui tarbijad oma valduses oleva võrgu piirides. Nendele langeb ka abinõude rakendamise kohustus. Suur tähtsus on ennetavatel abinõudel, mille kavandamine algab juba elektrivõrgu projekteerimisjärgus.

Probleemide lahendamiseks piiritletakse tehnilised meetmed. Vajalikuks võib osutada elektrotehniline modelleerimine ja analüüs. Hindamisel tuleb arvestada võimalike lahenduste mõju kõikidele võrgu osadele ja osapooltele. Kõrvale jäetakse lahendused, mis ei ole tehniliselt otstarbekad. Ülejäänud lahendusi hinnatakse majanduslikust seisukohast. Tuleb tähele panna, et taotletakse mitte ideaalset, vaid tarbija seadmete tööks piisavat elektri kvaliteeti. Kui tarbija suudab taluda reaalselt esinevaid pingelohke, siis ei ole mõtet teha kulutusi tagamaks pingelohkude viimist standardiga ettenähtud piiridesse.

Tabel 9.1 Hinnangulised rahalised kahjud pingelohu korral

Tööstus	Võimalik rahaline kahju (USD)
Paberitööstus	30 000
Keemiatööstus (plast, klaas jm)	50 000
Autotööstus	75 000
Krediitkaartide andmetöötlus	250 000
Pooljuhtidetööstus	2 500 000

Ebakvaliteetses elektrienergiast tingitud kahjud võivad olla küllaltki suured. Tabelis 9.1 on näidatud pingelohu rahaline mõju erinevatele ettevõtetele. Investeeringud pinge kvaliteedi tõstmisesse on eriti põhjendatud seal, kus tulemuseks on toodangu praak ja hävinemine. Suuri kulutusi kvaliteediprobleemide vältimiseks on enamikul juhtudel tarvis teha võrguettevõtjal. Tarbijatel on mõistlik investeerida elektri kvaliteeti tõstvatesse seadmetesse, kui nad ise põhjustavad kvaliteediprobleeme. Tarbija poolel on meetmete ühikuline suurus enamjaolt väike ja samas asuvad nad probleemi allika juures. Võrguettevõtte kehtestab tarbijatele piirangud, mis määravad kindlaks, kui palju tohivad need võrku

mõjutada. Vastastikune koostöö elektrivarustuse osapoolte vahel on igati soovitatav, kuna võrgu mõjutamine ühe tarbija poolt avaldab mõju ka teistele sama piirkonna tarbijatele.

9.2 Elektri kvaliteedinäitajad

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

Elektromagnetilised nähtused, mis põhjustavad häiringuid, liigitatakse *IEC (International Electrotechnical Commission)* klassifikatsiooni kohaselt järgmistesse rühmadesse:

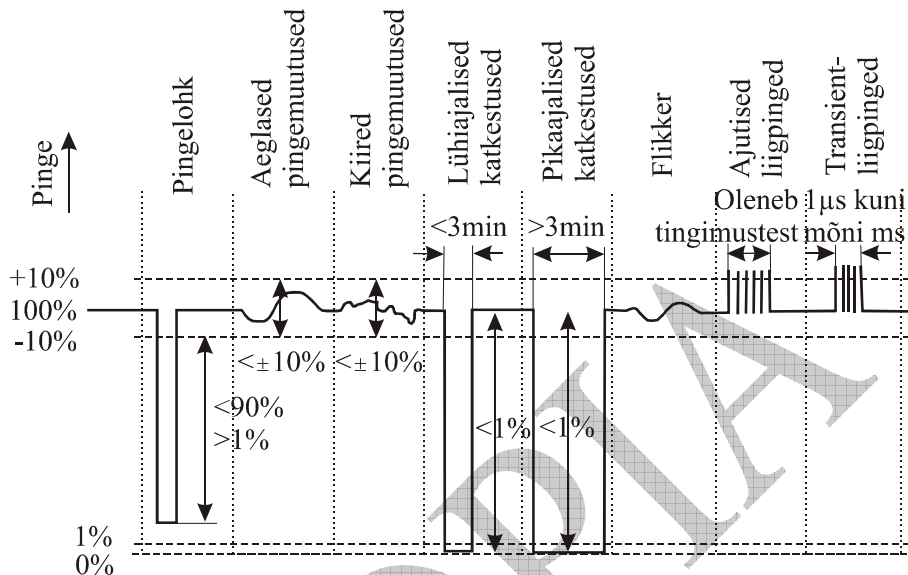
- madalsageduslikud juhtivusnähtused
- madalsageduslikud kiirgusnähtused
- kõrgsageduslikud juhtivusnähtused
- kiirguslikud lahendusnähtused
- elektrostaatilised lahendusnähtused
- elektromagnetiline tuumaimpulss.

Elektrivarustuse seisukohalt tuleb tähelepanu pöörata esimene rühma nähtustele, kuhu kuuluvad ka pinge kvaliteedi küsimused. Muud elektri- ja magnetväljade häiringud on enamasti seotud elektronseadmete konstrueerimisega ja käiduprobleemidega.

Pinge kvaliteedinäitajateks on

- võrgusagedus
- pingetase ja aeglased pingemuutused
- pingelohud ja kiired pingemuutused
- lühiajalised toitekatkestused
- pikaajalised toitekatkestused
- võrgusageduslikud liigpinged
- transientliigpinged
- toitepinge asümmeetria
- kõrgemad harmoonikud
- vahelharmoonikud
- signaalpinged
- alaliskomponendid vahelduvvooluvõrkudes.

Olulisemad elektri kvaliteedi näitajad ja neid iseloomustavad omadused on joonisel 9.2.



Joonis 9.2 Elektri kvaliteedinäitajate ülevaade

Elektri kvaliteeti vaadeldakse ennekõike tarbija liitumispunktis. Võrgusagedus ja pingetase on suurused, mis on nii mõõtmistehniliselt kui arvutuslikult igati kontrollitavad. Kõrgemad harmoonikud, pinge asümmeetria ja kiired pingemuutused (sh flikker) on samuti jälgitavad, kuid võrguettevõtjal on raske neid kõrvaldada, sest neid nähtusi põhjustavad enamasti tarbija seadmed. Vaheharmoonikud, pingelohud ja liigpinged on suurused, millele on raske esitada täpseid nõudeid. Neid nähtusi jälgitakse ja fikseeritakse.

Allpool vaadeldakse põhilisi pinge kvaliteedinäitajaid lähemalt. Tuleb võtta arvesse, et näitajate siin esitatud karakteristikud ei pruugi olla ammendavad. Kvaliteedinäitajate põhjalikumal käsitlemisel eristatakse nähtusi üksikasjalikumalt nende sageduse, kestuse, tõusu kiiruse, ulatuse jm alusel.

9.2.1 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) 99,5% nädalas
- 50 Hz -6/+4% (47...52 Hz) 100% nädalas.

Lisaks võib vaadelda sageduse kvaliteedi kõrg- ja normaaltaset:

- 50 Hz \pm 0,5% (49,75...50,25 Hz) 100% ajast – kõrgtase
- 50 Hz \pm 1% (49,5...50,5 Hz) 100% ajast – normaaltase.

Võib normeerida ka sageduse kõikumist $\Delta f = f_{\max} - f_{\min}$, s.o vahet suurima ja vähima sageduse väärtuse vahel kindlaksmääratud ajavahemikul, ning 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.

Tuleb tähele panna, et sagedus on sama kogu ühendsüsteemis. Vaid ajutiste saartalitluste ja varutoite kasutamise ajal võib sagedus olla määratud väiksemas ulatuses. Nendel juhtudel on standardi nõuded leebemad:

50 Hz \pm 2% (49...51 Hz) 95% nädalast

50 Hz \pm 15% (42,5...57,5 Hz) 100% ajast.

9.2.2 Pingetase ja aeglated pingemuutused

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

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

Madalpingevõrkudes toimub Eestis üleminek pingelt 220/380 V IEC standardis ettenähtud pingele 230/400 V. Standardi kohaselt peab 95% toitepinge efektiivväärtuse 10-minutilistest keskväertustest olema normaaltingimustel, arvestamata rikkeid ja toitekatkestusi, igas nädalaintervallis vahemikus $U_n \pm 10\%$. Kaugel asuvates piirkondades võib pinge erijuhtudel olla $U_n + 10/-15\%$. Tarbijaid tuleb sellest teavitada. Kui liitumispunktis on keskpinge, nõuab standard, et 95% pinge 10-minutilistest keskväertustest oleks $U_c \pm 10\%$, kus U_c on lepinguline pinge. Toitekatkestuste aega arvesse ei võeta. Võib vaadelda ka pinge kõrg- ja normaalkvaliteeti. Kokku võttes on madalpingevõrgus pinge-kvaliteedi

- kõrgtase, kui efektiivväärtuse 10-minutiline keskväertus on 220...240 V ja 10-minutiliste keskväertuste keskväertus 225...235 V
- normaaltase, kui efektiivväärtuse 10-minutiline keskväertus on 207...244 V
- standardtase, kui 95% efektiivväärtuse 10-minutilistest keskväertustest on 207...253 V ja 10-minutiliste keskväertuste keskväertus alati 195,5...253 V.

Keskpingevõrgus on

- kõrgtase, kui efektiivväärtuse 10-minutiline keskväertus on $U_c \pm 4\%$ ja 10-minutiliste keskväertuste keskväertus $U_c \pm 2,5\%$
- normaaltase, kui efektiivväärtuse 10-minutiline keskväertus on $U_c \pm 10\%$
- standardtase, kui 95% efektiivväärtuse 10-minutilistest keskväertustest on $U_c \pm 10\%$.

Normid kehtivad tarbija liitumispunkti kohta. Standard ei määra lähemalt, kuidas pinget mõõdetakse. Pingetaset mõjutavad liitumispunkti asukoht jaotusvõrgus, pinge reguleerimisviis ja koormuste muutumine. Pinget jälgitakse ennekõike jaotusvõrgu toitealajaamades (nt 110/35 kV alajaamades). Sageli mõõdetakse pinget ka tarbijale lähemates alajaamades. Mõõtmised võivad olla nii kaugloetavad kui kohapeal fikseeritavad. Kasutatakse registreerivaid mõõtureid, mis salvestavad mällu näiteks pinge 1...5-minutilised keskvaartused. Tegemist võib olla elektri kvaliteedimõõturitega, mis fikseerivad ka muid kvaliteedinäitajaid. Aeg-ajalt nende mõõturite tulemusi loetakse ja töödeldakse. Pinge mõõtmisvahemik valitakse nii, et haaratud on kõik iseloomulikud talitlused (tööpäevad, pühad, pühade-eelsed päevad jm). Fikseerida tuleb ka liigpingeid, mis võivad rikkuda elektriseadmeid.

9.2.3 Pinge asümmeetria

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**

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

Asümmeetriateguri võib arvutada ka faasidevaheliste pingete kaudu

$$k_a = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}}, \text{ kus } \beta = \frac{U_{12}^4 + U_{23}^4 + U_{31}^4}{(U_{12}^2 + U_{23}^2 + U_{31}^2)^2}$$

Normaaltalitusel ei tohi vastujärgnevuskomponendi efektiivväärtuse 10-minutilise keskvaartus madal- ja keskpingel ületada 2% pärijärgnevuskomponendist iganädalastel mõõtmistel 95% juhtudest. Mõnes piirkonnas, kus tarbijajapaigaldised on ositi ühendatud ühe- või kahefaasiliselt, võib 3-faasilises liitumispunktis asümmeetria olla kuni 3%. Kui vaadelda ka kvaliteedi kõrg- ja normaaltaset, siis on nädalas

- kõrgtase, kui kõik $k_a \leq 1\%$
- normaaltase, kui kõik $k_a \leq 1,5\%$
- standardtase, kui 95% ajast $k_a \leq 2\%$.

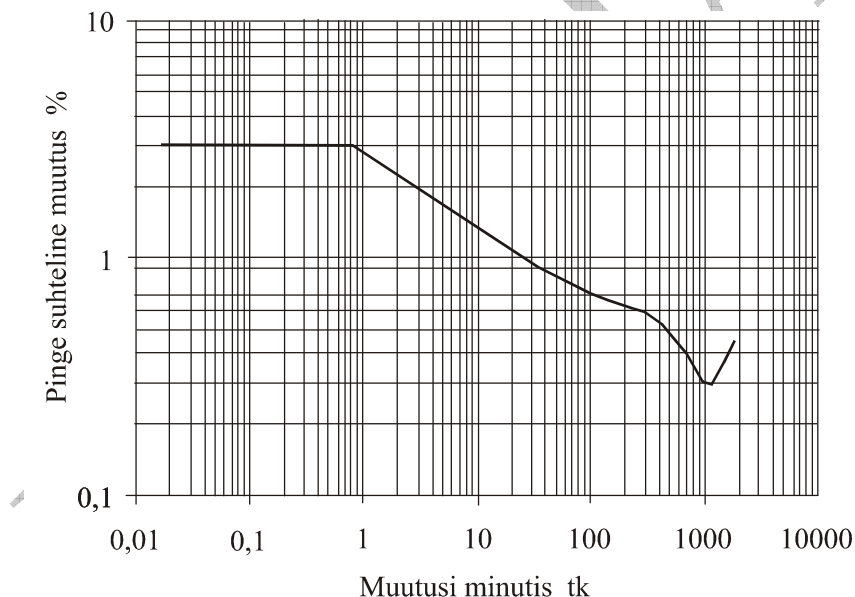
Vastujärgnevuskomponent häirib tarvitite, eriti mootorite talitlust. Nulljärgnevuskomponent tekitab neutraalinihke – pingetõusu keskpingevõrkude faasi-juhtmete ja maa vahel, lisakoormuse isolatsioonile ja pingetrafode magnetahelatele. Nulljärgnevuskomponenti pole seni normeeritud.

9.2.4 Kiired pingemuutused

Kiired pingemuutused ehk pinge kõikumine on järjestikuliste pingemuutuste kogum või pingekõvera mähisjoone tuiklemine. Pinge kõikumist hinnatakse pinge muutumise ulatusega

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

Kiireid pingemuutusi põhjustavad peamiselt koormuse muutused tarbijapaigaldistes või lülitused võrgus. Normaalingimustel ei ületa madalpingemuutused tavaliselt 5% nimipingest, kuid teatud tingimustel võivad need mõnel korral päevas olla kuni 10%. Keskpingele on need piirväärtused vastavalt 4% ja 6%. Lühiajalist pingemuutust, mille puhul toitepinge on väiksem kui 90% nimipingest, loetakse **pingelohuks**. Kui pingemuutused on perioodilised, siis on lubatud muutuste ulatus väiksem (joonis 9.3).



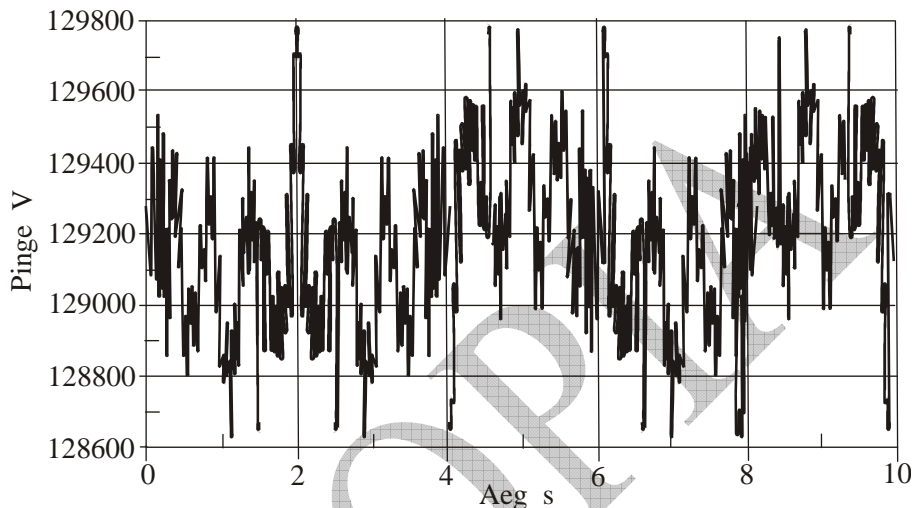
Joonis 9.3 Pinge suurim lubatud muutumisulatus sõltuvalt muutuste sagedusest

Suurim pinge kõikumistega seotud probleem on **värelus (flikker)**. Värelus on nägemisaistingu ebahütlus, mis on tingitud valguse kõikumast heledusest või muutlikust spektraaljaotusest. Pinge efektiivväärtuse võnkumise sageduseks on väreluse korral 1...25(30) Hz. Värelusel on pinge efektiivväärtus enamjaolt 0,9...1,1 nimipingest. Kõige häirivamaks loetakse võnkumise sagedust 8...10 Hz. Väreluse toime on subjektiivne ja võib muutuda olenevalt tajumistingimustest ja ajast. Normaalselt peab valgusallikate väreluse kestevtugevus 95% ajast olema $P_{fl} \leq 1$. Väreluse kestevtugevus P_{fl} leitakse kaheteistkümn

kahe tunni jooksul 10-minutilistes ajavahemikes mõõdetud väreelse lühiajalise tugevuse P_{st} põhjal valemiga

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{12} \frac{P_{st}^3}{12}}$$

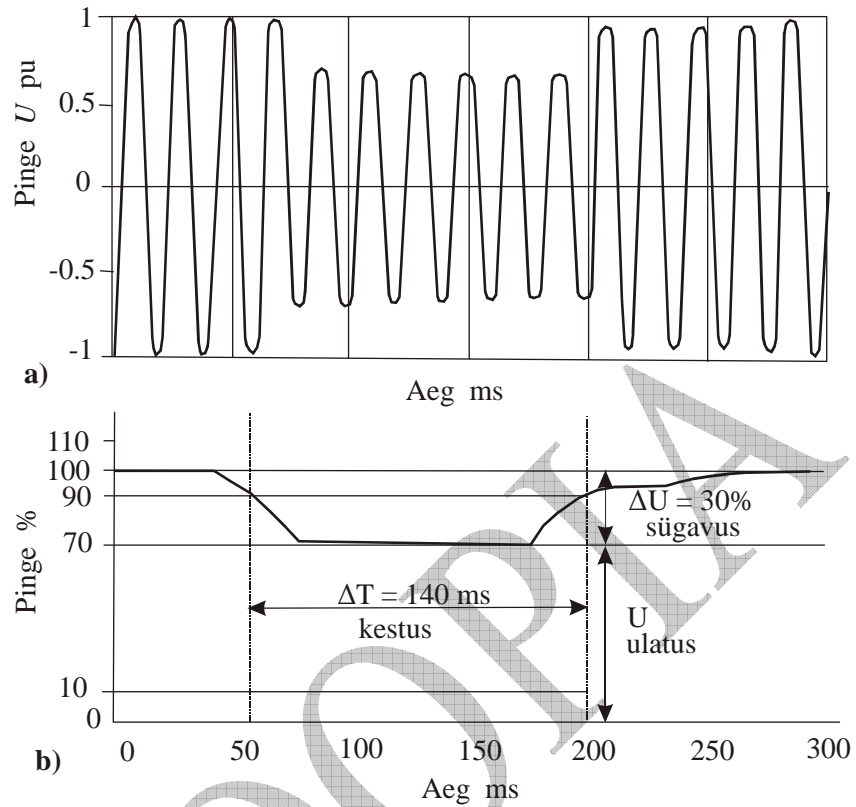
Võimalikku värelust põhjustava pingelaine kuju on joonisel 9.4.



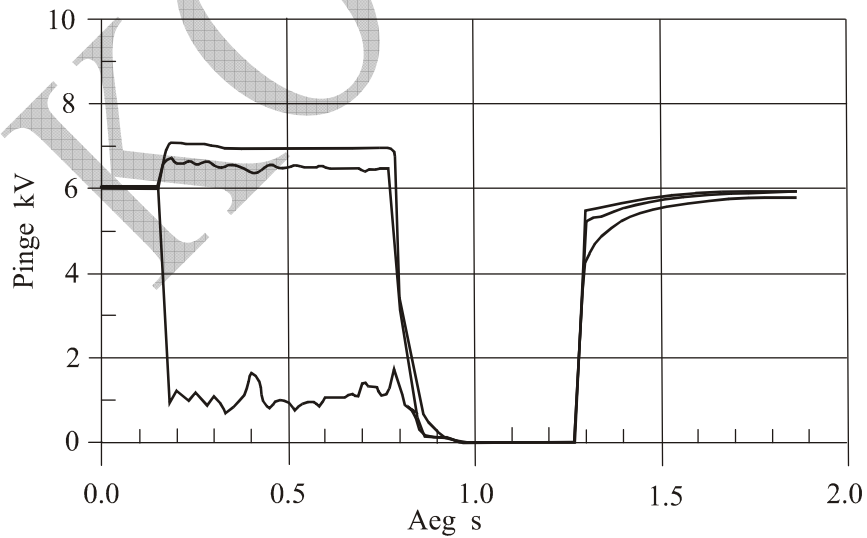
Joonis 9.4 Kaarahju tööst põhjustatud pingelaine fluktuatsioonid

Pingelohk on toitepinge järsk langus lühikeseks ajaks tasemeni 90% kuni 1% nimipingest. Pingelohke iseloomustatakse nende kestusega ΔT ja sügavusega ΔU (joonis 9.5). Pingelohu kestus on tavaliselt 10 ms (poolperiood) kuni 1 min. Pingelohu sügavus on nimipinge ja pingelohu ajal esineva vähima pinge efektiivväärtuste vahe. Kui pinge väärtus langeb alla 1%, loetakse seda toitekatkestuseks. Kolmefaasilises süsteemis lähtutakse faasist, kus pingelohk on suurim. Pingelohku iseloomustavad omadused on

- ulatus – säilinud pingelaine efektiivväärtus mingis punktis
- sügavus – pingelaine efektiivväärtuse erinevus nimieffektiivväärtusest
- kestus – aeg, mille kestel on pingelaine efektiivväärtus alla 90% pingelaine nimieffektiivväärtusest
- faasinurga muutumine (faasinihe) – pingelaine nulli läbimise nihe
- koht pingelainel, kus toimub pingelaine vähenemine ja taastumine – mõõdetakse, kui pingelaine faasinurka, mille juures pingelaine tegelikult väheneb või taastub
- asümmeetria pingelaine vähenemisel kolmes faasis.



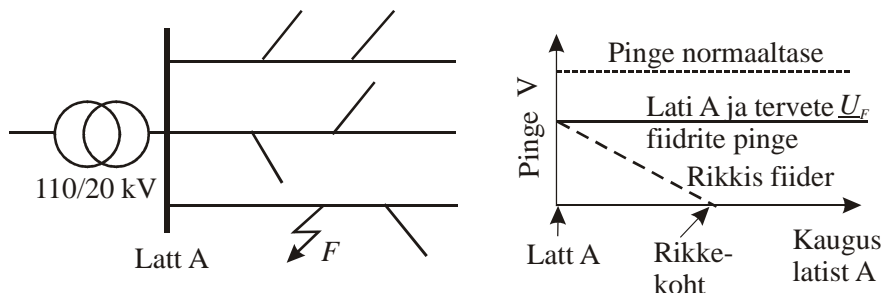
Joonis 9.5 Pinge hetk- (a) ja efektiivväärtused (b) pingelohu korral



Joonis 9.6 Kolmefaasilise pinge efektiivväärtuste muutumine ühefaasilise maaühenduse, fiidri väljalülitumise ja eduka taaslülituse korral

Pingelohud tekivad riketest tarbijapaigaldistes või jaotusvõrgus ja on juhuslikud. Pingelohu kestus on tavaliselt määratud releekaitse toimega. Pingelohu sügavusele avaldavad mõju asünkroonmootorid ja kondensaatorpatareid. Kolmefaasilise pinge efektiivväärtuse muutused ühefaasilise maahenduse ning sellele järgneva väljalülituse ja eduka taaslülituse korral on joonisel 9.6.

Pingelohkude hulk ühe aasta jooksul võib ulatuda mõnekümne tuhandeni. Enamiku pingelohkude kestus on väiksem kui 1 s ja nende suhteline sügavus alla 60%, kuid võib esineda ka kestvamaid ja sügavamaid pingelohke.



Joonis 9.7 Keskpingevõrgu pingetase kolmefaasilise lühise ajal

Joonisel 9.7 on keskpingevõrgu pingetase kolmefaasilise lühise ajal. Näeme, et pinge lattidel A ja ühtlasi kogu võrgu piirkonnas langeb tunduvalt. Vigastatud fiidril langeb pinge veepaika jõudes nulli.

Lühise ajal lattidel A esinev pinge U_F sõltub ennekõike lühistatud liinilõigu takistusest Z_L ja lühisetakistusest Z_F . Teatud mõju on ka süsteemi takistusel Z_Q ja trafo takistusel Z_T . Kui eeldada, et lattidel oli enne lühist nimipinge U_n , siis

$$\underline{U}_F = \frac{\underline{Z}_L + \underline{Z}_F}{\underline{Z}_Q + \underline{Z}_T + \underline{Z}_L + \underline{Z}_F} U_n = (\underline{Z}_L + \underline{Z}_F) \underline{I}_k$$

kus \underline{I}_k on lühisvool.

Pingelohke fikseerivad uuemat tüüpi kvaliteedimõõturid. Probleeme tekib pingelohkude eristamisega muude kiirete pingemuutuste ja harmoonikute taustal. Keskpingevõrgu vigadest põhjustatud pingelohkude esinemist võib hinnata releekaitse ja taaslülitusautomaatide toimesageduse alusel.

9.2.5 Liigpinged

Liigpinged on võrgusageduslikud või transientliigpinged.

Võrgusageduslik liigpinge on suhteliselt pika kestusega liigpinge faasijuhtmete või faasijuhtme ja maa vahel. See tekib tavaliselt lülitustoimingute või riketega tagajärjel. Tüüpilised võrgusageduslike liigpingete põhjused on

- ühefaasilise maalühise puhul pingetõus tervetes faasides

- pinge tõus ferresonantsi tõttu, kus resonantsi põhjustab lähestikku asuvate elektriaparaatide mahtuvus ja küllastuva magnetahela induktiivsus
- *PEN*-juhtme katkemine madalpingevõrgus asümmeetrilise koormuse korral
- trafo astmelüliti või inverteri regulaatori rikked
- reaktiivvõimsuse ülekompenseerimine.

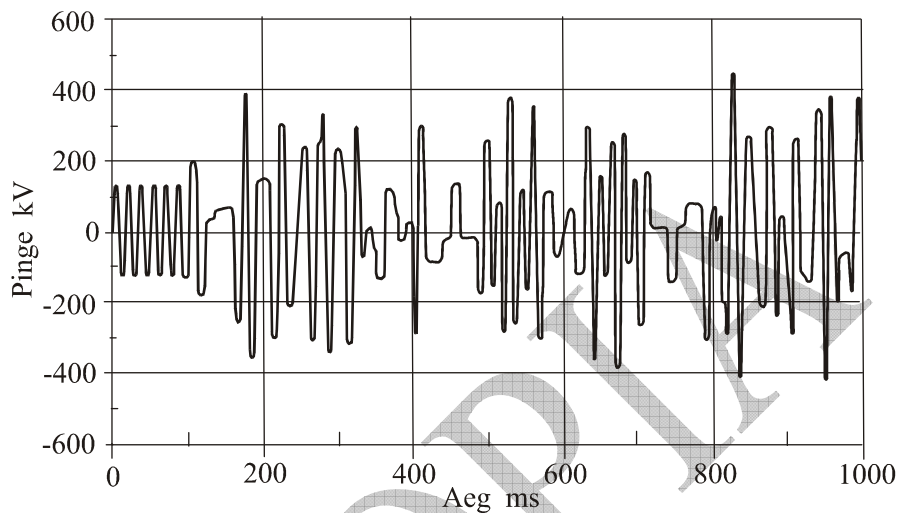
Standardi EVS-EN 50160 järgi ei ole võrgusageduslike liigpingete väärtus faasijuhi ja maa vahel madalpingel tavaliselt üle 1,5 kV. Keskpingel ei ületa liigpinge $1,7 U_n$, kui neutraal on maandatud jäigalt või üle takisti. Isoleeritud või resonantsmaandatud neutraaliga võrkudes ei ületa liigpinge tavaliselt $2,0 U_n$.

Tähelepanu tuleb pöörata ka **pingetõusudele**. Pingetõusuna mõistetakse pinge efektiivväärtuse suurenemist 1,1...1,8 kordse nimipingeni kestusega 0,5 perioodi (10 ms) kuni 1 minut. Nii nagu pingelohud on ka pingetõusud peamiselt põhjustatud võrgus esinevatest rikestest, kuid erinevalt pingelohkudest ei ole pingetõusud nii sagedased.

PEN-juhtme katkemine madalpingevõrgus tekitab tarbijatele liigpingeid, mille suurus oleneb faaside koormatusest ning tarbija maanduspaigaldise olemasolust. Kui *PEN*-juhe katkeb alajaamast väljumisel ning tarbijate elektripaigaldiste pingeltid osad on neutraaljuhust eraldi maandatud, siis toimub sisuliselt üleminek *TN*-süsteemilt *TT*-süsteemile. Faaside koormuse ebahütluse tõusul suureneb erinevus trafo faasipingete ja tarbija maandatud neutraaliga faasipingete vahel. Juhul kui faaside koormused on võrdsed, siis *PEN*-juhtme katkemine ei mõjuta tarbijate pinget, kuna vool *PEN*-juhtmes puudub.

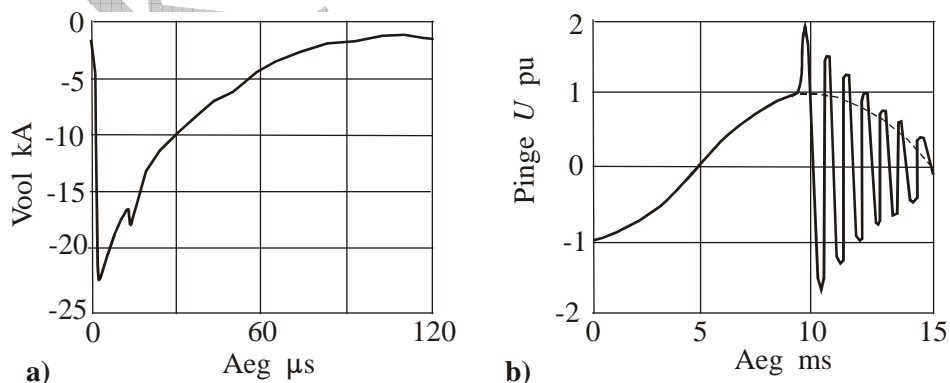
Suuri võrgusageduslikke liigpingeid põhjustab **ferresonants**, milles osalevad mahtuvus ja küllastuva magnetahela induktiivsus. Erinevalt lineaarsest resonantsist, mis põhjustab kõrgeid sinusoidalseid pingeid ja voole, tekitab ferresonants kaootilise lainekujuga ja tasemega pingeid ja voole (joonis 9.8). Kaootilisus on tingitud ahela ebalineaarsest volt-amper-karakteristikust, mille talitus võib muutuda hüppeliselt erinevate tööpunktide vahel. Tavaliselt leiab ferresonants aset tühijooksuolukorras trafo ja teatud pikkusega kaabli talitluses. Õhuliinide mahtuvusest tavaliselt ei piisa loomaks ferresonantsiks vajalikke tingimusi. Minimaalne kaabli pikkus, mis on tarvilik ferresonantsi tekkeks, sõltub võrgu pingest. Kaablite mahtuvused on jaotusvõrgu pingetasemete juures suhteliselt lähedased, olenedes vaid kaabli mõõtmetest. Trafode magnetahela induktiivsus seevastu on küllaltki erinev. Nii on 35 kV trafo magnetahela induktiivsus mitu korda suurem kui 10 kV trafol. Seetõttu on ohtlik ferresonants enamasti levinud kõrgemate pingete korral. Ferresonantsi esinemise tõenäosus sõltub veel maandamata trafo primaarmähise lülitusgrupist (kolmnurka ühendatud primaarmähisel võib ferresonants esineda küllaltki lühikese kaabli korral), süsteemi tugevusest (süsteemi madal lühisvõimsus suurendab resonantsi tõenäosust), kolmefaasilistes võrkudes kasutatavatest ühefaasilistest lülitusseadmetest jm. Ferresonants põhjustab

seadmete kuumenemist, kõrgeid pingeid ja liigpingepiirikute rikkeid, flikkereid jm. Ferroresonantsi iseloomulikuks omaduseks on trafodest lähtuv eriline heli. Kontrollitud ferroresonantsi saab ära kasutada elektri kvaliteedi tõstmiseks (p 9.5.2).



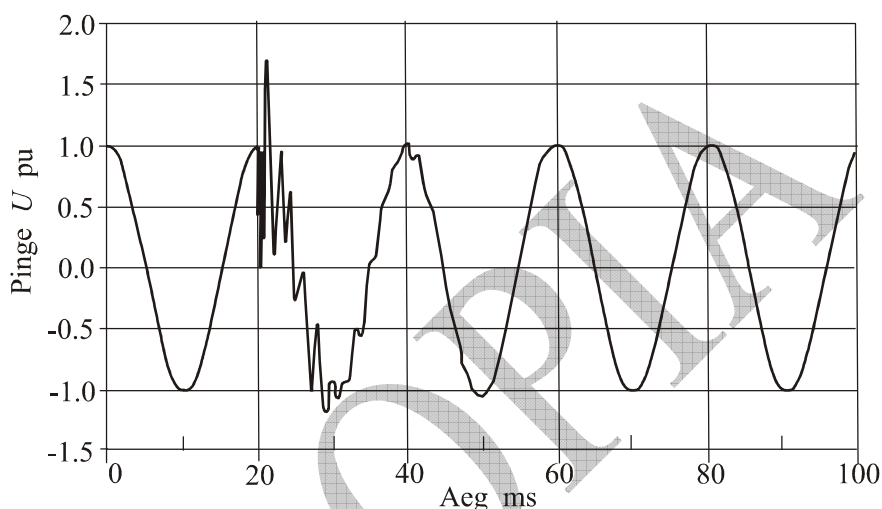
Joonis 9.8 Tühijooksus trafo ferroresonantsist tingitud madalsageduslik liigpinge

Transientliigpinge on võnkuv või mittevõnkuv liigpinge, mis on tugevalt sumbuv ning kestab mõne millisekundi või vähem. Mittevõnkuvaid transiente iseloomustatakse nende fronti tõusu ja sumbumise ajaga. Näiteks mõistetakse 1,2/50 μ s 2000 voldise impulsstransiendi all impulssi, mis saavutab 2000 V amplituudväärtuse 1,2 μ s jooksul ning seejärel sumbub pooleni amplituudväärtusest 50 μ s jooksul. Impulsstransiendi polaarsus on kas positiivne või negatiivne. Enam levinud impulsstransientliigpingete tekitajaks on äike. Äikese põhjustatud liigpingete amplituudväärtused võivad välgu otsetabamuse korral



Joonis 9.9 Välgulöögist põhjustatud vooluimpulss (a) ja jaotustrafo väljalülitamisest põhjustatud pinge siirdeprotsess (b)

ulatuda mitme megavoldini. Võnkuvat transientliigpinget iseloomustatakse sagedusega, kestusega ja amplituudiga. Joonisel 9.9 on kujutatud välgulöögist põhjustatud vooluimpulssi ning jaotustrafo väljalülitamisel tekkiva pinge siirdeprotsessi. Madalpingel ei ole transientliigpinge tippväärtus harilikult üle 6 kV. Välgu indutseeritud liigpinge on suurema tippväärtusega, kuid väiksema energiasaldusega, mistõttu on enamasti ka ohutum kui pikema kestusega lülitusliigpinge.



Joonis 9.10 Kondensaatorpatarei pingestamisest tingitud madalsageduslik võnkuv transient 35 kV

Sageduse järgi klassifitseeritakse võnkuvaid transiente kõrg-, kesk- ja madalsageduslikeks. Kõrgsageduslikeks loetakse transiente, mille võnkesagedus on 500 kHz või enam ning mille tüüpilist kestust saab mõõta mikrosekundites. Sellised transiendid tekivad näiteks koormuste lülitamisel. Keskmise sagedusega on transiendid sagedusega 5...500 kHz ja kestusega kümneid mikrosekundeid. Siia kuuluvad kondensaatorpatareide ja kaablite lülitamisest põhjustatud transiendid ning ka impulsstransientidest tingitud võnkuvad transiendid. Transiente, mille sagedus on väiksem kui 5 kHz ning kestus 0,3...50 ms, loetakse madalsageduslikeks. Selliseid transiente, põhjuseks näiteks kondensaatorpatarei pingestamine (joonis 9.10), võib kohata kesk- ja madalpingevõrkudes, kus tekkivad pingetransiendid sagedusega 300...900 Hz, mille amplituudväärtus on kuni $2,0 U_n$ ning kestus 0,5...3 perioodi (10...60 ms). Jaotusvõrkudes esineb ka võnkuvaid transiente, mille sagedus on alla 300 Hz. Need transiendid on põhiliselt seotud ferreesonantsiga ja trafode pingestamisega.

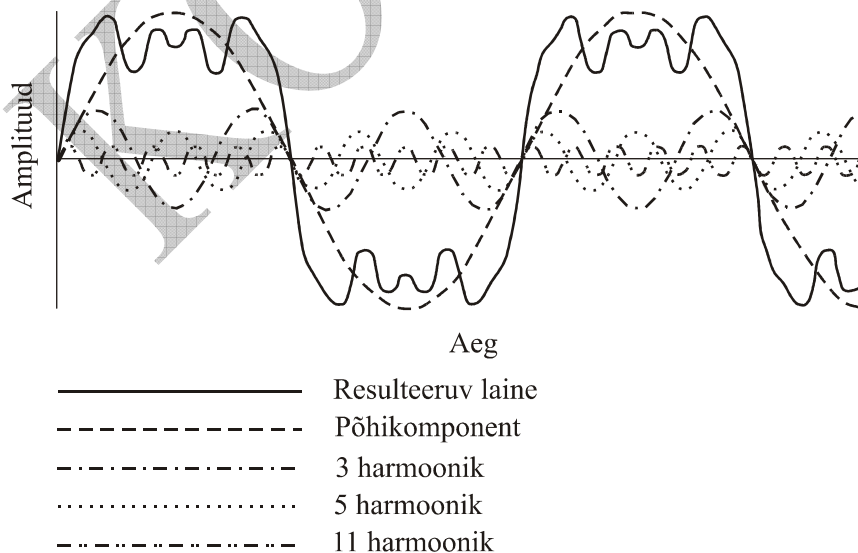
9.2.6 Harmoonikud

Enamasti eeldatakse, et elektrivõrgu pinged ja vool on siinuselise lainekujuga. Tihti esineb ka moonutatud kujuga perioodilist lainet. Moonutused on seletatavad kõrgemate harmoonikutega, mida põhjustavad mittelineaarsed elektritarvitid. Viimasel ajal on harmoonikute probleem tõusnud esile jõuelektroonikal põhinevate seadmete leviku tõttu.

Ettekujutus harmoonikutest põhineb Fourier' teisendusel, mille kohaselt iga-sugust perioodilist funktsiooni $U(t)$ on võimalik kujutada reana

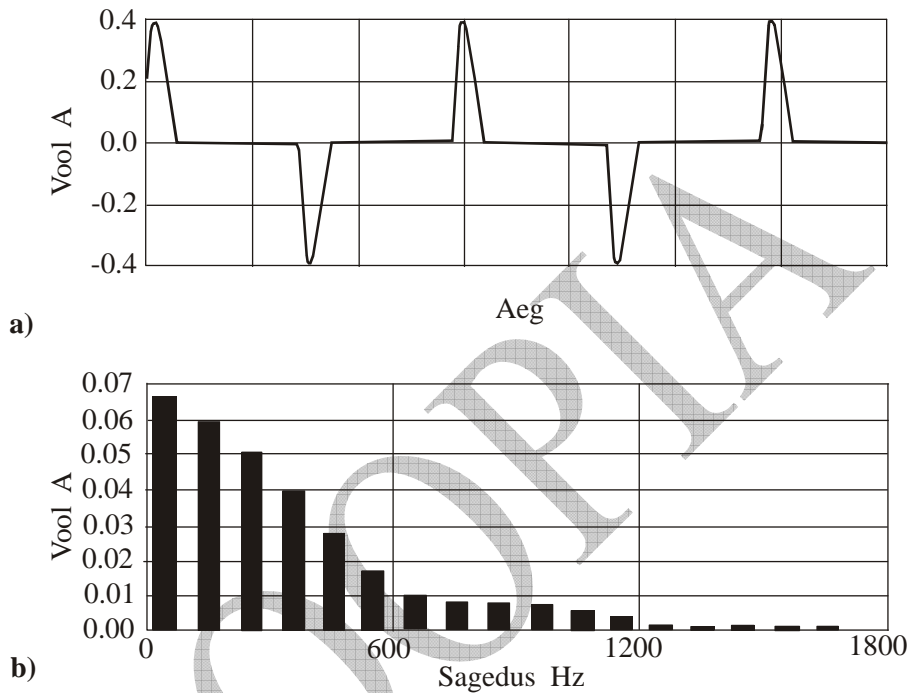
$$U(t) = \sum_{h=1}^{\infty} U_h \sin(h\omega_0 t + \psi_h)$$

mis koosneb erineva sagedusega siinuseliselt muutuvatest komponentidest. Komponentidel on neile iseloomulik amplituud U_h , sagedus $f_h = h\omega_0 / 2\pi$ ja faasinurk ψ_h . Põhikomponendi sagedus elektrivarustuses on $f_1 = \omega_0 / 2\pi = 50$ Hz. Elektriliste suuruste käsitlemisel nimetatakse vaadeldud komponente **põhi- ja kõrgemateks harmoonikuteks**. Erandjuhtudel esinevad ka **vahe-** ehk **inter-harmoonikud** ja alaliskomponent. Joonisel 9.11 on näide moonutatud lainekujust, kus põhiharmooniku kõrval on lisaks kolm kõrgemat harmoonikut paaritu järjekorranumbriga $h = 3, 5$ ja 11 . Võib näidata, et juhul kui laine positiivne ja negatiivne poolperiood on sama kujuga, koosneb Fourier' rida ainult paaritute harmoonikutest. Trafode hüstereesi tõttu mittelineaarne magneetimisvool, poollainealaldid ja kaarahjud genereerivad paarisharmoonikuid. Juhusliku iseloomuga koormused, nagu kaarahjud, keevitusseadmed ja sagedusmuundurid, võivad genereerida ka vaheharmoonikuid, mille sagedus ei ole pingepõhilaine sageduse kordne.



Joonis 9.11 Moonutatud lainekuju näide

Moonutatud lainekujuga voolu või pinget võib niisiis vaadelda koosnevana suurest arvust harmoonikutest. Praktiliselt piirdub vaadeldav harmoonikute arv $h_{max} = 25 \dots 50$. Ühiselt võib harmoonikuid kujutada spektrina (joonis 9.12). Enamasti on selline spekter diskreetne ja sisaldab vaid paaritud harmoonikuid. Vaeharmonikute esinemise korral võib spekter olla ka pidev.

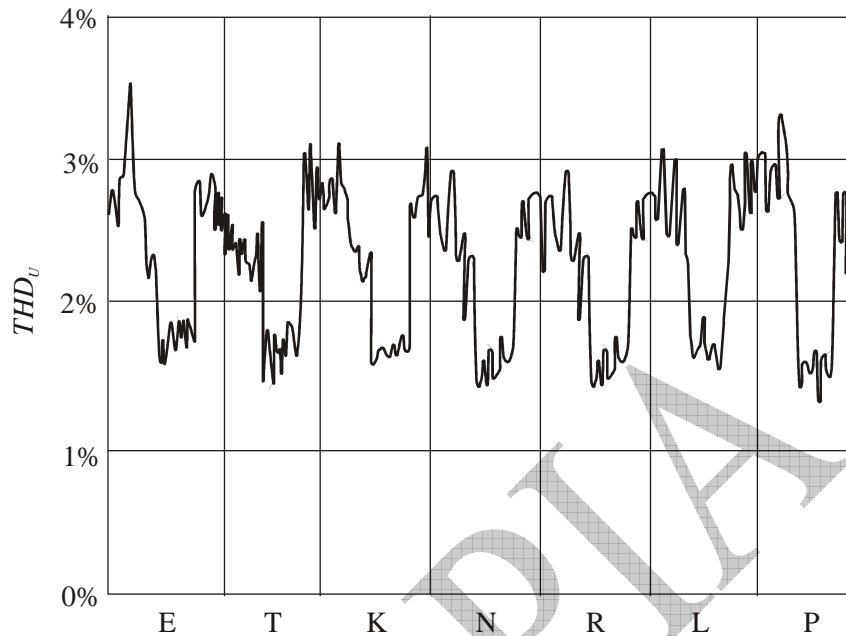


Joonis 9.12 Luminofoorlampide voolu kuju (a) ja harmoonikute spekter (b)

Kõrgemaid harmoonikuid võib hinnata ühiselt **harmoonmoonutusteguriga** (*total harmonic distortion factor, THD Factor*), mis arvutatakse valemiga

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

THD-d kasutatakse enamasti kirjeldamiseks pinge moonutusi. Kuna pinge põhikomponent muutub ainult paari protsendi ulatuses, siis on *THD* peaaegu alati tähenduslik arv. Joonisel 9.13 on elamupiirkonna jaotusalajaama pinge *THD* muutumine ühe nädala jooksul. Kõrgem *THD* esineb öösiti ja hommikuti tingituna mittelineaarsete koormuste suhteliselt suurest osakaalust nendel tundidel.



Joonis 9.13 THD muutumine ühe nädala jooksul

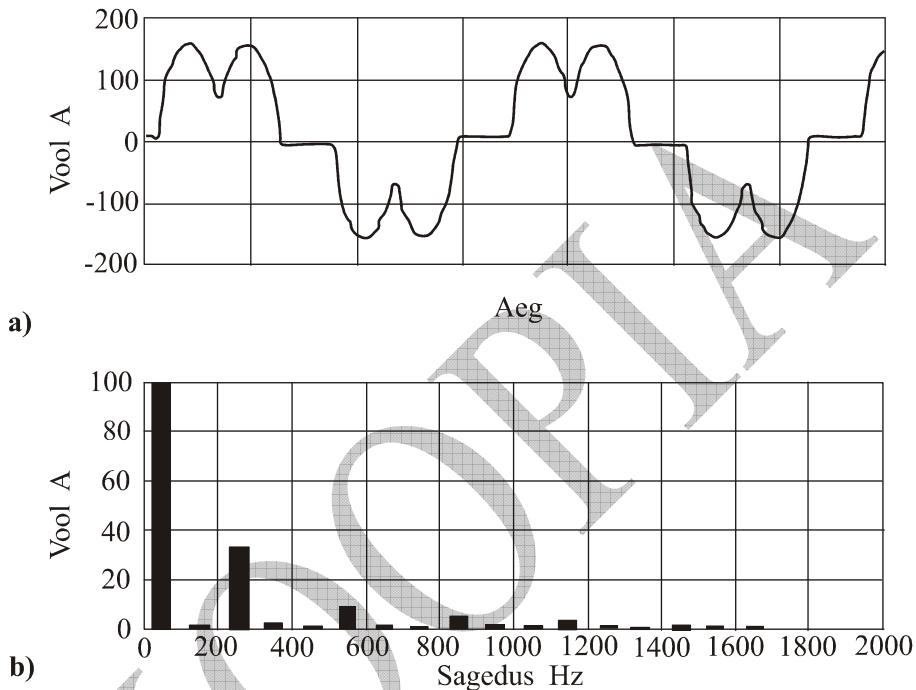
Voolu moonutuste kujutamine THD väärtustega on tihti eksitav. Väikse voolu korral võib harmoonikute suhteline osakaal voolus ja seega ka THD olla kõrge, kuid ohtlikku mõju elektrivarustusele see ei avalda. Voolu harmoonikute peegeldamiseks on otstarbekam kasutada **nõudlusmoonutustegurit** (*total demand distortion, TDD*), mille korral kasutatakse uuritava juhtumi põhikomponendi asemel voolu maksimaalset väärtust I_{max}

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} I_h^2}}{I_{max}}$$

Põhilised mittelineaarsed koormused on jõuelektroonikat kasutavad ja elektrilahendusel rajanevad tööstuskoormused: juhitavad ajamid, alaldid, inverterid, kaarahjud, keevitusseadmed, lahenduslambid jm. Mittelineaarseteks koormusteks on ka sellised kodu- ja kontoritarvitid nagu televiisorid, mikrolaine- ja induktsioonahjud, arvutid, printerid, kopeermasinaid jt. Koormustüüpidest sõltuvalt võivad väikeste tarvitite vooluharmonikud kas faasis liituda või teineteist kustutada. Pinge moonutuse tase sõltub vooluharmonikute kõrval võrgu impedantsist.

Tänapäeva modernsetes tööstusettevõtetes on mitmesuguseid mittelineaarseid koormusi, mis võivad põhjustada küllaltki suuri voolu moonutusi. Joonisel 9.14 on läbi kolmefaasilise muunduri toidetava reguleeritava ajami (*adjustable speed*

drive, ASD) põhjustatud voolu moonutused ja nende harmoonikute spekter. Kuigi sellised muundurid ei tekita kolmandaid harmoonikuid, võivad moonutused olla küllaltki suured. Tööstustarbijate juures on probleemiks ka võimsusteguri suurendamiseks kasutatavate kondensaatorpatareide talitus harmoonikute esinemisel. Võimalik on resonantsnähtuste tekkimine, mis põhjustavad mootorite ja trafode ülekuumenemist ning tundlike elektroonikaseadmete väärtalitlust.



Joonis 9.14 Läbi muunduri toidetava ajami voolu kuju (a) ja harmoonikute spekter (b)

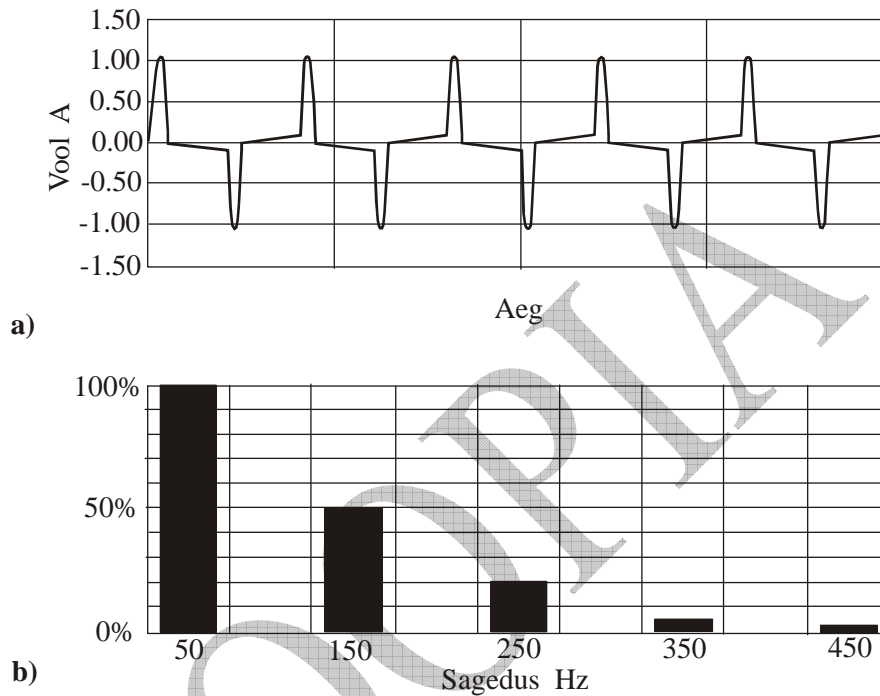
Harmoonikuid tekitavad ka küllastuvad seadmed nagu trafod ja muud elektromagnetilised seadmed, mil on terassüdamik. Nendes seadmetes põhjustab harmoonikuid raua magnetimiskõvera mittelineaarsus. Ühefaasilise või maandatud tähtlülitusega kolmeefaasilise trafo magnetimisvoolu lainekuju ja harmoonikute spekter on joonisel 9.15.

Kõrgemate harmoonikute olemasolul võrgus tuleb üle vaadata seosed, mis kujutavad pinget ja voolu efektiivväärtust, võimsust, võimsustegurit jm. Harmoonikute korral koosneb moonutatud laine mitmest erineva amplituudiga siinuselisest komponendist, mistõttu pinget ja voolu efektiivväärtused avalduvad seostega

$$U = \sqrt{\sum_{h=1}^{h_{\max}} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} U_h \right)^2} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_{h_{\max}}^2}$$

$$I = \sqrt{\sum_{h=1}^{h_{\max}} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} I_h \right)^2} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_{h_{\max}}^2}$$

kus U_h ja I_h on pinge ja voolu h -nda harmooniku amplituudväärtused.



Joonis 9.15 Trafo magnetimisvool (a) ja harmoonikute spekter (b)

Muutuvad ka aktiiv-, reaktiiv- ja näivvõimsuse avaldised. Võib näidata, et kuna pinge moonutused elektrivõrgus on suhteliselt väikesed (vähem kui viis protsenti), siis hoolimata voolu moonutustest võib aktiivvõimsuse leida voolu ja pinge põhikomponentide efektiivväärtuse ning nende vahelise nurga kaudu, reaktiivvõimsus avaldub aga üksiksagedustele vastavate reaktiivvõimsuste summana

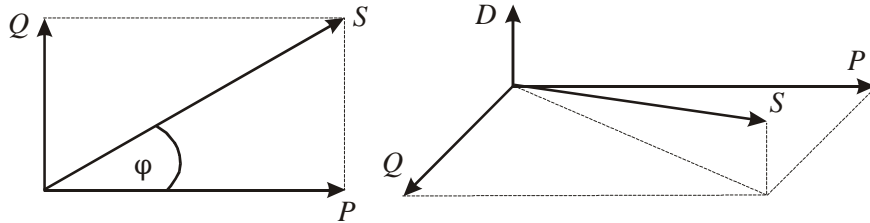
$$P = U_1 I_1 \cos \varphi_1$$

$$Q = \sum_h U_h I_h \sin \varphi_h$$

Näivvõimsuse saamiseks tuleb sisse tuua **moonutatud võimsuse** D mõiste. Moonutatud võimsus tähistab kõiki voolu ja pinge ristkorutisi erinevatel sagedustel, mis ei anna tulemiks keskmist võimsust

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}$$

Olukorda illustreerib joonis 9.16, millel on kujutatud tavapärane võimsuste kolmnurk ja vektorite asend harmoonikute esinemise korral.



Joonis 9.16 Võimsuste kolmnurgad

Pinge ja voolu efektiivväärtused ning näivvõimsuse võib avaldada ka harmoonimoonutustegurite kaudu

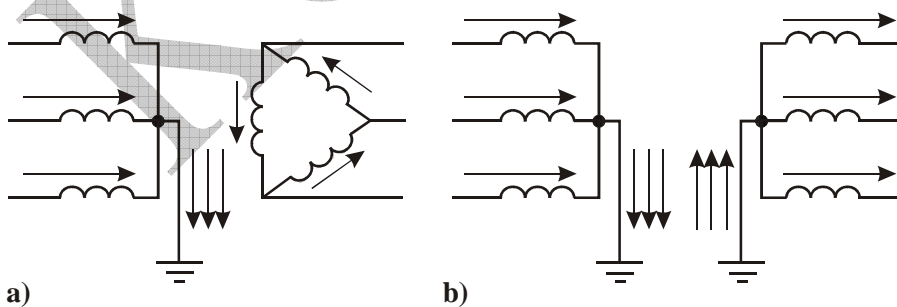
$$U = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} U_h^2} = U_1 \sqrt{1 + THD_U^2}$$

$$I = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} = I_1 \sqrt{1 + THD_I^2}$$

$$S = U_1 I_1 \sqrt{1 + THD_U^2} \sqrt{1 + THD_I^2}$$

Harmoonikute juures tuleb tähelepanu pöörata ka faasijärgnevusele. Sümmeetrilise kolmefaasilise süsteemi korral on harmoonikute faasijärgnevust võimalik määrata, korrutades harmooniku numbriga pärijärgnevuskomponendi faaside pöörlemise suunaga. Näiteks teise harmooniku korral, kui $h = 2$, on tulemuseks $(0^\circ, 120^\circ, -120^\circ)$, mis tähendab vastujärgnevust, kolmanda harmooniku korral, kui $h = 3$, on kehtib $(0^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$, mis on nulljärgnevus. Samal viisil on võimalik määrata kõikide teiste harmoonikute faasijärgnevust:

- harmoonikud numbritega $h = 1, 7, 13, \dots$ – pärijärgnevus
- harmoonikud numbritega $h = 5, 11, 17, \dots$ – vastujärgnevus
- kolmandad harmoonikud $h = 3, 9, 15, \dots$ – nulljärgnevus.

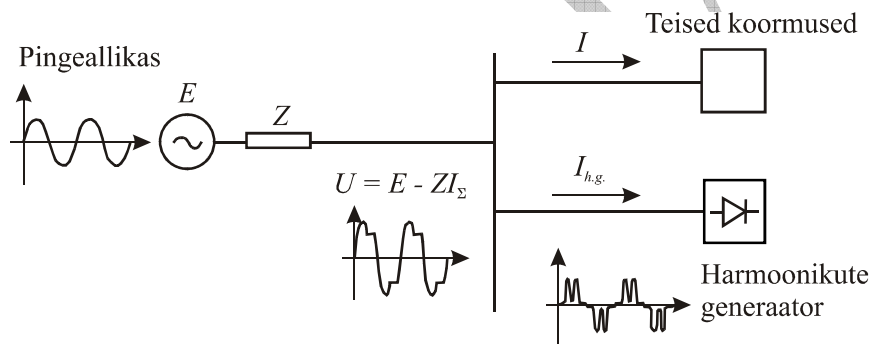


Joonis 9.17 Trafo lülitusgruppide mõju harmoonikute liikumisele

Kolmandatele harmoonikutele tuleb pöörata tähelepanu, kuna nulljärgnevuse tõttu erineb nende käitumine võrgus teiste harmoonikutega võrreldes. Kolmandad harmoonikud on olulised maandatud tähega süsteemide korral, kus vool

võib liikuda neutraalis. Sellisel juhul on võimalik neutraali ülekoormus, mis võib põhjustada seadmete mitteotstarbekohast töötamist, kuna pingelangu tõttu neutraalis on faasipinged moonutatud. Kolmandate harmoonikute liikumisele avaldab mõju trafode lülitusgrupp. Joonisel 9.17a on Ynd -lülitusgrupiga trafo, kus kolmandad harmoonikud sisenevad Y -mähisesse. Kuna need harmoonikud on teineteisega faasis, siis toimub nende liitumine. Sekundaarpoole d -lülituse tõttu kolmandad harmoonikud sulguvad ega avalda mõju väljuvatele vooludele. $Ynyn$ -ühenduse korral (joonis 9.17b) liiguvad kolmandate harmoonikute voolud tõkestamatult ühelt trafo mähiselt teisele ja sealt edasi võrku.

Harmoonikute levimisele võrgus avaldab mõju võrgu impedants. Väikese takistusega võrgus jäävad voolu moonutustest põhjustatud pingelangud väikeseks ja naaberkoormuste toitepinge moonutused on väiksemad (joonis 9.18). Harmoonikute levikut võivad oluliselt suurendada resonantsnähtused, mis sõltuvad kondensaatorpatareide olemasolust ja aktiivkoormuse osakaalust.



Joonis 9.18 Mittelinearse koormuse mõju toitepingele

Elektrivõrgu induktiivtakistus on lineaarses sõltuvuses sagedusest, mistõttu h -nda harmooniku korral on reaktiivtakistus

$$X_{Lh} = 2\pi f_h L$$

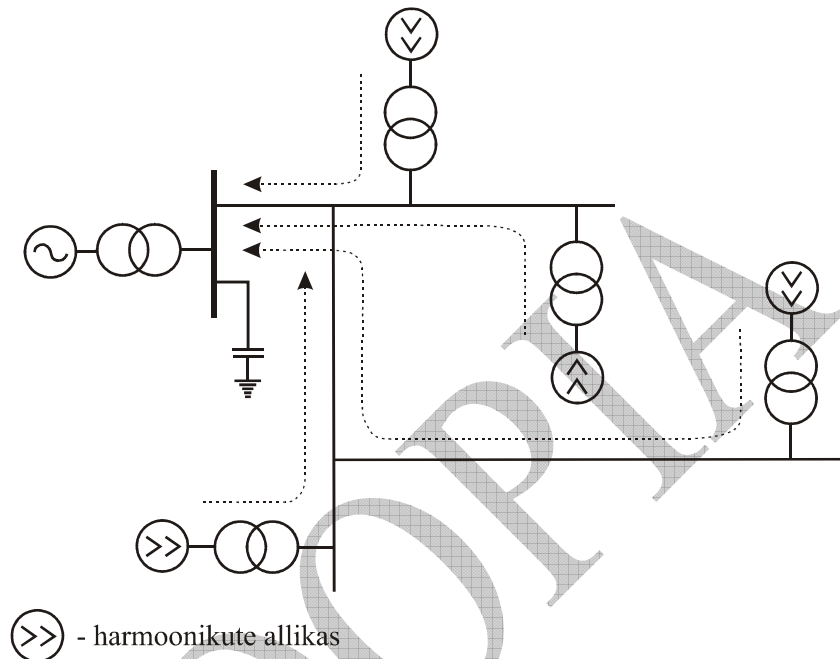
Aktiivtakistuse võib lugeda samaks kuni üheksanda harmoonikuni. Kõrgemate sageduste korral tuleb esile pinnaefekti mõju ning liinide ja kaablite aktiivtakistus on ligikaudu võrdeline ruutjuurega sagedusest. Kondensaatorpatareide reaktants on sagedusega pöördvõrdeline

$$X_{Ch} = \frac{1}{2\pi f_h C}$$

Ahelal, mis sisaldab nii mahtvuslikke kui ka induktiivseid komponente, on üks või mitu resonantssagedust, mille puhul induktiivne ja mahtvuslik takistus on võrdsed

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC}}$$

Juhul kui mingi harmooniku sagedus võrdub resonantssagedusega, võivad sellel sagedusel järsult tõusta pinge ja voolu väärtused. Joonisel 9.19 on elektrivõrk, kus võib esineda paralleelresonants, sest harmoonikute allika perspektiivist on põikikondensaator paralleellülituses võrgu ekvivalentse induktiivsusega.



Joonis 9.19 Võimaliku paralleelresonantsi probleemiga elektrivõrk

Resonantssagedusel muutub võrgu ekvivalentne näivtakistus harmoonikute allika poolt vaadatuna suureks

$$Z_p = \frac{X_C(X_{L\Sigma} + R)}{X_C + X_{L\Sigma} + R} = \frac{X_C(X_{L\Sigma} + R)}{R} \approx \frac{X_{L\Sigma}^2}{R} = \frac{X_C^2}{R} = qX_{L\Sigma} = qX_C$$

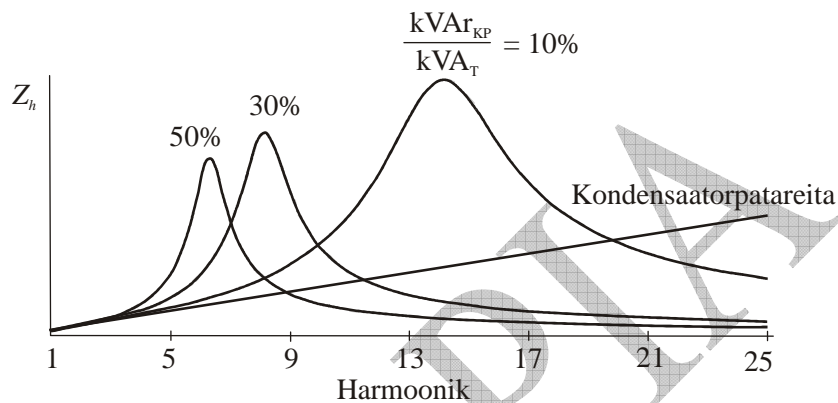
Siin on $q = X_{L\Sigma}/R = X_C/R$ ($R \ll X_{L\Sigma}$) resonantsahela kvaliteeditegur, mis muutub küllaltki suurtes piirides olenevalt harmoonikute allika asukohast võrgus. Näiteks jaotusvõrgu fiidril võib kvaliteediteguri väärtus olla väiksem kui 5, kuid suure trafo alampingelattidel 30 ja enam. Paralleelresonantsi esinemisel võib väiksemgi harmooniku vool põhjustada suure pingelangu $U_p = qX_{L\Sigma}I_h$, mistõttu pinge kondensaatorpatarei lähedal on tugevalt suurenenud ning moonutatud.

Kondensaatorpatarei vool resonantsi ajal avaldub kujul

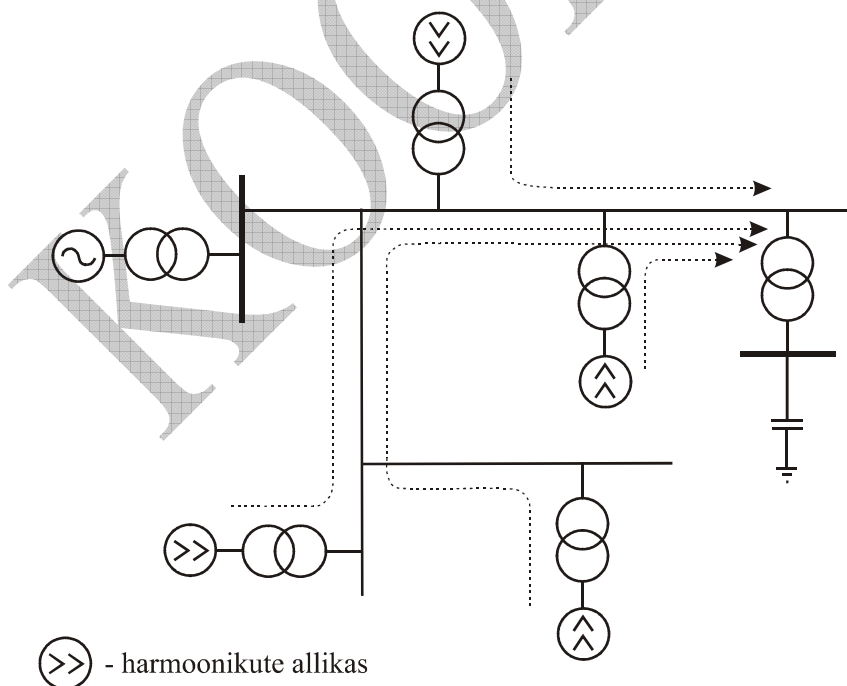
$$I = \frac{U_p}{X_C} = \frac{qX_C I_h}{X_C} = qI_h$$

Seega on ka harmooniku vool võimendatud q korda, mis võib põhjustada kondensaatorpatarei riknemist, kaitsmete läbipõlemist või trafo ülekuumenemist.

Harmoonikute resonantsi kujunemist iseloomustab võrgu sagedusarakteristik, mis kujutab näivtakistuse sõltuvust harmooniku järjekorranumbri või vastavast sagedusest. Sagedusarakteristikud joonisel 9.20 näitavad kondensaatorpatarei ja trafo võimsuste suhte mõju võrgu impedantsile.



Joonis 9.20 Sagedusarakteristiku muutus kondensaatorpatarei ja trafo võimsuse suhte muutumisel



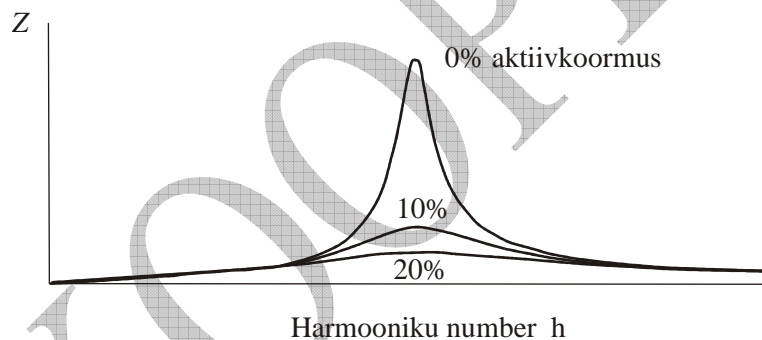
Joonis 9.21 Võimaliku jadaresonantsi probleemiga elektrivõrk

Elektrivõrgus esineb ka jadaresonantsi, mis tekib, kui kondensaatorpatarei mahtuvus ja trafo või liini induktiivsus paistavad harmoonikute allikatele LC-jadaahelana (joonis 9.21). Tarbija, kes kasutab võimsusteguri parendamiseks kondensaatorpatareid ja kellel endal ei ole mittelineaarseid koormusi, võib kogeda ümbruskonna harmoonikute allikate tõttu olulisi pingemoonutusi. Resonantsi ajal on pinge kondensaatorpatareil

$$U_{KP} = \frac{X_C}{X_T + X_C + R} U_h \approx \frac{X_C}{R} U_h$$

kus U_{KP} ja U_h on pinge kondensaatoril ja harmooniku pinge.

Võimalikku harmoonikute resonantsi summutab oluliselt võrgu aktiivtakistus. Joonisel 9.22 on paralleelresonantsahela impedantsi karakteristikud erinevate paralleelselt mahtuvusega olevate aktiivkoormuste korral. On näha, et juba 10% aktiivkoormus avaldab olulist mõju. Võrgus summutavad resonantsi nii trafode kui õhuliinide ja kaablite aktiivtakistused. Probleeme võib tekkida kondensaatorpatareidega, mis on lülitatud alajaama lattidele, kus suhteline aktiivtakistus on madal ning paralleelresonants seetõttu võimalik.



Joonis 9.22 Aktiivkoormuse mõju paralleelresonantsile

Tähelepanu tuleb pöörata vaeharmonikutele, mille sagedus pole põhiharmooniku suhtes täisarvukordne. Vaeharmonikuid põhjustavad sagedusmuundurid, tsüklokonverterid, induktsioonahjud, keevitusseadmed jm. Vaeharmonikud võivad tekitada elektrivõrgus küllaltki tugeva resonantsi, kui vaeharmonikute sagedus ühtib võrgu resonantssagedusega. Vaeharmonikud põhjustavad ka varelust ning häireid madalasageduslikes kaugjuhtimissüsteemides.

Vahelduvvooluvõrgus võib esineda ka alaliskomponent tingituna geomagnetilistest häiringutest või muundurite asümmeetriast. Alaliskomponent võib põhjustada trafode küllastumist normaaltingimustel, mille tagajärjeks on trafo kuumenemine ning eluea lühenemine. Alaliskomponent võib lisaks elektrolüütiliselt erodeerida maanduselektroode ja muid liiteid.

Normaaltingimustel ei tohi kõrgemate harmoonikute pinge efektiivväärtuse 10-minutiline keskvärtus ületada tabelis 9.2 toodud väärtusi. Kõrgemaid harmoo-

nikuid üle 25. järku, samuti vaeharmonikuid ei normeerita. Üksikute kõrgemate harmoonikute pinge suuremaid väärtusi võib põhjustada resonants. Harmoonmoonutusteguri väärtus ei tohi ületada 8%. Võib vaadelda ka kvaliteedi kõrg- ja normaaltaset:

- kõrgtase – harmoonmoonutustegur $THD \leq 3\%$
- normaaltase – kõik U_h väärtused on tabeli 9.2 kohased ja $THD \leq 6\%$
- standardtase – 95% ajast on U_h väärtused tabeli 9.2 kohased ja $THD \leq 8\%$.

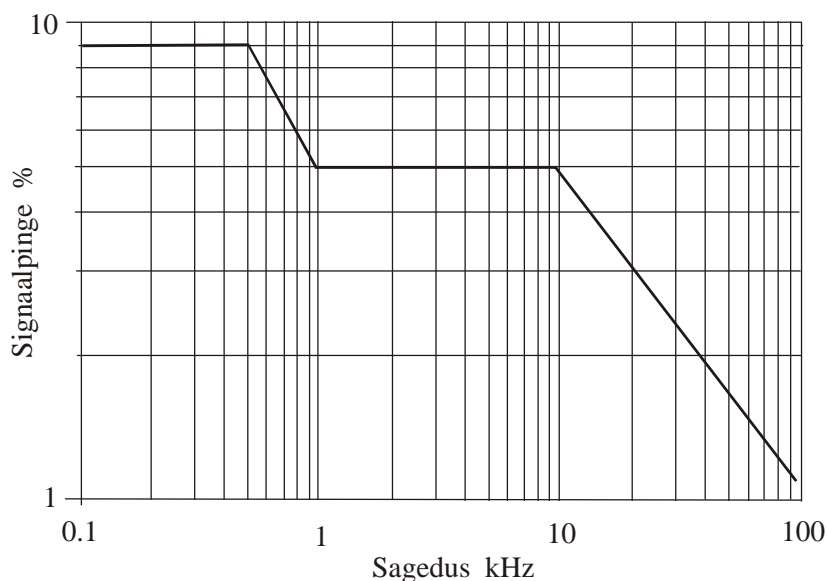
Tabel 9.2 Kõrgemate harmoonikute pinge lubatud väärtused nimipinge suhtes

Paaritud harmoonikud				Paarisharmonikud	
3-ga jagumatud		3-ga jaguvad			
Järk h	Suhteline pingeline U_h %	Järk h	Suhteline pingeline U_h %	Järk h	Suhteline pingeline U_h %
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,5	6...24	0,5
13	3	21	0,5		
17	2				
19	1,5				
23	1,5				
25	1,5				

9.2.7 Signaalpinged

Pinge lainekuju häirivad harmoonikute kõrval ka toitepingele pealdateud signaalpinged teabe edastamiseks elektrivarustusvõrgus ja tarbijapaigaldises. Eestis on kasutusel sel põhimõttel toimivaid elektriarvestite kauglugemissüsteeme.

Jaotusvõrgus eristatakse kolme liiki pealdateud signaalpingeid: madalsageduslikud kaugjuhtimissignaalid sagedusega 110...3000 Hz, kandesagedussignaalid sagedusega 3...148,5 kHz ja võrgu tähistussignaalid (pingekõvera valitud punktile lisatud lühiajalised transiendid). Normatiivide kohaselt ei tohi signaalpinge 3-sekundiline keskmine 99% kestel ööpäevast ületada joonisel 9.23 näidatud piire. Tarbijapaigaldiste toitevõrgus võib kasutada kandesignaale sagedusega 95...148,5 kHz. Signaalide edastamine tarbijate vahel ei ole lubatud. Arvestada tuleb nimetatud sagedusvahemikus pingeline võimaliku efektiivväärtusega kuni 1,4 V. Teistele tarbijatele kuuluvate signaalide segava mõju vältimiseks tuleb kasutada vastavaid kaitsemeid või suurendada oma signaalpaigaldise häiringukindlust.



Joonis 9.23 Madalpingevõrkude lubatav suhteline signaalpinge protsentides nimipinge suhtes sõltuvalt sagedusest

9.3 Toitekatkestused

Tarbija seisukohalt on esmase tähtsusega toite katkematus ehk üldisemalt elektrivarustuspiidevus, mida hinnatakse normaalse toitekatkestuseta talitluse kestuse järgi antud aja vältel. Toitekatkestusi võib liigitada pikkadeks kestusega üle 3 minuti ja lühikesteks. Lühikesed toitekatkestused sarnanevad pingelohkudega (p 9.2.4).

9.3.1 Toitekatkestuse mõiste

Toitekatkestus on standardi EVS-EN 50160 kohaselt seisund, kus pinge on tarnepunktis väiksem kui 1% lepingulisest pingest. Toitekatkestus võib olla plaaniline või ootamatu. Ootamatud toitekatkestused loetakse pikaajaliseks, kui nad kestavad üle 3 minuti. Alla 3 minuti kestvaid katkestusi loetakse lühiajalisteks. Kui seejuures pinge ületab 1%, on tegemist pingehälbega. Plaanilised katkestused on tingitud töödest jaotusvõrgus. Neist teatakse ette, mistõttu tarbijal on võimalik katkestuse kahjusid minimeerida. Ootamatuid katkestusi põhjustavad jaotusvõrguvälised sündmused (nt pikne, kaevetööd) või seadmete rikked. Normaaloludes võib aastas esineda mõnikümmend kuni mõnisada lühiajalist toitekatkestust. Lühiajalisi toitekatkestusi tekitab automaatne taaslülitamine. Ootamatud pikaajalised toitekatkestused on enamasti põhjustatud välistest sündmustest ja toimingutest, mida elektritarbija ei saa vältida.

Normaaloludes võib üle 3 minuti kestvate toitekatkestuste esinemissagedus olla 10...50 korda aastas.

Toitekatkestusega seotud mõisteid.

- **Seisak** ehk **talitluskõlbmatus** (*outage*) – elemendi seisund, milles ta pole võimeline täitma oma funktsioone mõne temaga otseselt seotud sündmuse tõttu. Seisak võib sõltuvalt võrgu konfiguratsioonist põhjustada või mitte põhjustada kliendi toitekatkestuse.
- **Tõrge** või **rike** (*failure*) – elemendi seisund, milles ta pole võimeline täitma oma funktsioone väärtõimimise tõttu. Elemendi tõrke tulemuseks on seisak, kuid seisak võib tekkida ka ilma tõrketa.
- **Sundseisak** (*forced outage*) – hädaolukorrast tulenev seisak, mis nõuab elemendi viivitamatut tööst väljaviimist automaatselt või käsitsi või mis on põhjustatud seadme ebaõigest toimimisest või inimlikust eksimusest. (IEC standardi definitsioon – elemendi talitluskõlbmatus varem mitteplaanitud seisaku tõttu.) Sundseisakud liigitatakse omakorda **mööduvateks sundseisakuteks** (*transient forced outage*) ja **püsisundseisakuteks** (*permanent forced outage*). Mööduva sundseisaku põhjused kaovad iseenesest nii, et talitlusseisundi taastab kohe automaatne taaslülitus või tehakse taaslülitus käsitsi või möödub sundseisak peale sulavkaitsme panuse vahetust. Põhilisteks mööduvate sundseisakute tüüpideks on **seadmete väärtõimimine** (*equipment malfunctioning*) – releede rakendumine siirdevoolude toimel, lülitumised naaberlülitusseadmete tegevusest tingitud voolutugete mõjul, sulavpanuse väsimine; **kiiresti mööduvad rikked** (*fugitive faults*) – okste puuted tuule toimel, lühiajalised maatihendused pikselöögi mõjul, juhtmete kokkupuuted nende hüplemisel ning **kaitse mitteselektiivsusest** tingitud rikked (*reflection of down-line faults*). Püsisundseisaku kõrvaldamiseks on rikkis elementi enamasti vaja remontida või asendada.
- **Plaaniline seisak** (*scheduled outage*) – elektrivõrgu elemendi tööst väljaviimine varem koostatud plaani alusel, kas konstruktiivsetel põhjustel, hooldeks või remondiks. Seisak on plaaniline, kui seda on võimalik edasi lükata. Vastasel korral on tegemist sundseisakuga. Viivitus võib olla vajalik seadmete ülekoormuse või tarbijate toitekatkestuse vältimiseks.
- **Normaalilm** (*normal weather*) – kõik ilmastikuolud, mis ei vasta järgmisele kahele määratlusele.
- **Ebasoodus ilm** (*adverse weather*) – ilmastikuolud, mis põhjustavad ebanormaalselt kõrget sundseisaku määra, kuid mis ei vasta järgmisele määratlusele.
- **Oluline tormikahjustus** (*major storm disaster*) – ilmastikuolud, mis väljuvad projekteerimismidest ja mille puhul esinevad
 - o ulatuslikud mehaanilised vigastused
 - o normaalsest suurema hulga tarbijate toitekatkestused

- o normaalsest pikemad taastamisajad (tavaliselt üle 24 tunni).
- **Lülitusaeg** (*switching time*) – ajavahemik hetkest, mil lülitamine on vajalik, hetkeni, mil see on realselt toimunud.
- **(Tõrketa) talitusaeg** (*exposure time*) – aeg, mille kestel element täidab oma funktsioone ja võib minna sundseisakusse.
- **Seisakusagedus** ehk **seisakuintensiivus** (või ka tõrkesagedus ehk tõrkeintensiivus) (*outage rate, failure rate*) – seisakute arv talitlusaja ühiku (tavaliselt aasta) kohta. Võib olla määratud erinevate seisakuliikide ja ilmastikuolude jaoks (nt püsivseisakute sagedus normaalilmastiku korral) (*normal weather permanent forced outage rate*).
- **Seisakuaeg (kestus)** (*outage duration*) – aeg elemendi seisaku algushetkest hetkeni, mil element on jälle võimeline täitma oma funktsioone. (*IEC* definitsioon – aeg antud ajavahemikul, mille kestel element pole võimeline täitma oma funktsioone.) Võib olla määratud erinevate seisakuliikide jaoks
- **Katkestus** (*interruption*) – ühe või mitme kliendi elektrivarustuse kadumine ühe või mitme elemendi seisaku tõttu. Katkestused liigitatakse sõltuvalt neid põhjustanud seisaku liigist:
 - o **sundkatkestus** (*forced interruption*) – katkestus, mille on põhjustanud sundseisak
 - o **plaaniline katkestus** (*scheduled interruption*) – katkestus, mille on põhjustanud plaaniline seisak.
- **Katkestuskestus** (*interruption duration*) – aeg tarbija elektrivarustuse katkemise hetkest kuni selle taastumiseni. Sõltuvalt kestusest kannab nimetust
 - o **lühikatkestus** (*momentary interruption*) – määratud kestusega katkestus, mis on vajalik toite automaatseks või käsitsi taastamiseks (nt 5 min)
 - o **kestevkatkestus** (*sustained interruption*) – katkestus, mis ei vasta eelmisele definitsioonile.
- **Elektrivarustuskindlus** (*reliability of power supply*) ehk **toitepidevus** (*service continuity*), ka **teeninduse töökindlus** (*service reliability*) on seotud klientide vajaduste ja nõudmistega. Toitepidevust hinnatakse järgmiste näitajatega:
 - o **toitekatkestuste erisagedus SAIFI** (*system average interruption frequency index*) – aasta või muu ajavahemiku T toitekatkestuste arvu ja selle aja jooksul teenindatud klientide keskmise arvu N_S suhe, kui i -ndal kliendil on olnud n_i katkestust

$$f_{CS} = \frac{\sum_i n_i}{N_S T}$$

- o **toitekatkestuse keskmine kestus kliendi kohta SAIDI** (*system average interruption duration index*), kui t_{ij} on i -nda kliendi j -nda katkestuse kestus

$$U_{CS} = \frac{\sum_i \sum_j t_{ij}}{N_s T}$$

- o **kliendi toitekatkestuse keskmine kestus CAIDI** (*customer average interruption duration index*), kui j -nda kliendi katkestuste arv on n_j

$$T_l = \frac{\sum_i \sum_j t_{ij}}{\sum_j n_j}$$

Toitepidevusnäitajad leitakse elektrikatkestuste statistiliste andmete alusel. Need võimaldavad võrrelda jaotusvõrke ja piirkondi või elektrivarustuskindluse muutumist aastate kaupa. Ennekõike võib nende näitajate abil hinnata töökindluse tõstmiseks rakendatud meetmete tõhusust. Tüüpiliselt eesmärgiks seatud SAIFI, SAIDI ja CAIDI väärtused on vastavalt 1.0, 1.0...1,5 h, ja 1.0...1.5 h. Analoogilised näitajad T-SAIFI, T-SAIDI ja T-CAIDI võib leida jaotusvõrgu mingi osa, näiteks toitealajaama teatud piirkonna kohta. Kasutusel on muidki katkestustega seotud näitajaid.

9.3.2 Pikad toitekatkestused

Pikkadel toitekatkestustel on elektri kvaliteedi seisukohalt määrav tähtsus. Oluline on nii toitekatkestuste esinemise sagedus kui nende kestus. Umbes 90% katkestustest leiab aset keskpingevõrgus, ülejäänud 10% madalpingevõrgus.

Pikad toitekatkestused on kas plaanilised või tingitud püsirikkest. Rikke korral lülitab relekaitse fiidri välja ja toiteta jäävad kõik selle fiidriga seotud tarbijad. Enne kui selgub, et tegemist on püsirikkega, toimub tavaliselt kiirtaaslülitus ja seejärel viittaaslülitus pingega pausiga umbes 0,3 s ja 1...2 min. Püsirikke korral tuleb kiiresti välja selgitada rikke koht, isoleerida rike ja seal, kus võimalik, taastada toide. Kui esialgu jäi toiteta näiteks sadu tarbijaid, siis peale vea isoleerimist ehk kümnekond. Otsustavaks on vea asukoht ja võrgu konfiguratsioon, mis muuhulgas peaks võimaldama toite ümberkorraldamist teiste fiidrite kaudu. Enamikule tarbijatest kujuneb katkestuse ajaks toite taastamise aeg, ülejäänud tarbijatele aga remondiks kuluv aeg.

Plaanilised katkestused puudutavad tavaliselt vähem tarbijaid kui katkestused rikete korral. Ka võib töid teha ajal, mil see tekitab tarbijatele kõige vähem ebameeldivusi. Plaaniliste katkestuste kahju vähendab oluliselt nendest ette-teatamine.

Toitekatkestuste kahju on raske kvantitatiivselt määrata. Vaid andmata jäänud toodangut ning tootmisega seotud muid ebakohti (praak, seadmete rikked) võib ligikaudu hinnata. Seevastu kommunaaltarbijatele tekitatud kahjud ei ole sageli rahas väljendatavad. Kahju sõltub nii katkestuste arvust kui nende kestusest. Katkestuste sagedust mõjutavad järgmised tegurid:

- jaotusvõrgu tüüp ja liinide pikkus (õhuliinid, õhukaablid, maakaablid)
- neutraali maandamisviis
- liigpingekaitse tüüp
- releekaitse struktuur ja sätted
- maastiku tüüp
- ilmastik (pikne, talv)
- loomade rohkus.

Toitekatkestuste vähendamise meetmed on kulukad ja jäävad enamasti võrgu-ettevõtete kanda. Ka tarbijad võivad katkestuste tekitatud kahju vähendada, hankides näiteks puhvertoiteallikaid (*UPS*).

Toitekatkestuste sagedusele mõjub oluliselt võrgu topoloogia ja neutraali kompenseerimisviis. Kui liinilõikude pikkused on väikesed ning liinide ja lülituspunktide arv suur, on toidet kergem taastada. Kompenseeritud neutraaliga võrgus ei nõua ühefaasiline maaühendus toite katkestamist. Maa- ja õhukaablite laialdane kasutamine ning õhuliinitrasside korrashoid vähendab rikkeid. Kui lubada jaotusvõrgul lühiajaliselt töötada silmusskeemis, võib teha ümberlülitusi tarbijaid välja lülitamata ning vältida plaanilisi katkestusi. Oluline on seadmete hooldus ja õigeaegne uuendamine.

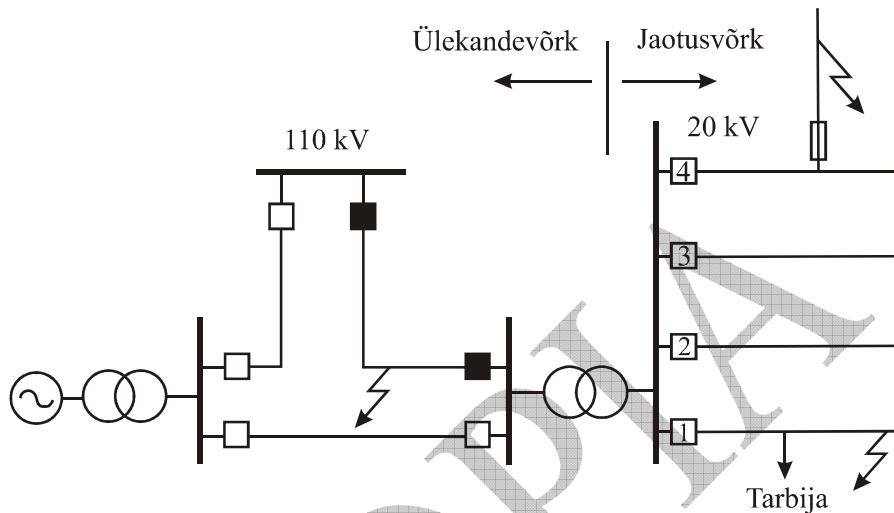
Katkestuste kestus sõltub vea asukoha leidmise ja ümberlülituste tegemise ajast. Oluline on rakendada vajaliku tasemega jaotusvõrgu talitluse tugisüsteemi (*DMS*). Otsustava tähtsusega on kaugjuhitavad lülituspunktid ja kaugjälgitavad rikkeindikaatorid. Eriti efektiivsed on need seadmed maapiirkondades.

Nõuded toitekatkestuste suhtes fikseeritakse võrguettevõtte ja tarbija vahelises lepingus. Määratakse kindlaks trahvid, mida võrguettevõtte peab maksma, kui katkestuse aeg ületab kriitilise väärtuse. Nii kriitiline aeg kui leppetrahvi suurus sõltuvad tarbija tüübist (nt kodu- või tööstustarbija). Kõrgema elektrivarustuskindlusega võrguteenuse puhul, mille eest klient maksab kõrgemat hinda, on kriitilised katkestusajad lühemad. Leppetrahve ei maksta, kui katkestuse on põhjustanud vääramatu jõud (nt tormituul kiirusega üle 24 m/s), erakorralised piiramised (süsteemihalduri tegevus, mis on sätestatud elektrituruseaduses) või kliendi süü.

9.3.3 Lühikesed toitekatkestused

Lühikesi toitekatkestusi tekitavad enamasti rikked elektrivõrgus. Keskpinge-võrgu õhuliinide rikestest 90% on mööduvad ning kaovad taaslülituse toimel. Kiirtaaslülituse tulemusel kaob 75% rikestest, ülejäänud 15% likvideerib

viittaaslülitus. Vaid 10% õhuliinide riketest on püsivad. Kiirtaaslülituse 0,3...0,4 s pausi ja viittaaslülituse 1...2 min pausi ajaks jäävad toiteta vastava fiidri tarbijad. Seevastu lühise ajal, mille kestus oleneb relekaitse toimest, tekib pingelohk, mis puudutab kõiki toitepiirkonna tarbijaid.



Joonis 9.24 Rikkekohad võrguettevõtte elektrivõrgus

Joonisel 9.24 esitatud skeemil kogeb fiidri 1 tarbija rikke hetkel pingelohku ja sellele järgnevat toitekatkestust juhul, kui rike leiab aset samal fiidril. Fiider lülitatakse välja relekaitse toimetel, järgneb taaslülitamine. Kui rike on ajutine ning taaslülitamine edukas, siis on katkestus lühiaegne. Tavaliselt on pingelohu kestuseks 5...6 perioodi (0,10...0,12 s), mille jooksul võimsuslüliti avaneb. Järgneva toitekatkestuse pikkus sõltub relekaitse sätetest ning võib ulatuda 12 perioodist kuni 5 sekundini sõltuvalt relekaitse tööpõhimõttest. Pikema katkestuse ajal lülituvad tundlikud tarvitid kindlasti välja. Sagedasemad on rikked teistel jaotusvõrgu fiidritel või ülekandevõrgus. Tarbija tajub pingelohku kõikidel juhtudel seni, kuni rike võrgust eraldatakse. Rikke eraldamine võib toimuda ka sulavkaitsmega, nagu on näidatud fiidril 4. Tarbija normaalne pinge taastub, kui rikke koht võrgust eraldatakse. Kuna ülekandevõrgus on tegemist paralleelliinidega, lülitub lühise korral vigane liin välja ning tarbijate varustamine elektriga jätkub teise ahela kaudu. Sel juhul, aga ka rikke korral mõnel teisel fiidril, tajuvad tarbijad ainult pingelohku, toitekatkestust ei toimu.

Taaslülituste sagedust vähendavad oluliselt maakaablid. On täheldatud, et kui kaabelliinide osa jaotusvõrgus tõsta 30 protsendini, väheneb taaslülituste arv poole võrra võrreldes sellega, kui kasutusel on vaid õhuliinid. Taaslülitusi vähendavad ka õhukaablid, liinitrasside puhastamine puudest jm. Taaslülitust rakendatakse ka ühefaasilistel lühistel, kui lühisvoolud on suured. Siin vähendab taaslülituste sagedust neutraali kompenseerimine.

Taaslülitustega seotud lühikeste toitekatkestuste kahju määramine on problemaatiline. Kuna katkestuse kestusel ei ole siin erilist tähtsust, võib kahju hinnangu siduda vaid tarbija võimsusega, mitte niivõrd andmata jäänud energiaga. Võimalik on esitada piiranguid taaslülituste arvu kohta teatud ajavahemikus. Näiteks Soomes soovitatakse, et kiirtaaslülituste arv ei tohiks olla üle 50 aastas ja üle 25 kuus, asulates ning maal vastavalt 100 ja 50. Kiired taaslülitused tekitavad kahju põhiliselt tööstusettevõtetele. Väiketarbijatele võivad need ka märkamata jääda.

9.4 Elektri kvaliteedi vajalikkus

Elektri kvaliteedi kõrvalkallete mõju on mitmesugune. Osa neist, nagu toodangu vähenemine ja praak, kaitsmete ja juhtimisseadmete väärtoiming jm, on võimalik majanduslikult hinnata. Seevastu ülemääraste energiakadude, seadmete enneaegse vananemise jms mõju on raske hinnata.

Pingelohkude ja toitekatkestuste suhtes on kõige tundlikumad pidevad tootmisprotsessid (trükimasinad, tootmisliinid, paberiveskid), valgustus ja turvaseadmed (haiglad, lennujaamad, ühiskondlikud hooned), arvutid (arvutuskeskused, pangad, sidesüsteemid), aga ka elektrijaamade omatarbeseadmed. Sõltuvalt pingelohu või katkestuse kestusest ning asünkroonmasina ja töomasina karakteristikust võib asünkroonmasin seiskuda hoolimata toitepinge taastumisest. Peale pikaajalist toitekatkestust, kus kõik asünkroonmootorid on seiskunud, ei ole mootorite üheaegne käivitumine suure käivitusvoolu tõttu võimalik. Välja võivad lülituda ka mootorite kontaktorid ja muud juhtimisseadmed. Arvutid ja muud mikroprotsessoripõhised mõõte- ja juhtimisseadmed on tundlikud nii pingelohkude kui toitekatkestuste suhtes. Võib esineda väärtoiminguid ning seiskumisi, mille tulemusena läheb kaduma andmeid ja katkeb juhtimine.

Kõrgemad harmoonikud põhjustavad energiakadusid, seadmete ülekuumenemist, liigpingeid ning vibratsiooni ja mehaanilisi pingeid. Ohustatud seadmeteks on kondensaatorpatareid, trafod ja mootorid, kus kõrgemad harmoonikud põhjustavad lisakadusid, ülekuumenemist ja ülekoormust. Lisaks võivad vooluharmoonikud põhjustada interferentsi telekommunikatsiooniliinides ning vigu elektrimõõteseadmetes.

Liigpinged kahjustavad isolatsiooni ja põhjustavad läbilööke, isolatsiooni vananemist, juhtimisseadmete väärtoiminguid ning elektrodünaamilisi ja termilisi pingeid. Välgust tekitatud liigpinged seonduvad ennekõike õhuliinidega. Seevastu lülitustest tingitud liigpinged võivad esineda kõikjal ja on tunduvalt sagedasemad kui välguliigpinged.

Pingehälbed võivad tekitada probleeme, kui nad ületavad $\pm 10\%$. Flicker mõjub häirivalt nägemisaistingule, väsitab silmi ja tekitab stressi. Toitepinge

asümmeetria põhjustab lisakadusid ja kuumenemist kolmefaasilistes elektrimasinates.

Tundlikkus häiringutele Seadmed	Pingelohud		Liipinged	Harmonikud	Ebasümmeetria	Pinge fluktuatsioonid
	< 0,5 s	> 0,5 s				
Asünkroonmootor		■		■	■	
Sünkroonmootor		■		■	■	
Aktuaator		■		■	■	
Elektrijam	■	■	■	■	■	
Arvutuskeskus	■	■	■	■	■	
Induktsioonahi			■	■	■	
Valgustus			■	■	■	■
Kondensaatorpatari			■	■	■	
Trafo			■	■	■	
Vaheldi	■	■			■	
Võimsuslüüti			■	■	■	
Kaabel			■	■	■	

Joonis 9.25 Elektri kvaliteedihäiringute mõju

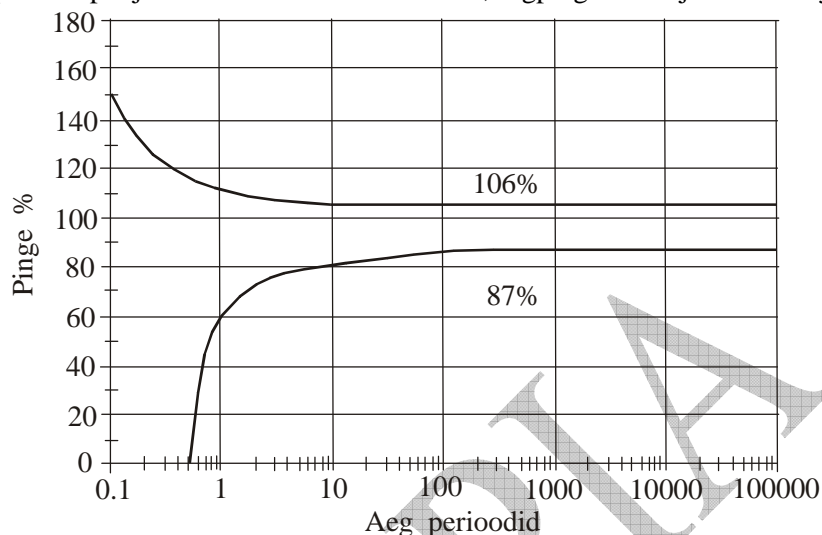
Kokkuvõtlikult näeb elektri kvaliteedihäiringute mõju joonisel 9.25. Allpool vaadeldakse lähemalt nõudeid tundlike seadmete toiteks ning pingelohkude ja lühiajaliste elektrikatkestuste ning harmoonikute mõju.

9.4.1 CBEMA- ja ITI-kõverad

Levinud näidik elektri kvaliteeti hindamisel on *CBEMA*-kõver (*Computer and Business Equipment Manufacturers Association, CBEMA*). See kõver (joonis 9.26) võeti kasutusele 1980. aastate alguses kirjeldamaks, kuidas arvutid taluvad toitepinge muutuste ulatust ja kestust. Hoolimata sellest, et tänapäeva arvutite tolerantsid on palju suuremad, on nendest kõveratest saanud tundlike seadmete projekteerimise lähtekoht ning üldlevinud formaat elektri kvaliteedi mõõteandmete analüüsimisel.

Joonise teljed kujutavad pingehälvete ulatust ja kestust. Kahe joone vahele jääb ala, kus seadmed peaksid tõrgeteta töötama. Olukorrad, mis asuvad allpool alu-

mist joont, põhjustavad seadmete väljalülitusi. Ülemisest joonest kõrgemal asuvad punktid põhjustavad isolatsiooni üelööke, liigpingelist väljalülitumist jm.

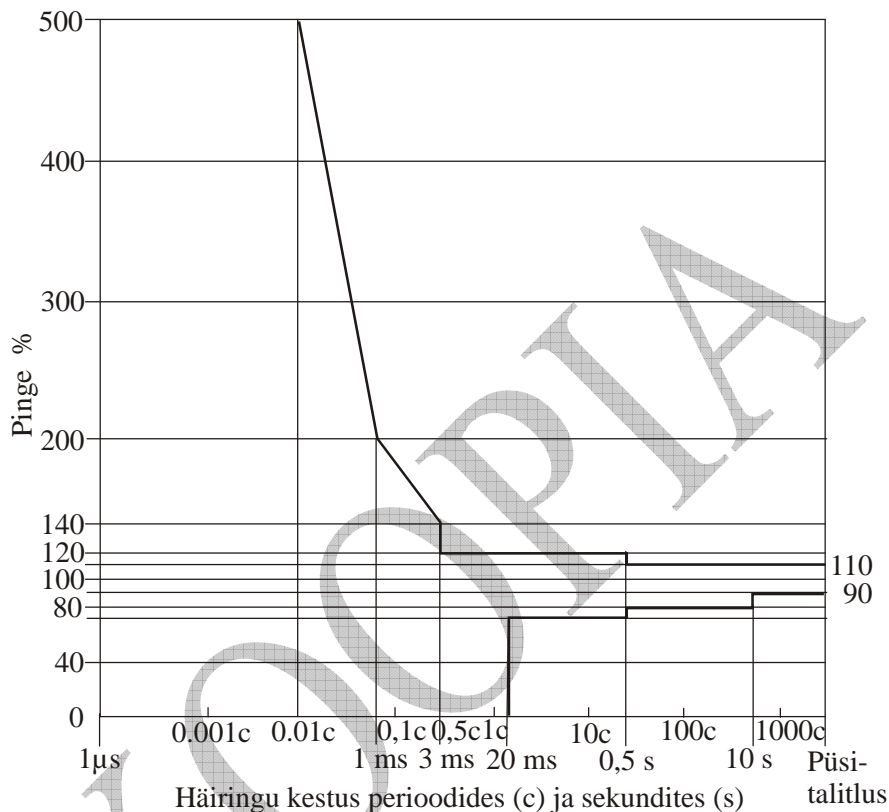


Joonis 9.26 CBEMA-kõver elektri kvaliteedi hindamiseks

Tänapäeval on *CBEMA* asendatud organisatsiooniga *ITI (Information Technology Industry Council)* ning kasutusel on *CBEMA*-kõverate suhtes mõnevõrra modifitseeritud *ITI*-kõverad (joonis 9.27). Ka need kõverad on välja töötatud arvutite tarvis, kuid neid kasutatakse elektri kvaliteedi hindamiseks ka muudes olukordades. Vormiliseks erinevuseks *CBEMA*- ja *ITI*-kõverate vahel on see, et *CBEMA*-kõverad on pidevad, *ITI*-kõverad seevastu tükati pidevad funktsioonid. Tolerantsid on mõlema kõvera korral ligikaudu ühesugused.

ITI-kõveratel esitatud piirid on defineeritud seitsme võimaliku häiringutüübi kohta. Esimeseks on püsitalitluse piirkond, mis kujutab pinge efektiivväärtuse muutust $\pm 10\%$ ulatuses tema nimiväärtusest. Pinge selles piirkonnas võib püsida piiramatult aega kas siis aeglaselt muutudes või konstantse väärtusena. Järgneb piirkond, mis iseloomustab pinge efektiivväärtuse tõusu kuni 120% nimiväärtusest kestusega kuni $0,5$ s. Selline olukord võib tekkida, kui võrgust eemaldatakse suur koormus. Kolmandaks on madalsageduslik kahaneva laine piirkond, mis kirjeldab kahanevat transienti, kui toimub näiteks kondensaatorpatarei ühendamine elektrivõrguga. Sellise transiendi sagedus võib olla 200 Hz kuni 5 kHz olenevalt võrgu resonantssagedusest. Eeldatakse, et tekkiv transient kaob täielikult poolperioodi jooksul ning esineb pingelaine amplituudi lähedal. Transient muutub vahemikus 140% sagedusega 200 Hz kuni 200% sagedusega 5 kHz. Neljandaks piirkonnaks on tüüpiliselt välgu tagajärjel tekkiv transient, mida iseloomustatakse amplituudi ja kestusega, mitte efektiivväärtusega. Viies ja kuues piirkond vastab 80% ja 70% ulatusega pingelohkudele tüüpilise kestusega 10 ja $0,5$ sekundit. Need pingelohud tekivad suurte koormuste lülita-

misest ja rikest võrgus. Seitsmes piirkond hõlmab tekkivaid rikkeid ning järgnevaid rikete kadumisi. Siia kuuluvad nii pingelohud kui ka katkestused, millele järgneb kohe pinge nimiväärtuse taastumine. Kestuseks võib olla kuni 20 ms.



Joonis 9.27 ITI-kõver elektri kvaliteedi hindamiseks

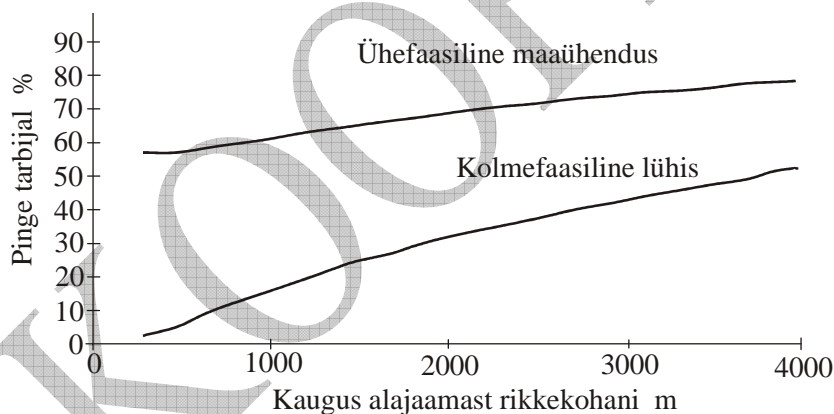
CBEMA- ja ITI-kõverad vastavad IEEE/ANSI standardile ning on eelkõige mõeldud 60 Hz 120 V süsteemi tarvis. IEC standardi kohane on SEMI F47 kõver, mis iseloomustab samal viisil pinge häiringu kestuse ja ulatuse mõju seadmetele.

9.4.2 Pingelohud ja lühikesed toitekatkestused

Valgustus- ja turvaseadmete ning arvutite ja muude mikroprotsessorseadmete kõrval võivad pingelohkude ja toitekatkestuste suhtes olla tundlikud asünkroonmasinad. Pinge langemisel suureneb asünkroonmasina libistus ja väheneb tema maksimaalmoment võrdeliselt pinge ruuduga. Sõltuvalt pingelohu või katkestuse kestusest ning asünkroonmasina enda ja töömasina karakteristikust võib asünkroonmasin seiskuda hoolimata toitepinge taastumisest. Asünkroonmasina libistuse suurenemine toob kaasa tema reaktiivvõimsuse tarbimise

kasvu, põhjustades pingekao suurenemist elektrivõrgus. Tulemuseks võib olla pinge tunduv langemine ja mootorite seiskumine elektrivõrgu suures osas. Teisisõnu, pingelohk või lühiajaline toitekatkestus võivad põhjustada pinge mittestabiilsust. Peale pikka toitekatkestust, kus kõik asünkroonmootorid on seiskunud, ei ole võimalik mootoreid ühel ajal käivitada suure käivitusvoolu tõttu. Lühiajaline toitekatkestus võib seisata ka sünkroonmasinad, mille maksimaalmoment on võrdeline pingega. Juhtub ka nii, et pinge taastumisel on sünkroonmasina rootor vastufaasis staatori magnetväljaga, mis kutsub esile nimivooluga võrreldes mitmekordse voolutõuke. Välja lülituda võivad ka mootorite kontaktorid ja muud juhtimisseadmed. Igal juhul põhjustavad pingelohud ja toitekatkestused mootorites suuri elektrodünaamilisi jõude ja töomasinates mehaanilisi lööke.

Elektritarbijale avaldavad rikked mõju nii põhi- kui jaotusvõrgus. Rikke korral jaotusvõrgus on oluline, kas rike on samal fiidril kus tarbijagi või kõrvalfiidril. Lühis kõrvalfiidril mõjutab tarbijat toitealajaama lattide pinge kaudu. Nimetatud pinge sõltub rikke impedantsist ja asukohast ning elektrivõrgu konfiguratsioonist ja võrgu releekaitsest. Joonisel 9.28 on näide rikkekoha kauguse ja rikke tüübi mõjust radiaalse konfiguratsiooniga jaotusvõrgus.

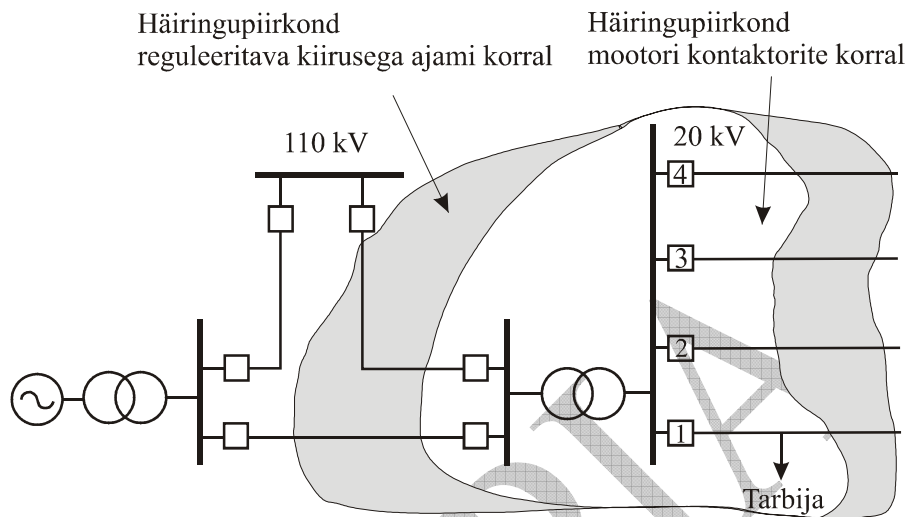


Joonis 9.28 Näide pingelohu ulatusest tarbija juures funktsioonina rikkekoha kaugusest paralleelfiidris

Pingelohkude mõju iseloomustab mõiste häiringupiirkond. Selle mõiste kohaselt hinnatakse tõenäosust, mille korral tundlikele seadmetele rakenduv pinge on madalam kui selle seadme minimaalne pingelohu läbimisvõime piir. Seadme pingelohu läbimisvõime all mõistetakse mingi seadme pinge vähimat väärtust, mille jooksul ta suudab töötada ilma häireteta (väärtöötamine või väljalülitumine). Joonisel 9.29 on jaotusvõrgust toidetava tarbija häiringupiirkond mootori kontaktorite ja reguleeritava kiirusega ajami koormuste korral.

Elektritarvitite tundlikkus pingelohkudele on erinev. Enamasti avaldab mõju pingelohu kestus ja ulatus. Oluline võib olla ka faasinihe ja asümmeetria

pingelohu ajal ning pingelohu algus- ja lõpp-punkt pingekõveral.



Joonis 9.29 Häiringupiirkonnad

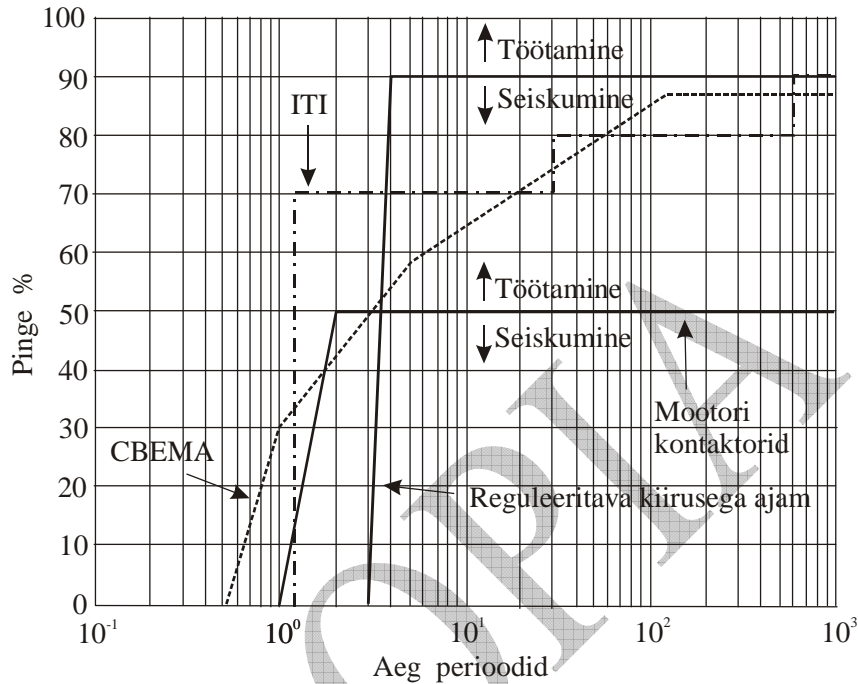
Pingelohutundlikkuse järgi võib seadmeid jaotada kolme rühma:

- Seadmed, mis on tundlikud ainult pingelohu ulatuse suhtes. Selle rühma seadmed on tundlikud vähimale või suurimale pingele, mis pingelohu või pingetõusu ajal esineb. Pingelohu kestus on nende seadmete juures teisejärguline. Siia kuuluvad näiteks alapingereleed, elektriagamite juhtimisüsteemid ning mitmesugused automatiseeritud masinad.
- Seadmed, mis on tundlikud nii pingelohu ulatuse kui ka kestuse suhtes. Rühma kuulub enamik seadmeid, mille toiteskeemides kasutatakse jõuelektronikat. Nende seadmete korral toimub seadme väärtöö või väljalülitumine, kui toiteallika väljundpinge langeb allapoole määratud väärtusi ja kestab kauem määratud ajast. Seega on sellesse rühma kuuluvate seadmete oluliseks karakteristikuks aeg, mille jooksul pinge efektiivväärtus langeb allapoole kriitilist piiri.
- Seadmed, mis on tundlikud faasinihkele ja asümmeetriale pingelohu ajal. Selliseid seadmeid on vähe.

Seadmete tundlikkust pingelohu suhtes iseloomustavad pingelohu läbimise võime ulatuskestuse kõverad. Joonisel 9.30 on sellised kõverad kontaktorjuhtimisega elektrimootorite ja sätestatava kiirusega ajamite kohta. Esitatud on ka *ITI*- ja *CBEMA*-kõverad.

Pingelohu mõju hindamiseks on kasutusel arvutusprogrammid, mille abil on võimalik leida pinge väärtusi rikete toimumise hetkel ja järel ning kahjustatud piirkonnad. Lähteandmeteks on fiidrite arv toitealajaamas, nende pikkus ja

reaktants, trafode lülitusgrupid, võrgu neutraali talitus, võrgu releekaitse omadused, rikke (lühise) tüüp jm. Arvestada tuleb ka ülekandevõrgu riketega.



Joonis 9.30 Tüüpilised seadmete pingelohu eduka läbimise võime kõverad

9.4.3 Harmoonikute tagajärjed

Mittelineaarsete koormuste põhjustatud vooleharmoonikud avaldavad mõju mitmele elektrivõrgu komponendile. Kondensaatorpatareides, trafodes ja mootorites põhjustavad kõrgemad harmoonikud lisakadusid, ülekuumenemist ja ülekoormust. Harmoonikute mõju elektritarvititele on võimalik vahetult jälgida. Seevastu termiline mõju ja mõju isolatsioonile avaldub alles aastate jooksul.

Normatiivide kohaselt ei tohi harmoonikuid iseloomustav harmoonmoonutus-egur ületada 8%, kuid probleemid tekivad juba siis, kui see tegur on 5...6% (tabel 9.3). Tabelis

$$HVF = \sqrt{\sum_{h=2}^{13} U_h^2 / h}$$

on harmoonikute variatsioonitegur (*harmonic variation factor*).

Kondensaatorpatareide reaktants väheneb pöördvõrdeliselt sagedusega. Tulemuseks võivad olla suured vooleharmoonikud, mis koormavad üle kondensaatorpatareid ja võivad põletada läbi sulavkaitsmed. Harmoonikud tõstavad dielektrikuskadusid, mis põhjustab täiendavat soojenemist ja kondensaator-

patarei eluea lühenemist. Kondensaatorpatareid koos toiteallika induktiivsusega võivad moodustada paralleelresonantsahela. Resonantsi korral harmoonikud võimenduvad ning nende põhjustatud pinged ületavad oluliselt nimipingeid. Tulemuseks on kondensaatorpatarei rikked või sulavkaitsmete läbipõlemine.

Tabel 9.3 Kõrgemate harmoonikute toime

Seadmed	Mõju	Piirid
Kondensaatorpatareid	Kuumenemine, vananemine, resonants	$I < 1,3 I_N$ ($THD_I < 83\%$) või $U < 1,1 U_n$
Mootorid	Kaod ja ulatuslik kuumenemine Kasutatava võimsuse vähenemine Pulseeriv pöördemoment (vibratsioon, mehaaniline stress) Müra	$HVF \leq 2\%$
Trafod	Kaod ja kuumenemine Mehaaniline vibratsioon Müra	
Võimsuslülitid	Soovimatu väljalülitumine (pinge amplituudväärtuse ületamine jne)	$U_h / U_l \leq 6 \dots 12\%$
Kaablid	Täiendavad dielektrilised ja oomilised kaod	$THD_U \leq 10\%$, $U_h / U_l \leq 7\%$
Arvutid	Talitluse probleemid	$U_h / U_l \leq 5\%$
Jõuelektroonika	Lainekujust tingitud probleemid (kommutatsioon, sünkroniseerimine)	

Trafodel, mis talitlevad kõrgemate harmoonikute tingimustes, tekivad täiendavad kaod, mille tagajärjel trafod kuunenevad üle ning nende eluiga lüheneb. Võimalik on resonants trafo induktiivsuse ja võimsusteguri parendamiseks kasutatava kondensaatorpatarei vahel. Teatud lülitusgruppide korral suurenevad voolud trafo neutraalis.

Pöörlevate masinate korral suurenevad harmoonikud vases- ja rauaskadusid ning masinad kuunenevad. Harmoonikute ja põhikomponendi magnetvälja vastastikusest toimest tingituna tekib masina võllil pulseeriv pöördemoment.

Harmoonikud mõjutavad ka võimsuslülitite lahutusvõimet ning releesid, mis reageerivad pingele või voolu amplituud- või nullväärtusele. Maaühendusreleed ei suuda vahet teha põhiharmooniku ja kolmandatest harmoonikutest tingitud nulljärgnevusvoolude vahel. Tulemuseks võib olla seadme ekslik väljalülitamine.

mine. Mõõteseadmete reageering mittesiinuselistele signaalidele erineb. Harmoonikud kahjustavad elektroonikaseadmete ja juhtimisahelate tööd.

9.5 Elektri kvaliteedi kindlustamine

Elektri kvaliteeti kindlustavad kolm osapoolt: häiringute põhjustajad, häiringutundlikud tarbijad ja elektrivõrk. Võtmepositsioonil on elektrivõrk, mille tugevdamine ja töökindluse tõstmine väldib enamikku ebasoovitavatest nähtustest. Elektrivõrgus rakendatavad abinõud, nagu ülekandeseadmete tugevdamine ja lisamine, reservliinide ehitamine jms, on aga kulukad. Tunduvalt odavamad on mitmesugused aparatuursed lahendused tarbijate juures. Pingelohkude ja toitekatkestuste kahjulikku mõju vähendavad reservtoiteseadmed, mis toimivad akumulaatorpatareide või diiselagregaatide toel. Kasutusel on ka kondensaatorpatareid, hoorattad jm. Arvutite ja muude väikese võimsusega tarvitite juures on laialt levinud puhvertoiteallikad (*uninterruptible power supply, UPS*).

9.5.1 Elektri kvaliteedi mõõtmine

Selleks et objektiivselt hinnata elektri kvaliteeti ja kavandada meetmed selle tõstmiseks, on vaja asjakohaseid mõõtmisi. Elektri kvaliteeti mõõdetakse mõõturitega, mis võivad olla

- teistsaldatavad, kus samasse komplekti kuuluvad nii mõõte- kui kuvamisseadmed
- analüsaatorid, mis mõõdavad kvaliteedinäitajaid ja edastavad need töötlemiseks (süle)arvutisse
- integreeritud mõõturid, kus kvaliteedinäitajate registreerimine on lisatud seadme (arvesti, kohtterminal jm) muudele tegevustele.

Teisaldatavad mõõturid on ette nähtud kvaliteedi üksikute kõrvalekallete põhjalikuks uurimiseks. Mõõturite hind on suhteliselt kõrge. Kvaliteedi pidevaks jälgimiseks on otstarbekas kasutada integreeritud mõõtureid, sest sel juhul jagunevad kulutused mitme eesmärgi vahel. Tegemist on mikroprotsessoripõhise multifunktsionaalse arvestiga, mis aktiiv- ja reaktiivvõimsuse kõrval registreerib ja salvestab mällu veel pinge, voolu ja sageduse väärtuse, pingemuutused, pingelohud ja väreluse, pinge vastujärgnevus-, null- ja alaliskomponendi väärtused jm, samuti andmed toitekatkestuste kohta. Andmed säilitatakse mõõturi mälu ja edastatakse nõudmisel telefoni- või GSM-võrgu kaudu andmebaasiserverisse.

Selleks et saada kvaliteedinäitajate õigeid väärtusi, tuleb neid mõõta ettenähtud ajavahemiku jooksul ja seiret korraldada vajalikul ajal. Olenevalt kvaliteedinäitajatest ulatuvad ajavahemikud standardi EVS-EN 50160 kohaselt ühest päevast ühe aastani (tabel 9.4). Mõõteandmeid töödeldakse programmiga, mis esitab tulemused kvaliteediraporti näol. Kvaliteediraportid kujundatakse tabelitena või diagrammidena, kus on ära näidatud erinevate kvaliteedinäitajate

registreeritud väärtused ja võrreldud neid kvaliteedistandardi poolt kehtestatud piirväärtustega.

Tabel 9.4 Standardi EN 50160 kohased ajaintervallid ja ajavahemikud

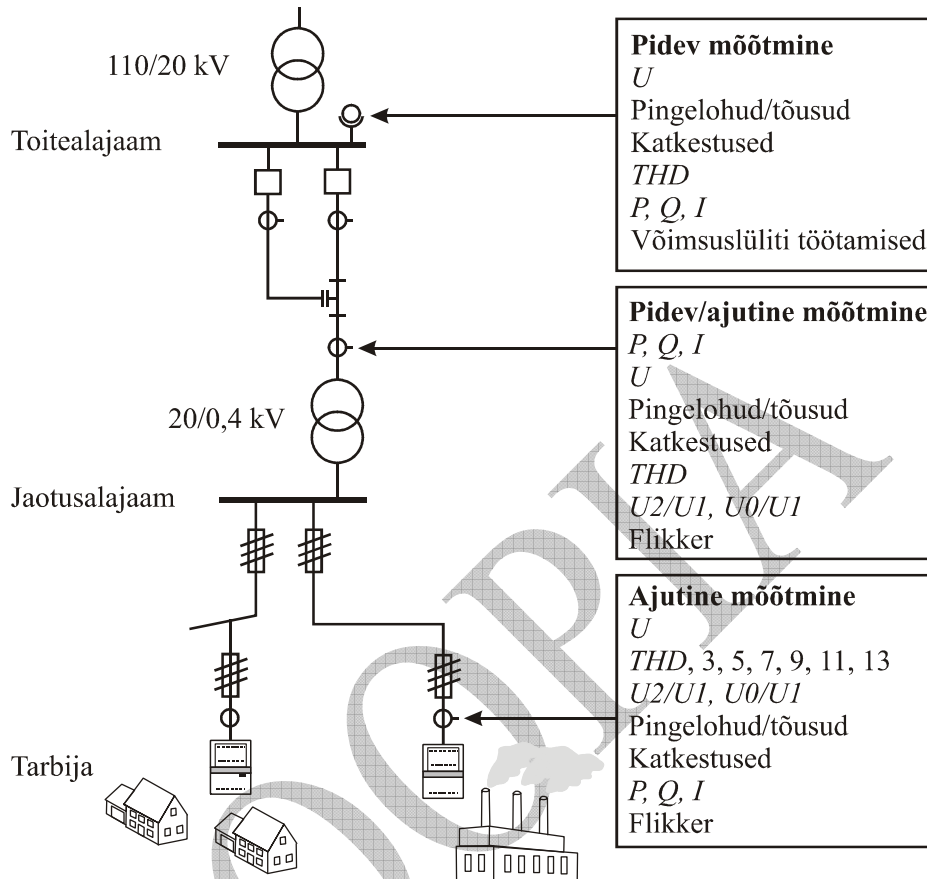
Suurus	Intervall	Ajavahemik
Sagedus Hz	10 s	1 aasta
Pinge V	Pidev	
Pingemuutused V	10 min	1 nädal
Pinge kõikumine tk		1 päev
Pinge värelostegur	10 min	1 nädal
Pingelohud tk		1 aasta
Lühiajalised katkestused tk		1 aasta
Pikaajalised katkestused tk		1 aasta
Liigpinged kV		
Transientliigpinged kV		
Pinge asümmeetria %	10 min	1 nädal
Harmoonmoonutustegur	10 min	1 nädal
Signaalpinge %	3 s	1 päev

Selleks et õigel ajal avastada kõrvalekalded elektri kvaliteedis ja välja selgitada nende põhjused, läheb vaja seiresüsteemi. Seiresüsteem tugineb statsionaarselt paigaldatud multifunktsionaalsetele mõõturitele. Mõõteandmed edastatakse andmeedastussüsteemi kaudu keskusesse, kus andmeid töödeldakse. Kvaliteedi seiresüsteemi ülesanne on

- koguda ja ühtlustada erinevate kvaliteedimõõturitega saadud andmed
- salvestada andmed nii, et neid oleks võimalik kasutada erinevatel eesmärkidel
- koostada kvaliteediraport, mis sobib nii tarbijatele ja projekteerijatele kui ka teistele asjast huvitatuile
- pakkuda tuge kvaliteedirikkumiste põhjuste väljaselgitamisel.

Seiresüsteemi efektiivsuse tagamiseks tuleb kiiresti käsitleda triviaalseid olukordi, et jääks aega keerukate juhtumitega tegelemiseks. Kvaliteedi üle kurnud tarbijatele tuleb anda selge automaatselt koostatud vastus. Kvaliteedi seiresüsteemi poolt mõõdetud kvaliteedinäitajad ja raportid on vajalikud elektritarbijatele ja jaotusvõrgu valdajatele. Sealt saavad teavet ka elektrivõrgu ja -seadmete projekteerijad ja ehitajad ning elektrivarustust jälgivad ametnikud.

Eestis kohtkindlatel mõõturitel põhinev kvaliteedi seiresüsteem seni puudub. Joonisel 9.31 on Soome jaotusvõrkudes rakendatav soovitus elektri kvaliteedi mõõtmiseks. Selle kohaselt paigutatakse kohtkindlad kvaliteedimõõturid kõikidesse toite- ja vahealajaamadesse ning suuremate tööstustarbijatega jaotusalajaamadesse. Ülejäänud alajaamades korraldatakse mõõtmisi teistsaldatavate mõõturitega kindla kava kohaselt.



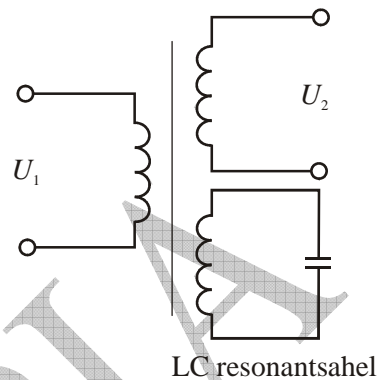
Joonis 9.31 Kvaliteedi seiresüsteem

9.5.2 Pingelohkude mõju vähendamine

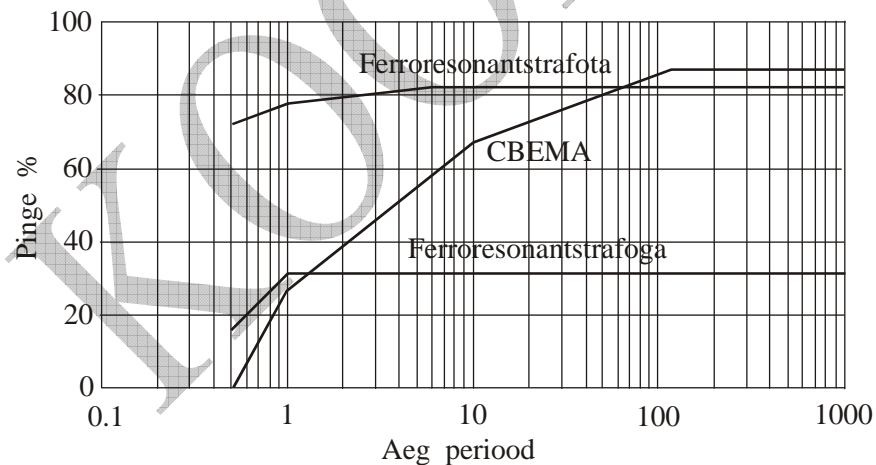
Ohtlike pingelohkude mõju vähendamiseks võivad mõndagi teha nii võrgu-ettevõtte kui tarbijad ise. Üldiselt on majanduslikult otstarbekam tegeleda probleemiga madalamal tasemel, koormusele lähemal. Parimaks lahenduseks on rikke läbimise võime sidumine seadme tehniliste andmetega, mis tähendab, et pingelohkudele tundlike seadmeid ei kasutata või määratakse selged nõuded pingele kvaliteedile. Seadme tootjatel peaks olema pingelohu eduka läbimise kõverad, mis tuleks esitada tarbijatele. Seadmed peaksid olema võimelised edukalt läbima pingelohke ulatusega kuni 70%, sest tõenäosus, et kogetakse pingelohke alla 70% on väike. Ideaalsel juhul peaks seade edukalt läbima pingelohke ulatusega 50%. Tehnoloogilised lahendused pingelohkude vastu

võivad olla rakendatud mitmel tasemel, alates üksikseadmetest võimsusega mõni kVA kuni tervete ettevõtteni.

Ferroresonantstrafod on pingele kvaliteeti tõstvad seadmed, mis suudavad toime tulla enamiku pingelohkude tüüpidega. Tegemist on trafoga, mille ülekandesuhe on 1:1 ning mis talitleb südäimiku püsiva küllastumise juures. Seetõttu ei avalda primaarpinge muutused mõju südäimiku magnetvoo tihedusele ning trafo sekundaarmähise väljundpinge on peaaegu konstantne olenemata primaarmähise sisendpinge muutustest. Südäimiku küllastumine põhjustab siinuspinge moonutusi, tekitades harmoonikuid. Harmoonikute väljafiltreerimiseks on trafol lisasekundaarmähis (joonis 9.32), millega ühendatud kondensaator moodustab resonantsahela. See ahel filtreerib ka sekundaarmähisega ühendatud mittelineaarsete koormuste põhjustatud harmoonikuid. Lisaks salvestab filter energiat, mis aitab säilitada püsivat väljundpinget sisendpinge lühikeste katkestuste korral.



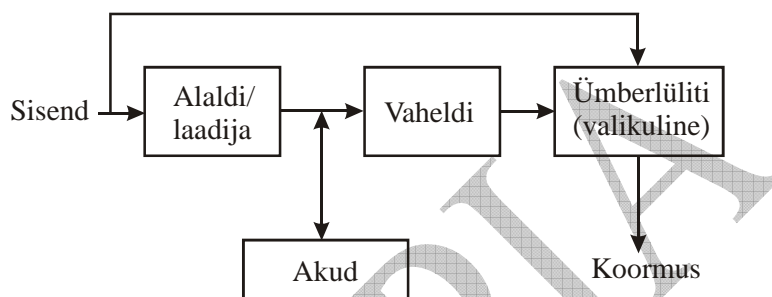
Joonis 9.32 Ferroresonantstrafoga põhimõtteskeem



Joonis 9.33 Seadme pingelohu eduka läbimise võime suurenemine ferroresonantstrafoga kasutamisel

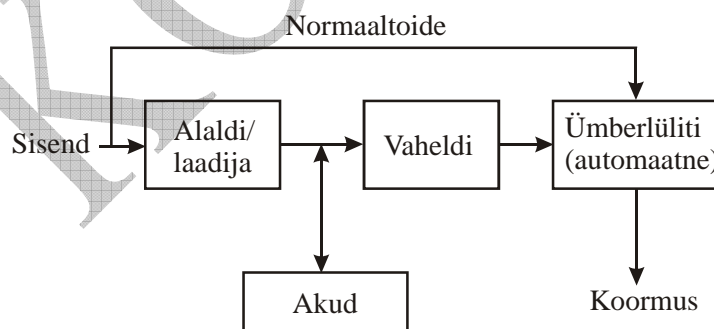
Ferroresonantstrafode eeliseks on lihtsus jõuelektroonikaseadmetega võrreldes. Ferroresonantstrafod taluvad hästi ülekoormust ja transientliigpingeid, kuid nende kaod ja reaktiivvõimsuse tarve on suured. Trafod sobivad enam püsivate koormuste korral. Muutuvad koormused, eriti aga suured käivitusvoolud, pole soovitatavad. Ferroresonantstrafoga nimivõimsus peaks olema tunduvalt suurem kui

koormus, mille tarvis see on mõeldud. Ferroresonantstrafo mõju pingelohu eduka läbimise võimele on kujutatud joonisel 9.33. Lubatav pingelohk sõltub ka koormusest. Koormuse tõusmisel lubatava pingelohu sügavus väheneb. Ferroresonantstrafot kasutatakse tavaliselt koormustel kuni 3 kVA. Kolmefaasilised ferroresonantsil põhinevad seadmed (*magnetic synthesizers, MS*) on võimelised pingelohkudega paremini toime tulema. Selliseid seadmeid võimsusega kuni 200 kVA kasutatakse suurtes arvutisüsteemides ja muude konstantse koormusega toitesüsteemides.



Joonis 9.34 Otselülituses UPSi skeem

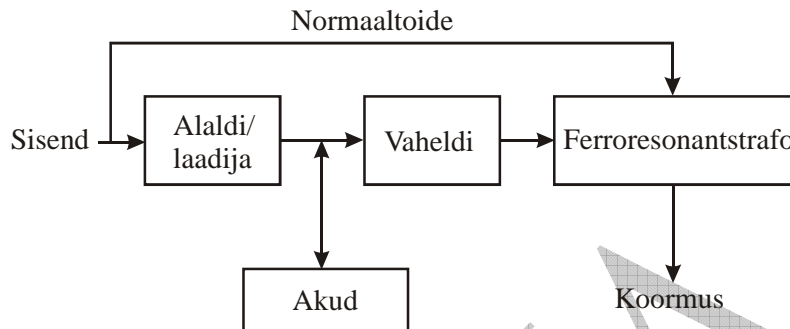
Laialt on levinud **puhvertoiteallikad** (*uninterruptible power supply, UPS*), mis tuginevad akumulaatoritele. Kasutusel on kolme tüüpi puhvertoiteallikaid: otselülituses (*on-line*) UPS, varutoimega (*standby*) UPS ja hübriid-UPS. Joonisel 9.34 on tüüpilise otselülituses UPSi konfiguratsioon. Siin alaldatakse sisenev vahelduvvool alalisvooluks, millega laaditakse akusid. Seejärel alalisvool vaheldatakse. Pingehälbe või toitekatkestuse ajal toidetakse vaheldit akudest ning väljund säilib. Sellise UPSi puuduseks on suhteliselt suur kadu. Tavaliselt kasutatakse seadmeid võimsuseni kuni 500 kVA.



Joonis 9.35 Varutoimega UPSi skeem

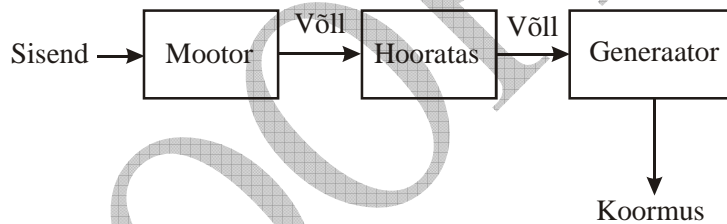
Varutoimega UPSi korral toidetakse tavatalitluses tarbijat otse võrgust (joonis 9.35). Hetkel, kui tuvastatakse häiring, lülitatakse koormus ümber vaheldile, mida toidetakse akudelt. Sellise UPSi korral on oluline ümberlülitamise aeg, mis *CBEMA*-kövera kohaselt on maksimaalselt 8 ms. Varutoimega UPS leiab

kasutust ühefaasiliste tarbijate toiteks ning on efektiivne ja ökonoomne. Erinevalt otselülituses UPSist ei paku varutoimega UPS siiski kaitset transientide vastu ega võimalda reguleerida pinget.



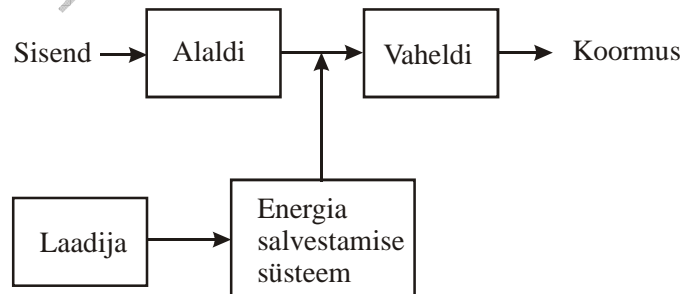
Joonis 9.36 Hübriid UPSi skeem

Hübriid-UPSi konfiguratsioon (joonis 9.36) sarnaneb varutoimega UPSi konfiguratsiooniga, kuid võimaldab reguleerida väljundi pinget ning kiiret ümberlülitust tavatalitlusest UPSi-talitlusse. Kasutatakse võimsustel 5...50 kVA.



Joonis 9.37 Mootori-generaatorisüsteemi skeem

Mootori-generaatorisüsteemi tuntakse juba väga kauan aega, kuid seda kasutatakse ka tänapäeval. Seadme tööpõhimõte on lihtne (joonis 9.37). Võrgust toidetav mootor käitab generaatorit, millega on ühendatud koormus. Häiringut võimaldab läbida hooratta inerts. Lahenduse puuduseks on masinatega seotud kaod ja hoolduse vajadus. Ka põhjustab sageduse ja pinge langus häiringu ajal masina aeglustumise, mis ei pruugi iga koormuse korral sobida.



Joonis 9.38 Ülijuhtiva energiasalvesti põhimõtteskeem

Hoorattal põhinevad energiasalvestid kasutavad suurel kiirusel vaakumis magnetilistel laagritel pöörlevaid hoorattaid. Energia vahetamine elektrivõrguga toimub jõuelektronika vahendusel. Hoorattad võimaldavad edukalt läbida pingelohke kestusega paarist sekundist kuni kahe minutini. Hoorattal põhinevaid energiasalvesteid on võimalik kasutada UPSides aku asemel.

Tabel 9.5 Reservtoiteallikate rakendamine

Lahendused	Kestus ja tehnilised nõudmised						Installeeritud võimsus
	0...100 ms	100...400 ms	400 ms...1 s	1 s...1 min	1...3 min	> 3 min	
Ajalise viitega kontaktorid							Mõni VA
DC-allikas koos kondensaatoriga							
Pöörlev seadeldis koos hoorattaga							< 500 kVA
Varutoiteallikas koos diisलगeneraatoriga							< 1 MVA
DC-allikas koos akuga	15 minutit kuni mitu tundi, sõltudes aku mahtuvusest						< 300 kVA
Pöörlev seadeldis koos hoorattaga ning mootori või reservtoitega	Ümberlülitus varutoiteallikale võib põhjustada lühikesi katkestusi						< 500 kVA
DC-mootor, mis on ühendatud aku ja sünkroongeneraatoriga	15 minutit kuni mitu tundi, sõltudes aku mahtuvusest						< 500 kVA

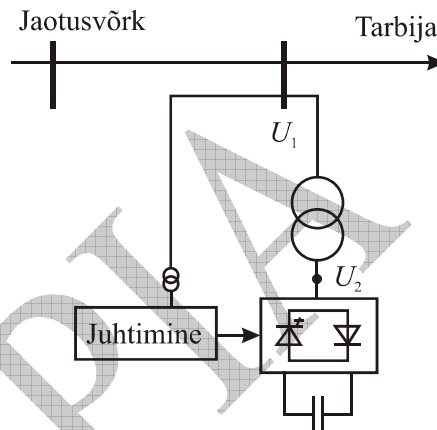
Ülijuhtivate energiasalvestite (*superconducting magnetic energy storage, SMES*) tööpõhimõte sarnaneb UPSidega (joonis 9.38), kuid akumulaatorite asemel kasutatakse siin ülijuhtivat elektromagnetit. Energia salvestub selle magnetvälja. Sellise seadme mõõtmed on väiksemad ja toimimiskiirus suurem kui akumulaatoritel põhinevatel UPSidel. Ülijuhtiva magneti puhul on kaod väikesed ning magneti omadused säilivad tuhandete laadimis- ja tühjendamis-

tsüklite jooksul. Ülijuhtivuse saavutamiseks tuleb magnetit jahutada kuni $4,2\text{ }^\circ\text{K}$. Tüüpiline ülijuhtiv süsteem on võimeline kaitsma kuni 8 MVA võimsusega tarbijaid kuni 25% pingelohu sügavuse korral 10 sekundi jooksul.

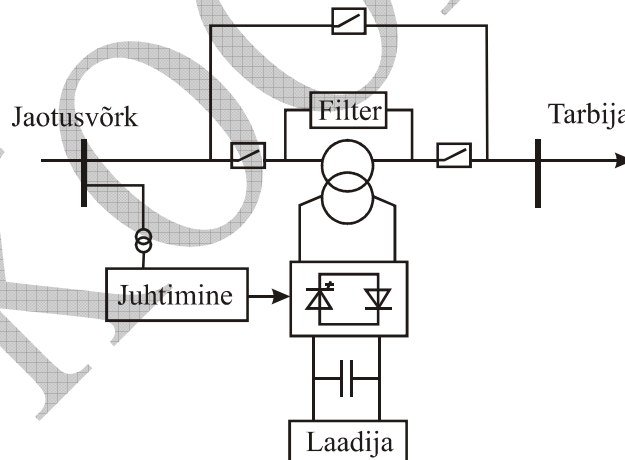
Erinevate lahenduste sobivuse hindamisel konkreetse tarbija tarvis tuleb lähtuda tehnilistest tingimustest ja piirangutest. Samuti ei saa unustada majanduslikku külge. Kokkuvõtlikult on reservtoiteallikaid iseloomustatud tabelis 9.5.

Võrguettevõttel on pingelohkude ja katkestuste vähendamiseks rida võimalusi. Siia kuuluvad

- neutraali maandamine läbi kaarekustutuspooli
- regulaarne puude piiramine
- isoleeritud juhtmete kasutamine
- silmusskeemide kasutamine
- fiidrite skeemide modifitseerimine
- releekaitse parem koordineerimine
- jõuelektroonikal põhinevate kompensatorite rakendamine.



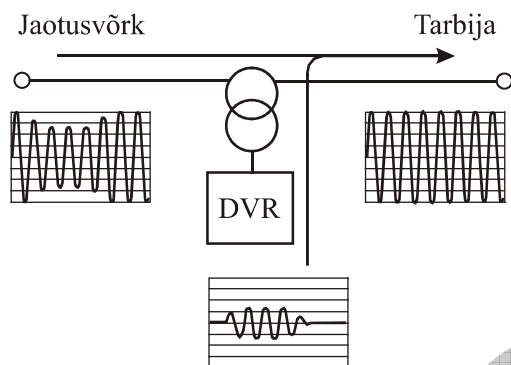
Joonis 9.39 STATCOMi põhimõtteskeem



Joonis 9.40 DVRi põhimõtteskeem

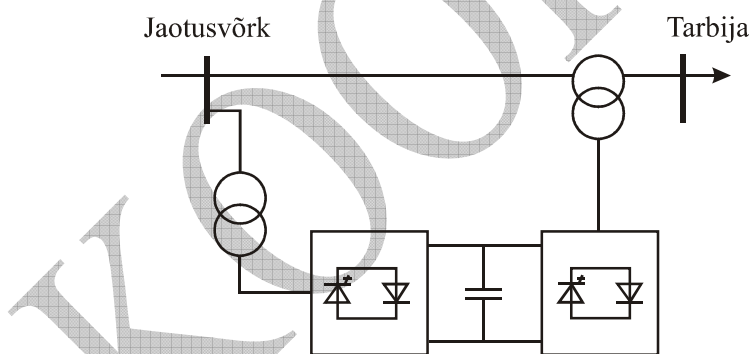
Jõuelektroonikal põhinevates kompensatorites kasutatakse ära nii nagu põhivõrgus rakendatavates *FACTS*-seadmeteski ahelate kiire kommuteerimise võimalused. Joonisel 9.39 on võrguga põiki ühendatud staatilise kompensatori (*STATCOM*) põhimõtteskeem, mis võimaldab reguleerida reaktiivvõimsust võrgu sõlmes nii genereerimise ($U_2 > U_1$) kui tarbimise ($U_2 < U_1$) suunas. Staatiliste kondensaatorpatareidega võrreldes võimaldab seade reguleerida ja

stabiliseerida pinget tunduvalt kiiremini ja täpsemalt. Võimalik on kompenseerida kiireid reaktiivvõimsuse muutusi, mis leiavad aset näiteks tuulegeneraatorite ja kaarahjude juures. Reguleerimine faaside kaupa võimaldab kompenseerida asümmeetrilisi koormusi. Seadmel on positiivne mõju ka harmoonikute ning flikkeri piiramisel.



Joonis 9.41 DVRi mõju tarbija pingele võimalike häiringute korral võrgus

Dünaamiline pingetaastaja (*dynamic voltage restorer, DVR*) on võrgu suhtes pikilülituses (joonis 9.40). Erinevalt *STATCOM*ist avaldab *DVR* mõju ainult tema taha jäävale võrgu osale. Seade reguleerib tarbijale antavat pinget, lisades vajaduse korral täiendavalt kompenseerimiseks sobiva amplituudi, sageduse ja nurgaga pingekomponendi (joonis 9.41). Kasutusel on *DVR*-seadmeid võimsusega kuni 50 MVA.

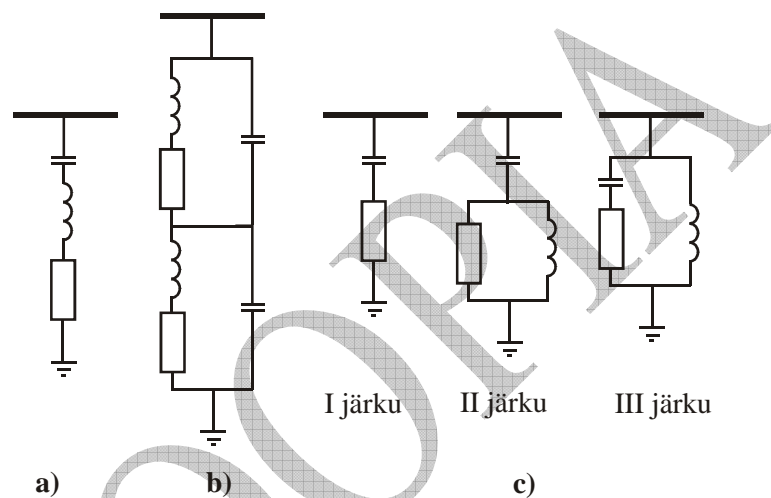


Joonis 9.42 UPFC põhimõtteskeem

STATCOM- ja *DVR*-seadmete kombineerimisel (joonis 9.42) on tulemuseks seade, mida kutsutakse ühitatud võimsusvoogude regulaatoriks (*unified power flow controller, UPFC*). Sisuliselt on selle seadmega võimalik reguleerida mitmesuguseid elektrivõrgu talitlusparameetreid, olgu siis eesmärgiks elektri kvaliteedi probleemide lahendamine jaotusvõrgus või süsteemi stabiilsuse tõstmine põhivõrgus. Seadme puuduseks on kõrge hind, mistõttu selle kasutamine jaotusvõrgus ei ole levinud.

9.5.3 Harmoonikute vähendamine

Harmoonikute vähendamiseks tuleb ennekõike rakendada ennetavaid meetmeid. Siia kuulub näiteks muundurite konstrueerimine, mis põhjustavad vähem harmoonikuid. Kuna sellised muundurid on kallid, tuleb lõplikul valikul arvestada majanduslikke tegureid. Teise rühma moodustavad meetmed, mis on mõeldud olemasolevate harmoonikute tekitatud probleemide lahendamiseks. Võimalik on kasutada filtreid ning muuta elektrivõrgu konfiguratsiooni, mis seisneb fiidrite skeemi või kondensaatorpatareide asukoha muutmises. Sama eesmärki võib täita ka reaktor, mille lisamisel muudetakse võrgu parameetreid.

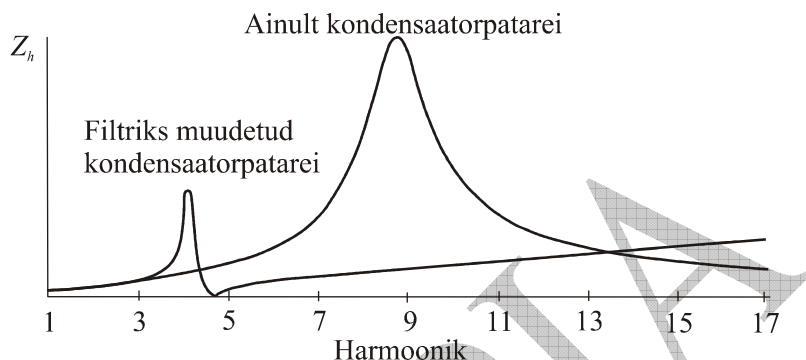


Joonis 9.43 Tüüpiliste harmoonikute filtrite lülitused: pikiühenduses filter (a), topelt ribapääsufilter (b) ning esimest, teist ja kolmandat järku summutusufilter (c)

Harmoonikute vähendamiseks kasutatavaid filtreid liigitatakse passiivseteks ja aktiivseteks. Passiivfiltrid koosnevad kondensaatorist ja reaktorist, mis on seadistatud teatud harmooniku sagedusele. Teoreetiliselt on filtril sellel sagedusel nulltakistus ning sellest tulenevalt läbib seda vastava harmooniku vool ning harmooniku pinged võrdub nulliga. Tüüpilised filtrite skeemid on joonisel 9.43. Passiivfiltrite kasutamine vähendamaks harmoonikute mõju on levinud nende odavase tõttu võrreldes teiste moodustega. Puuduseks on võimalik ebasoodne vastasmõju elektrivõrguga (paralleelresonants) ja häälestuse mittestabiilsus ajas.

Pikiühenduses filtrid (joonis 9.43a) koosnevad kondensaatorist ja reaktorist, mis on häälestatud suhteliselt madalatele sagedustele. Vastava harmooniku korral on kondensaatori ja reaktori reaktantsid võrdsed ning filtri takistus aktiivse iseloomuga. Joonisel 9.43b on topelt ribapääsufilter, milles on pikiühenduses põhikondensaator, põhireaktor ja häälestamiseade, mis koosneb paralleelselt lülitatud reguleerkondensaatorist ja -reaktorist. Sellise filtri impedants on madal

kahel häälestatud sagedusel. Joonisel 9.43c on kujutatud esimest, teist ja kolmandat järku summutusfiltrit. Levinumaks neist on teist järku summutusfilter, kus kondensaator on jadaühenduses omavahel paralleelselt ühendatud reaktoriga ja takistiga. Selline skeem võimaldab saavutada madalat impedantsi mõõdukalt laias sagedusvahemikus.



Joonis 9.44 Viienda harmooniku filter ja selle mõju võrgu karakteristikule



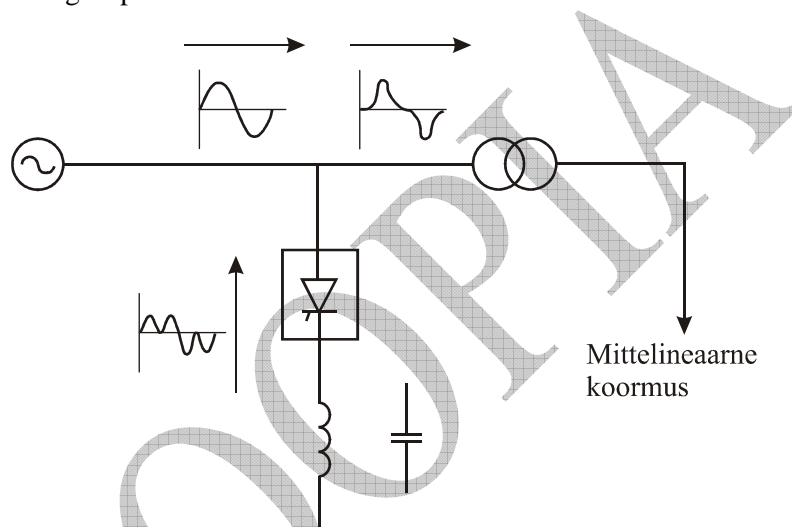
Joonis 9.45 Harmoonikute filter

Levinud on passiivfiltri seadistamine teatud harmooniku tõrjumiseks, kusjuures kondensaatorpatarei ülesandeks on parendada ka võrgu võimsustegurit. Seda tüüpi filtri puuduseks on, et ta tekitab terava paralleelresonantsi sagedusel, mis on väiksem filtri seadistatud sagedusest (joonis 9.44). Tekitav resonantsisagedus peab oluliselt erinema võrgus esinevate muude harmoonikute sagedusest. Joonisel 9.45 on firma Nokia Capacitors passiivfilter.

Aktiivfiltrid põhinevad jõuelektroonikaseadmetel ning on tundavamalt kallimad kui passiivfiltrid. Nende eeliseks on, et nad ei resonanceeri võrguga ning suudavad töötada sõltumatult võrgu sagedusarakteristikutest. Sellest tulenevalt võib neid kasutada tingimustes, kus tavapärased passiivfiltrid ei ole võimelised edukalt töötama võimaliku paralleelresonantsi

tõttu. Aktiivfiltrid võivad korruga summutada rohkem kui ühte harmoonikut ning aidata kaasa teiste kvaliteediprobleemide (nt flikkeri) leevendamisele.

Aktiivfiltri põhimõte on asendada see osa siinuslainest, mis mittelineaarse koormusvoolu poolt on moonutatud (joonis 9.46). Elektrooniline juhtimiseseade jälgib liini voolusid ja pingeid ning lülitab jõuelektronikaseadmeid eesmärgiga reguleerida energiavoogusid nii, et tagada liini voolude ja pingete siinuselisus. On kaks põhimõttelist lahendust – üks, kus kasutatakse induktiivpooli magnetvälja salvestatud energiat, ning teine, kus energiasalvestina kasutatakse kondensaatorit. Aktiivfiltreid võib harmoonikute vähendamise kõrval programmeerida ka võimsusteguri parendamiseks.

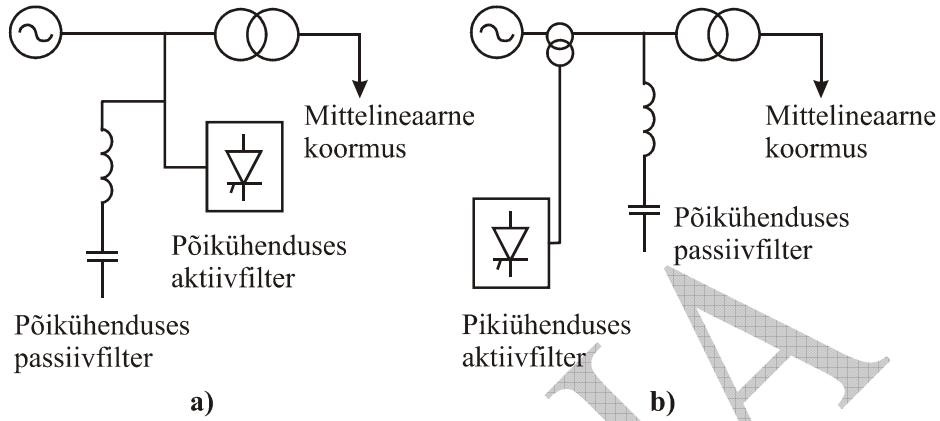


Joonis 9.46 Aktiivfiltri põhimõtteskeem

Hea tehniline ja majanduslik lahendus saadakse, kui passiiv- ja aktiivfiltrid kombineeritakse hübriidfiltriteks. Sellised filtrid võimaldavad suhteliselt madala hinna juures filtreerida harmoonikuid laias sagedusvahemikus (2...25 harmoonikuni) ning toimivad ka reaktiivvõimsuse kompensaatoritena. Hübriidfiltris olevad passiivfiltrid summutavad põhilisi harmoonikuid samal ajal kui aktiivfiltrid tugevdavad passiivfiltrite toimet ja summutavad teisi harmoonikuid. Selle tulemusena väheneb aktiivfiltrite vajatav võimsus tunduvalt. Lisaks sellele vähenevad ka passiivfiltrite võrku ühendamise seotud probleemid (võimalikud resonantsnähtused võrguga).

Kasutusel on erinevaid hübriidfiltri konfiguratsioone, mis on ette nähtud voolu- või pinge harmoonikute filtreerimiseks, reaktiivvõimsuse reguleerimiseks või passiivfiltri mõju parandamiseks. Kaks hübriidfiltri võimalikku konfiguratsiooni on joonisel 9.47. Hübriidfilter joonisel 9.47a koosneb põikühenduses passiiv- ja aktiivfiltrist. Selline hübriidfilter võimaldab kompenseerida vooluharmoonikuid ja reguleerida reaktiivvõimsust. Hübriidfilter joonisel 9.47b, mis koosneb

põikühenduses passiivfiltrist ja pikiühenduses aktiivfiltrist, võimaldab kompenseerida pingeharmonoone, kuid ei võimalda reguleerida reaktiivvõimsust.



Joonis 9.47 Hübridfiltrite põhimõtteskeemid