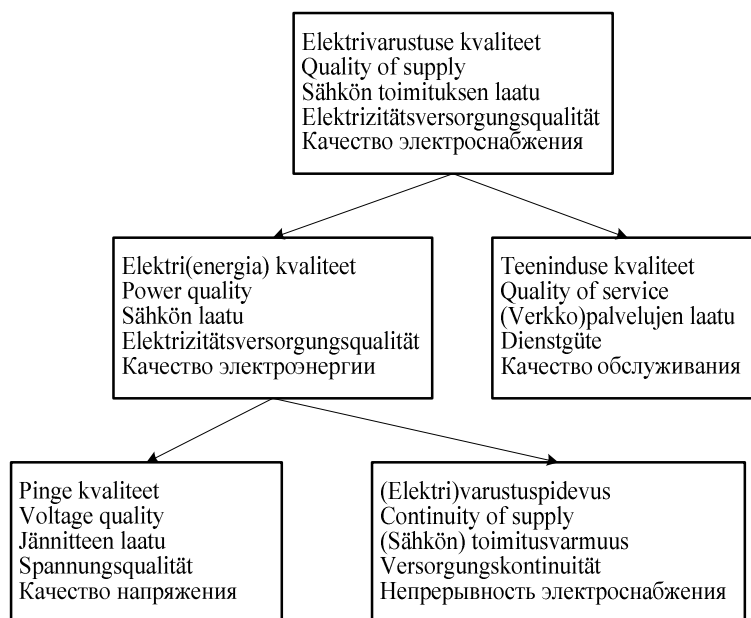


7 ELEKTRI KVALITEET

Elektrijaamast väljastatud elektrienergia kvaliteeti rikuvad pingekaod elektrivõrgus, ühefaasilised ning mittelinearseid elemente sisaldavad tarvitid jm. Elektri kvaliteedi all mõeldakse üldjuhul **elektritarbijate elektrivarustuskindlust** ja **talitusparameetrite vastavust nimisuurustele**. Kvaliteedinõuded võivad erineda sõltuvalt tarbijast. Elektrivõrk peab andma tarbijale kvaliteetset elektrit, kuid ka tarbija ei tohi oma seadmetega võrku saastata, sest üks olulisem halva kvaliteedi põhjustaja on tarbija ise.

7.1 Elektri kvaliteedi mõiste

Tarbija olukorra tervikuna määrab **elektrivarustuse kvaliteet**, mis koosneb **elektri kvaliteedist** ja **elektrienergia tarnimisega seotud teeninduse kvaliteedist** (joonis 7.1). Jaotusvõrk peab tagama elektrivarustuse kvaliteedi, mis jaguneb omakorda **pinge kvaliteediks** ja toitekatkestustega seotud **elektrivarustuspidevuseks**. Tähelepanu vajab ka **elektri tootmise kvaliteet**.



Joonis 7.1 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 võrguettevõtelt investeringuid ja tõstab käidukuluid.

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 ülekande 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. Standardite järgimine on vajalik vaid sel juhul, kui need on tehtud kohustuslikuks õigusaktidega. Lõplikult fikseeritakse kvaliteedingimused elektritarbija ja elektrivarustaja vahelises lepingus.

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

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

kus K_{inv} – investeeringud

$K_{käit}$ – käidukulud (kaod, personal, tagavarad)

K_{hoold} – hoolduskulud

K_{kat} – katkestuskulud.

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

Elektri kvaliteedi probleemide lahendamine toimub järgmiste **etappide kaupa**:

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

Ebakvaliteetsest elektrienergiast tingitud **kahjud võivad olla küllaltki suured**. Tabelis 9.1 on näidatud pingelohu rahaline mõju erinevatele ettevõtetele.

Tabel 7.1 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

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 tõstvatessse seadmetesse, kui nad ise põhjustavad kvaliteediprobleeme. Vastastikune koostöö elektrivarustuse osapoolte vahel on igati soovitatav, kuna võrgu mõjutamine ühe tarbija poolt avaldab mõju ka teistele sama piirkonna tarbijatele.

7.2 Elektri kvaliteedinäitajad

Vahelduvvoolu elektriseadme normaalseks toimimiseks peab **võrgusagedus** olema lähedane nimisagedusele, **toitepinge** lähedane nimipingele, pinge siinuseline ja kolmefaasilise tarbija puhul ka **sümmeetriline**. Nii elektrivõrgu kui muude elektriseadmete häiretundlikkust ja häiringute tagasimõju hõlmab mõiste **elektromagnetiline ühilduvus**.

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

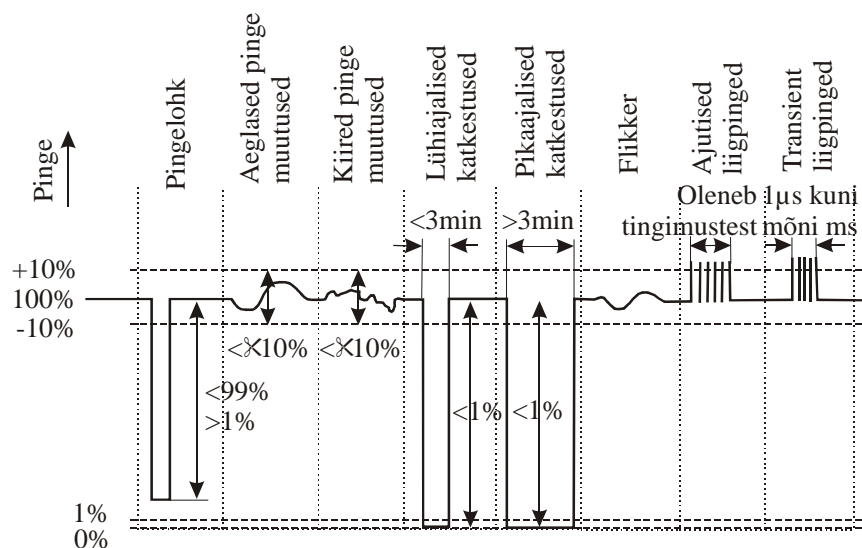
- madalsageduslikud juhtivusnähtused
- madalsageduslikud kiirgusnähtused
- kõrgsageduslikud juhtivusnähtused
- kiirguslikud lahendusnähtused
- elektrostaatilised lahendusnähtused
- elektromagnetiline tuumaimpulss.

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

Pingevaliteedinäitajateks on

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

Olulisemad elektri kvaliteedinäitajad ja neid iseloomustavad omadused on joonisel 7.2.



Joonis 7.2 Elektri kvaliteedinäitajate ülevaade

7.2.1 Võrgusagedus

Eestis on toitepinge nimisagedus **50 Hz**. Normaaltalitusel peab põhisageduse 10-sekundiline keskvaartus olema järgmistes piirides:

50 Hz ± 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 ± 0,5% (49,75...50,25 Hz) 100% ajast – kõrgtase

50 Hz ± 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 ühendussüsteemis. 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.

7.2.2 Pingetase ja aeglased pingemuutused

Aeglasel pingemuutusel on pingele efektiivväärtuse suurenemised või vähenemised, mida iseloomustatakse pingele 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 pingele erijuhtudel olla $U_n +10/-15\%$. Tarbijaid tuleb sellest teavitada.

Kui liitumispunktis on keskpinge, nõuab standard, et 95% pingele 10-minutilistest keskväertustest oleks $U_c \pm 10\%$, kus U_c on lepinguline pingele.

Toitekatkestuste aega arvesse ei võeta. Võib vaadelda ka pingele kõrg- ja normaalkvaliteeti. Kokku võttes on **madalpingevõrgus** pingekvaliteedi

- **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.. Pingele mõõtmisvahemik valitakse nii, et haaratud on kõik iseloomulikud talitlused (tööpäevad, pühad, pühadeeelsed päevad jm). Fikseerida tuleb ka liigpingeid, mis võivad rikkuda elektriseadmeid.

7.2.3 Pingele asümmeetria

Pingele asümmeetria on mitmefaasilise võrgu seisund, mille puhul faasipingete efektiivväärtused või faasidevahelised nihkenurgad pole võrdsed.

Asümmeetriat iseloomustavaks näitajaks on pingele vastujärgnevus- ja pärijärgnevuskomponendi suhe – **asümmeetriategur**

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

Asümmeetriateguri võib arvutada ka faasidevaheliste pingete kaudu

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

Normaaltalitlusel ei tohi vastujärgnevuskomponendi efektiivväärtuse 10-minutiline keskväertus madal- ja keskpingel **ületada 2%** pärijärgnevuskomponendist iganädalastel mõõtmistel **95%** juhtudest. Mõnes piirkonnas, kus tarbijajagaaldis 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 keskpinge võrkude faasijuhtmete ja maa vahel, lisakoormuse isolatsioonile ja pingetrafode magnetahelatele. Nulljärgnevuskomponenti pole seni normeeritud.

7.2.4 Kiired pingemuutused

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

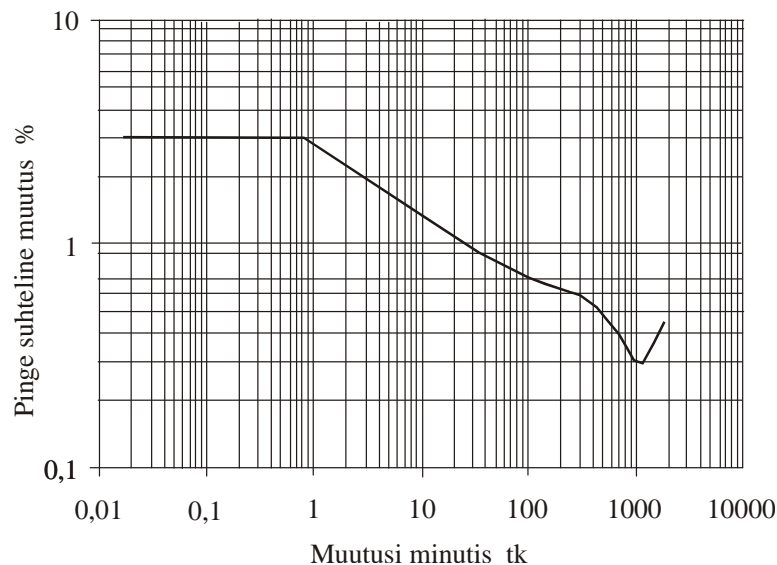
$$\delta U = U_{\max} - U_{\min} \quad \text{või} \quad \delta U = \frac{(U_{\max} - U_{\min})}{U_n} 100\%$$

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 7.3).



Joonis 7.3 Pinge suurim lubatud muutumisulatus sõltuvalt muutuste sagedusest

Suurim pinge kõikumistega seotud probleem on **värelus (flicker)**. **Värelus on** nägemisaistingu ebaühtlus, 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.

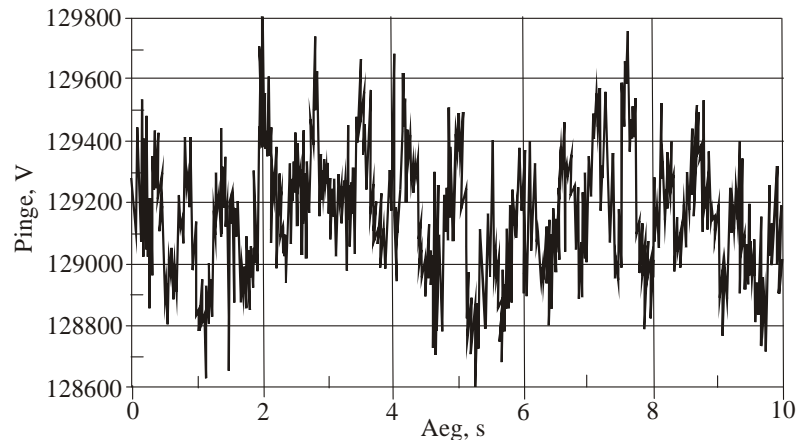
Kõige häirivamaks loetakse võnkumise **sagedust 8...10 Hz**. Väreluse toime on subjektiivne ja võib muutuda olenevalt tajumistingimustest ja ajast.

Normaalselt peab valgusallikate väreluse **kestevtugevus 95%** ajast olema $P_{lt} \leq 1$.

Väreluse kehtivtugevus P_{lt} leitakse kahe tunni jooksul kaheteistkümnes 10-minutilises ajavahemikus mõõdetud väreluse lühiajalise tugevuse P_{st} põhjal valemiga

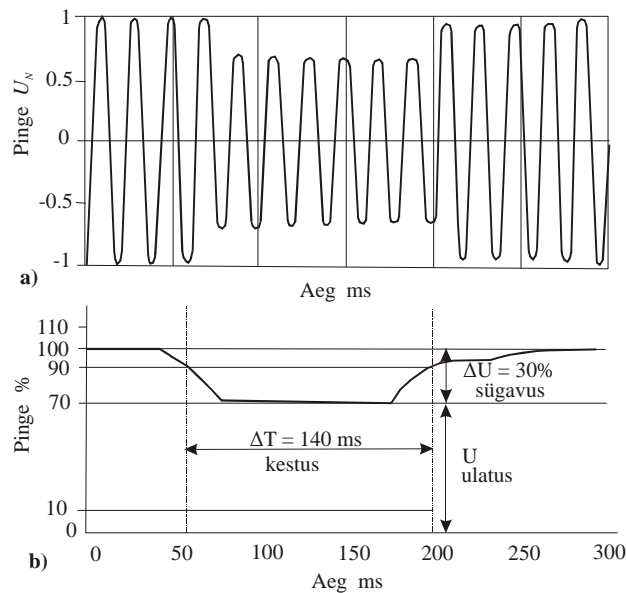
$$P_{lt} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{12} \frac{P_{st}^3}{12}}$$

Võimalikku värelust põhjustava pingelaine kuju on joonisel 7.4.



Joonis 7.4 Kaarahju tööst põhjustatud pingelaine fluktuatsioonid

Pingelohk on *toitepinge järsk langus* lühikeseks ajaks tasemeni 90% kuni 1% nimipingest. Pingelohke



Joonis 7.5 Pingelohku (a) ja efektiivväärtused (b) pingelohku korral

iseloomustatakse nende **kestusega** ΔT ja **sügavusega** ΔU (joonis 7.5). Pingelohku **kestus** on tavaliselt **10 ms (poolperiood) kuni 1 min**. Pingelohku sügavus on nimipinge ja pingelohku ajal esineva vähima pingelohku efektiivväärtuste vahe. Kui pingelohku väärtus langeb **alla 1%**, loetakse seda **toitekatkestuseks**.

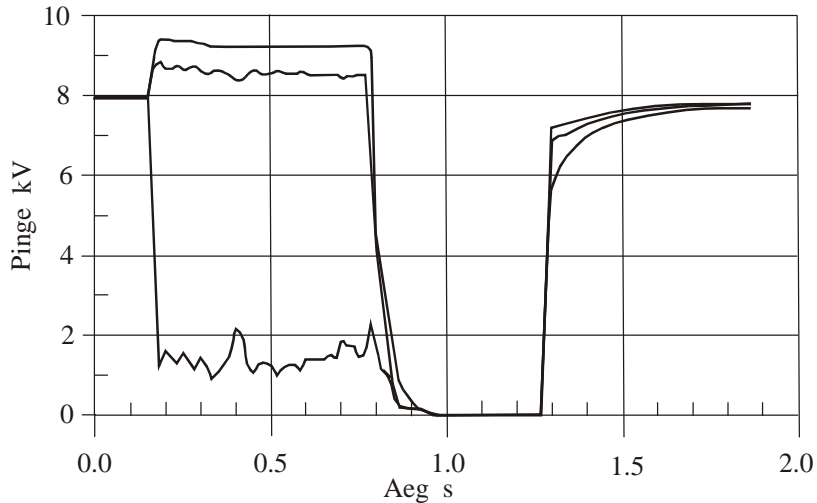
Kolme faasilises süsteemis lähtutakse faasist, kus pingelohk on suurim.

Pingelohku iseloomustavad omadused on

- ulatus – säilinud pingelohku efektiivväärtus mingis punktis
- sügavus – pingelohku efektiivväärtuse erinevus nimieffektiivväärtusest

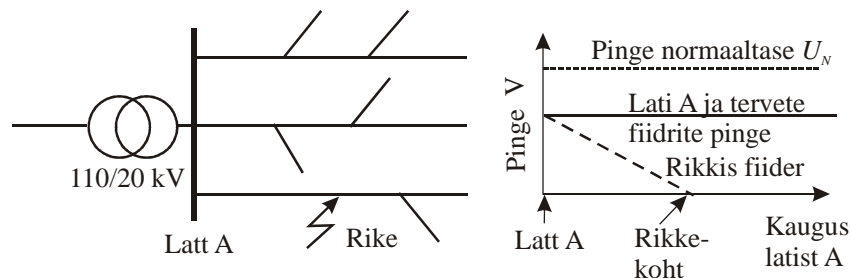
- kestus – aeg, mille kestel on pinge efektiivväärtus alla 90% pinge nimieffektiivväärtusest
- faasinurga muutumine (faasinihe) – pinge nulli läbimise nihe
- koht pingelainel, kus toimub pinge vähenemine ja taastumine – mõõdetakse, kui pinge faasinurka, mille juures pinge tegelikult väheneb või taastub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

Pingelohud tekivad rikestest tarbijapaigaldistes või jaotusvõrgus ja on juhuslikud. Pingelohu kestus on tavaliselt määratud relekaitse toimega. Pingelohu sügavusele avaldavad mõju asünkroonmootorid ja kondensaatorpatareid. Kolmefaasilise pinge efektiivväärtuse muutused ühefaasilise maaihenduse ning sellele järgneva väljalülituse ja eduka taaslülituse korral on joonisel 7.6.



Joonis 7.6 Kolmefaasilise pinge efektiivväärtuste muutumine ühefaasilise maaihenduse, fiidri väljalülitumise ja eduka taaslülituse korral

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 7.7 Keskpinge võrgu pingetase kolmefaasilise lühise ajal

Lühise ajal lattidel A esinev pinget U_F sõltub ennekõike lühisatud 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

$$U_F = \frac{Z_L + Z_F}{Z_Q + Z_T + Z_L + Z_F} U_n = (Z_L + Z_F) I_k$$

kus I_k on lühisvool.

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

7.2.5 Liigpinged

Liigpinged on võrgusageduslikud või transientliigpinged.

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

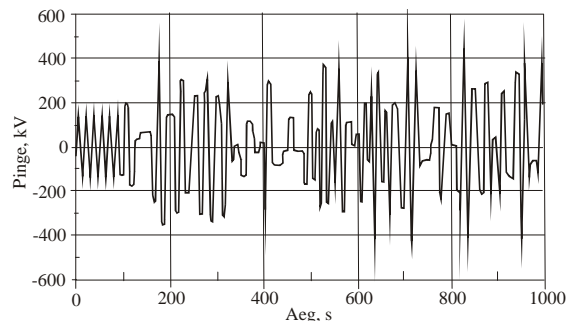
- ühefaasilise maalühise puhul pinge tõus tervetes faasides
- pinge tõus ferresonantsi tõttu, kus resonantsi põhjustab lähestikku asuvate elektriaparaatide mahtuvus ja küllastuva magnetahela induktiivsus
- PEN-juhtme katkemine madalpingevõrgus asümmeetrilise koormuse korral
- trafo astmelüliti või inverteri 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 järgalt või üle takisti. Isoleeritud või resonantsmaandatud neutraaliga võrkudes ei ületa liigpinge tavaliselt **2,0 U_n** .

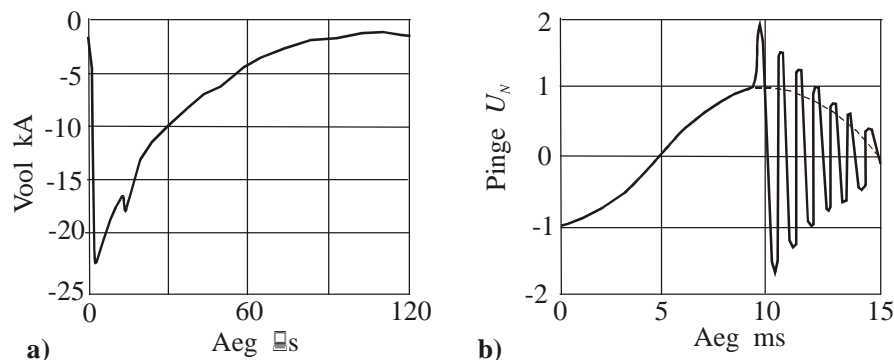
Tähelepanu tuleb pöörata ka **pingetõusudele**. Pingetõusuna mõistetakse pinge efektiivväärtuse suurenemist 1,1...1,8 kordse nimipingeneni kestusega 0,5 perioodi (10 ms) kuni 1 minut. Nii nagu pingelohud on ka pingetõusud peamiselt põhjustatud võrgus esinevatest rikestest, kuid erinevalt pingelohkudest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

Suuri võrgusageduslikke liigpingeid põhjustab **ferresonants**, milles osalevad mahtuvus ja küllastuva magnetahela induktiivsus. Erinevalt lineaarsest resonantsist, mis põhjustab kõrgeid sinusoidaalseid pingeid ja voole, tekitab ferresonants **kaootilise lainekujuga ja tasemega pingeid ja voole** (joonis 7.8).

Tavaliselt leiab ferresonants aset tühijooksuolukorras trafo ja teatud pikkusega kaabli talitluses. Ferresonantsi esinemise tõenäosus sõltub veel maandamata trafo primaarmähise lülitusgrupist (kolmnurka ühendatud primaarmähisel võib ferresonants esineda küllaltki lühikese kaabli korral), süsteemi tugevusest (süsteemi madal lühisvõimus suurendab resonantsi tõenäosust), kolmefaasilistes võrkudes kasutatavatest ühefaasilistest lülitusseadmetest jm. Ferresonants põhjustab seadmete kuumenemist, kõrgeid pingeid ja liigpingepiirikute rikkeid, flikkereid jm. Ferresonantsi iseloomulikuks omaduseks on trafodest lähtuv eriline heli. Kontrollitud ferresonantsi saab ära kasutada elektri kvaliteedi tõstmiseks (p 7.5.2).



Joonis 7.8 Tühijooksus trafo ferresonantsist tingitud madalsageduslik liigpinge



Joonis 7.9 Pükselöögist põhjustatud vooluimpulss (a) ja jaotustrafo väljalülitamisest põhjustatud pinge siirdeprotsess (b)

Transientliigpinge on võnkuv või mittevõnkuv liigpinge, mis on tugevalt sumbuv ning kestab *mõne millisekundi või vähem*. Mittevõnkuvaid transiente iseloomustatakse nende frondi 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. Joonisel 7.9 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 energiasisaldusega, mistõttu on enamasti ka ohutum kui pikema kestusega lülitusliigpinge.

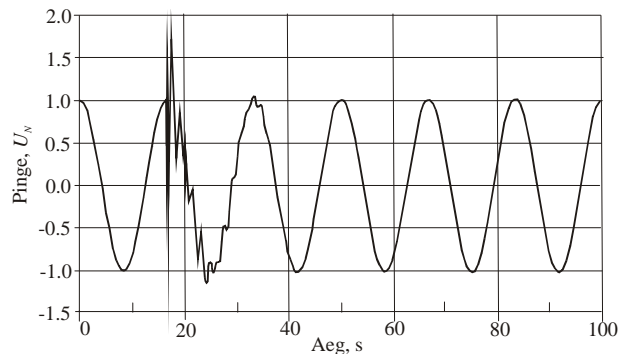
Sageduse järgi klassifitseeritakse võnkuvaid transiente *kõrg-, kesk- ja madalsageduslikeks*.

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 **vähem kui 5 kHz** ning kestus **0,3...50 ms**, loetakse **madalsageduslikeks**. Selliseid transiente, põhjuseks näiteks kondensaatorpatarei pingestamine (joonis 7.10), 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.



Joonis 7.10 Kondensaatorpatarei pingestamisest tingitud madalsageduslik võnkuv transient 35 kV

7.2.6 Harmoonikud

Enamasti eeldatakse, et elektrivõrgu pinge 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 jõuelektronikal põhinevate seadmete leviku tõttu. Ettekujutus harmoonikutest põhineb Fourier' teisendusel, mille kohaselt igasugust perioodilist funktsiooni $U(t)$ on võimalik kujutada reana

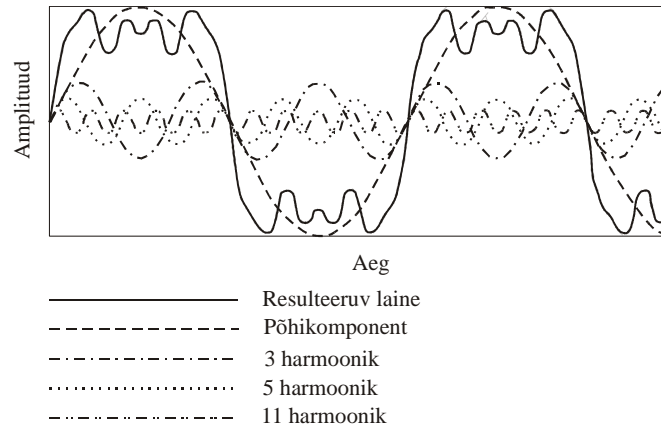
$$U(t) = \sum_{h=1}^{\infty} U_h \sin(h\omega_0 t + \psi_h)$$

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.

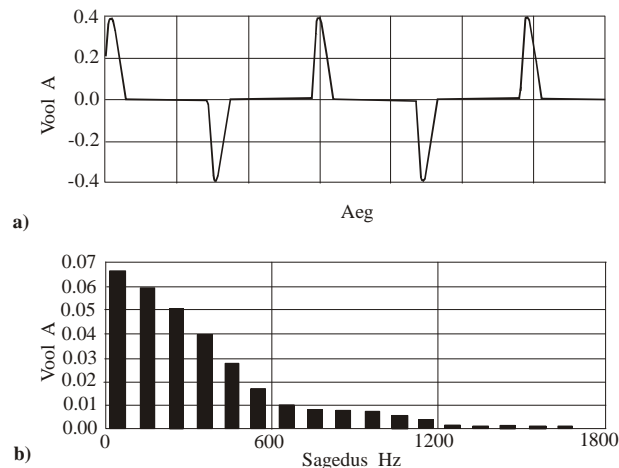
Elektriliste suuruste käsitlemisel nimetatakse vaadeldud komponente **põhi-** ja **kõrgemateks harmoonikuteks**. Erandjuhtudel esinevad ka **vahe-** ehk **interharmoonikud** ja alaliskomponent. Joonisel 7.11 on näide moonutatud lainekujust, kus põhiharmoniku kõrval on lisaks kolm kõrgemat harmoonikut paaritu järjekorranumbriga $h = 3, 5$ ja 11 .

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 pinge põhilaine sageduse kordne.



Joonis 7.11 Moonutatud lainekuju näide

Moonutatud lainekujuga voolu või pinget võib niisiis vaadelda koosnevana *suurest arvust harmoonikutest*. Praktiliselt piirduv vaadeldav harmoonikute arv $h_{max} = 25 \dots 50$. Ühiselt võib harmoonikuid kujutada spektrina (joonis 7.12). Enamasti on selline spekter diskreetne ja sisaldab vaid paarituid harmoonikuid. Vaheharmoonikute esinemise korral võib spekter olla ka pidev.

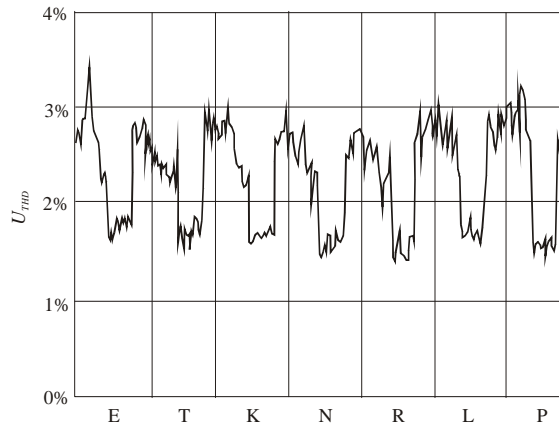


Joonis 7.12 Luminofoorlampide voolu kuju (a) ja harmoonikute spekter (b)

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 **kirjeldamaks pinge moonutusi**. Kuna pinge põhikomponent muutub ainult paari protsendi ulatuses, siis on *THD* peaaegu alati tähenduslik arv. Joonisel 7.13 on elamupiirkonna jaotusalaajaama pinge *THD* muutumine ühe nädala jooksul. Kõrgem *THD* esineb öösiti ja hommikuti tingituna mittelineaarsete koormuste suhteliselt suurest osakaalust nendel tundidel.



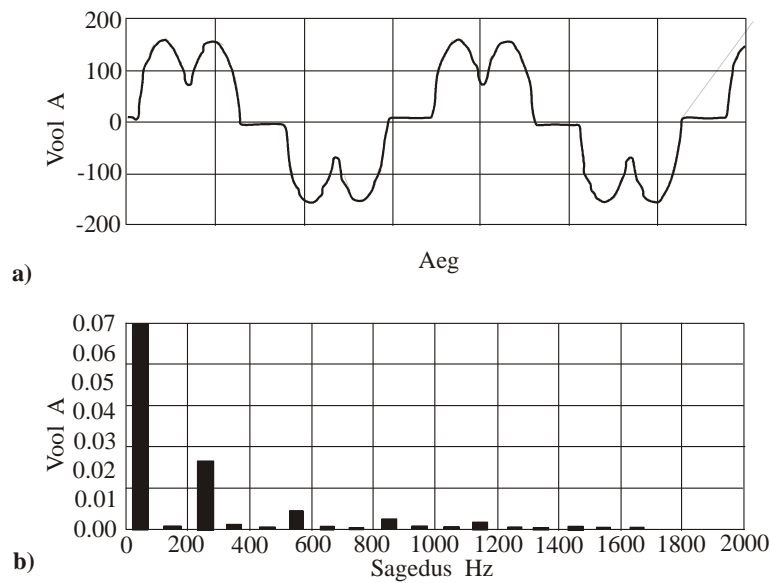
Joonis 7.13 *THD* muutumine ühe nädala jooksul

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 vooluharmoonikud kas faasis liituda või teineteist kustutada. Pinge moonutuse tase sõltub vooluharmoonikute kõrval võrgu impedantsist.

Tänapäeva modernsetes tööstusettevõtetes on mitmesuguseid mittelineaarseid koormusi, mis võivad põhjustada küllaltki suuri voolu moonutusi. Joonisel 7.14 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 kondensaatorpataride talitus harmoonikute esinemisel. Võimalik on resonantsnähtuste tekkimine, mis põhjustavad mootorite ja trafode ülekuumenemist ning tundlike elektroonikaseadmete väärtalitlust.



Joonis 7.14 Läbi muunduri toidetava ajami voolu kuju (a) ja harmoonikute spekter (b)

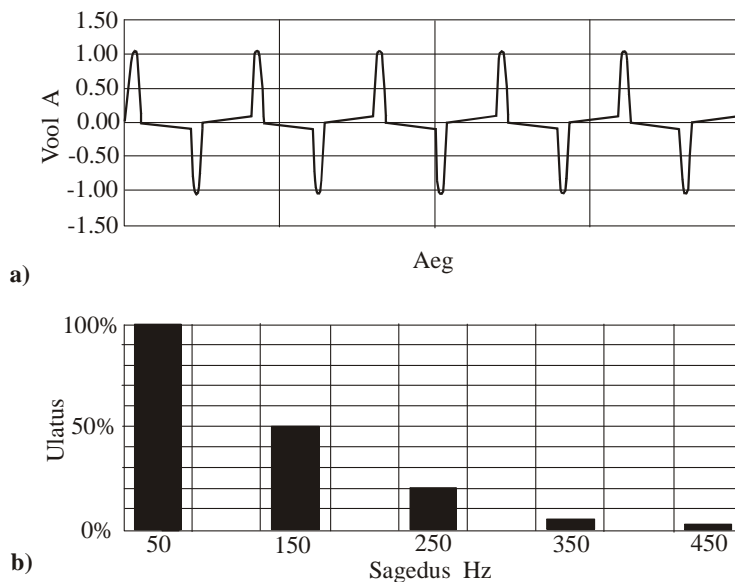
Harmoonikuid tekitavad ka **küllastuvad seadmed** nagu trafod ja muud elektromagnetilised seadmed, mil on terassüdamik. Nendes seadmetes põhjustab harmoonikuid raua magnetimiskõvera mittelineaarsus. Ühefaasilise või maandatud tähtlülitusega **kolmefaasilise trafo magnetimisvoolu** lainekuju ja harmoonikute spekter on joonisel 7.15.

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 pinget ja voolu h -nda harmooniku amplituudväärtused.



Joonis 7.15 Trafo magneetimisvool (a) ja harmoonikute spekter (b)

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

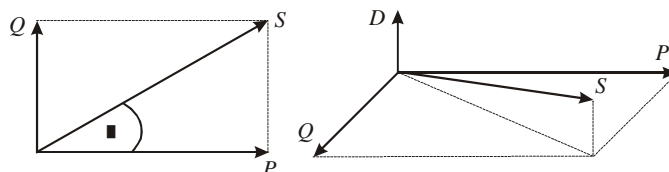
$$P = U_1 I_1 \cos \varphi_1$$

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

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

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

Olukorda illustreerib joonis 7.16, millel on kujutatud tavapärase võimsuste kolmnurk ja vektorite asend harmoonikute esinemise korral.



Joonis 7.16 Võimsuste kolmnurgad

Pinge ja voolu efektiivväärtused ning näivvõimsuse võib avaldada ka harmoonimoontustegurite kaudu

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

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

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

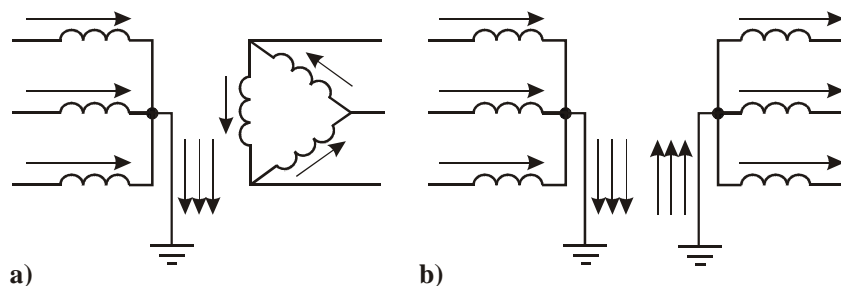
Harmoonikute juures tuleb tähelepanu pöörata ka **faasijärgnevusele**. Sümmeetrilise kolmefaasilise süsteemi korral on harmoonikute faasijärgnevust võimalik määrata, korrutades harmooniku numbriga järjekorras komponendi faaside pöörlemise suunaga. Näiteks teise harmooniku korral, kui $h = 2$, on tulemuseks $(0^\circ, 120^\circ, -120^\circ)$, 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.

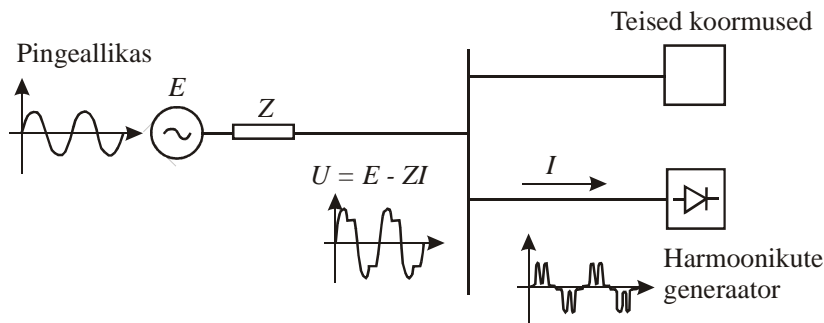
Kolmandatele harmoonikutele tuleb pöörata tähelepanu, kuna nulljärgnevuse tõttu erineb nende käitumine võrgus teiste harmoonikutega võrreldes. Kolmandad harmoonikud on olulised maandatud tähega süsteemide korral, kus vool võib liikuda neutraalis. Sellisel juhul on **võimalik neutraali ülekoormus**, mis võib põhjustada seadmete mitteotstarbekohast töötamist, kuna pingelangu tõttu neutraalis on faasipinged moonutatud. Kolmandate harmoonikute liikumisele avaldab mõju trafode lülitusgrupp.

Joonisel 7.17a 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 7.17b) liiguvad kolmandate harmoonikute voolud tõkestamatult ühelt trafo mähiselt teisele ja sealt edasi võrku.



Joonis 7.17 Trafo lülitusgruppide mõju harmoonikute liikumisele

Harmoonikute levimisele võrgus avaldab mõju **võrgu impedants**. Väikese takistusega võrgus jäävad voolu moonutustest põhjustatud pingelangud väikeseks ja naaberkoormuste toitepinge moonutused on väiksemad (joonis 7.18). Harmoonikute levikut võivad oluliselt suurendada resonantsnähtused, mis sõltuvad kondensaatorpatareide olemasolust ja aktiivkoormuse osakaalust.



Joonis 7.18 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.

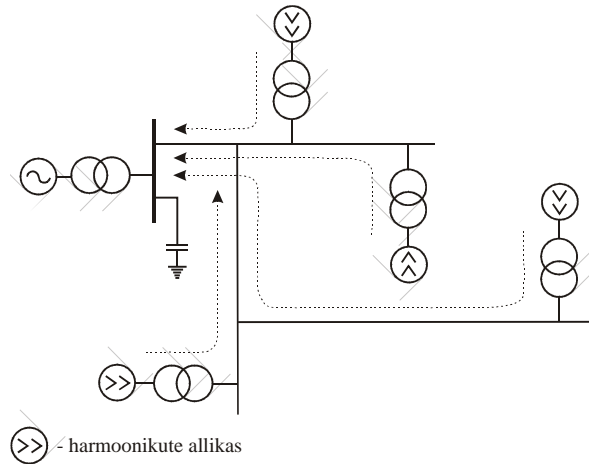
Kondensaatorpatareide reaktants on sagedusega pöördvõrdeline

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

Ahelal, mis sisaldab nii mahtvuslikke kui ka induktiivseid komponente, on üks või mitu **resonantsagedust**, 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 7.19 on elektrivõrk, kus võib esineda paralleelresonants, sest harmoonikute allika perspektiivist on **põikikondensaator paralleellülituses võrgu ekvivalentse induktiivsusega**.



Joonis 7.19 Võimaliku paralleelresonantsi probleemiga elektrivõrk

Resonantssagedusel muutub võrgu ekvivalentne näivtakistus harmoonikute allika poolt vaadatuna suureks

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

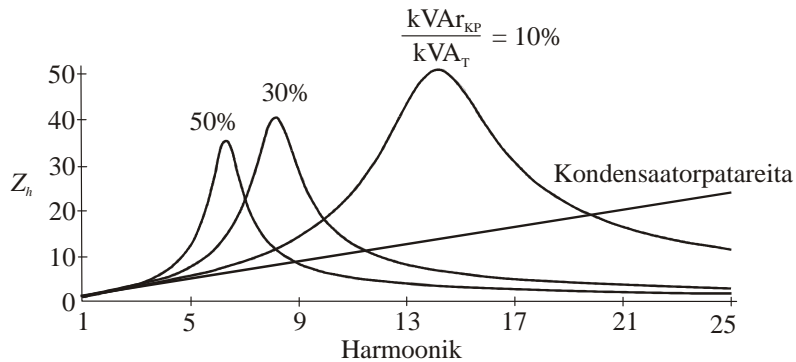
Siin on $q = X_{L\Sigma}/R = X_C/R$ ($R \ll X_{L\Sigma}$) resonantsahela kvaliteeditegur, mis muutub küllaltki suurtes piirides olenevalt harmoonikute allika asukohast võrgus. Näiteks jaotusvõrgu fiidril võib kvaliteediteguri väärtus olla väiksem kui 5, kuid suure trafo alampingelattidel 30 ja enam. 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

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

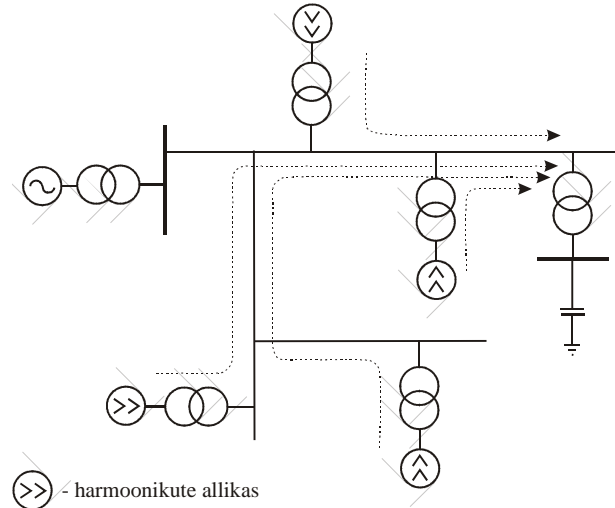
Seega on ka harmooniku vool võimendatud q korda, mis võib põhjustada kondensaatorpatarei riknemist, kaitsmete läbipõlemist või trafo ülekuumenemist.

Harmoonikute resonantsi kujunemist iseloomustab võrgu *sageduskarakteristik*, mis kujutab näivtakistuse sõltuvust harmooniku järjekorranumbri või vastavast sagedusest. Sageduskarakteristikud joonisel 7.20 näitavad kondensaatorpatarei ja trafo võimsuste suhte mõju võrgu impedantsile.



Joonis 7.20 Sageduskarakteristiku muutus kondensaatorpatarei ja trafo võimsuse suhte muutumisel

Elektrivõrgus esineb ka **jadaresonantsi**, mis tekib, kui kondensaatorpatarei mahtuvus ja trafo või liini induktiivsus paistavad harmoonikute allikatele LC-jadaahelana (joonis 7.21).



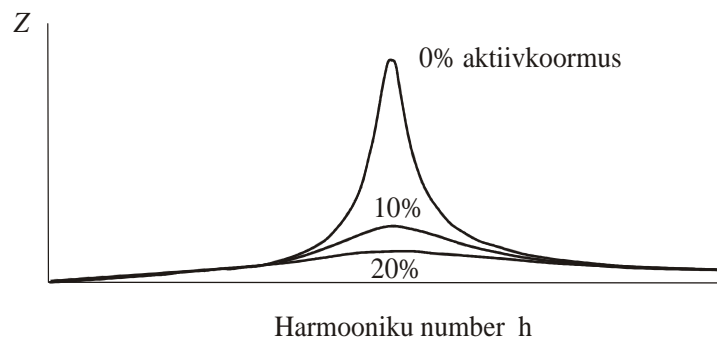
Joonis 7.21 Võimaliku jadaresonantsi probleemiga elektrivõrk

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 7.22 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 7.22 Aktiivkoormuse mõju paralleelresonantsile

Tähelepanu tuleb pöörata **vaheharmoonikutele**, mille sagedus pole põhiharmooniku suhtes täisarvkordne.

Vaheharmoonikuid põhjustavad sagedusmuundurid, tsüklokonverterid, induktsioonahjud, keevitusseadmed jm. Vaheharmoonikud võivad tekitada elektrivõrgus küllaltki tugeva resonantsi, kui vaheharmoonikute sagedus ühtib võrgu resonantsisagedusega. Vaheharmoonikud 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 7.2 toodud väärtusi.

Kõrgemaid harmoonikuid **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 7.2 kohased ja $THD \leq 8\%$.

Tabel 7.2 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	6,0	3	5,0	2	2,0
7	5,0	9	1,5	4	1,0
11	3,5	15	0,5	6...24	0,5
13	3,0	21	0,5		
17	2,0				
19	1,5				
23	1,5				
25	1,5				

7.2.7 Signaalpinged

Pinge lainekuju häirivad harmoonikute kõrval ka **toitepingele pealdate signaalpinged** teabe edastamiseks elektrivarustusvõrgus ja tarbijajärgaldises. Eestis on kasutusel sel põhimõttel toimivad **elektriarvestite kauglugemissüsteeme**.

Jaotusvõrgus eristatakse kolme liiki pealdate signaalpingeid:

madalsageduslikud kaugjuhtimissignaali sagedusega **110...3000 Hz**,

kandesagedussignaali sagedusega **3...148,5 kHz** ja

võrgu tähistussignaali (pingekõvera valitud punktile lisatud lühiajalised transiendid).

Normatiivide kohaselt ei tohi signaalpinge **3-sekundiline keskmine 99%** kestel ööpäevast ületada joonisel 7.23 näidatud piire.

Tarbijajärgaldiste toitevõrgus võib kasutada kandesignaale sagedusega 95...148,5 kHz.

Signaalide edastamine tarbijate vahel ei ole lubatud.

7.3 Toitekatkestused

Tarbija seisukohalt on esmase tähtsusega toite katkematus ehk üldisemalt **elektrivarustusstabiilsus**, mida hinnatakse normaalse toitekatkestuse talitluse kestuse järgi antud aja vältel.

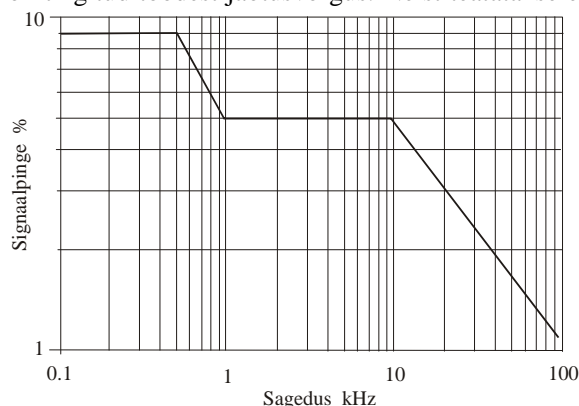
Toitekatkestusi võib liigitada **pikkadeks kestusega üle 3 minuti** ja **lühikesteks**. Lühikesed toitekatkestused sarnanevad pingelohkudega (p 7.2.4).

7.3.1 Toitekatkestuse mõiste

Toitekatkestus on standardi EVS-EN 50160 kohaselt seisund, kus **pinge on** tarnepunktis **vähem 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 teatatakse ette, mistõttu tarbijal on võimalik



Joonis 7.23 Madalpingevõrkude lubatav suhteline signaalpinge protsentides nimipinge suhtes sõltuvalt sagedusest

katkestuse kahjusid minimeerida.

Ootamatuid katkestusi põhjustavad jaotusvõrguvälised sündmused (nt pikne, kaevetööd) või seadmete rikked. Normaalooldes võib aastas esineda mõnikümmend kuni mõnisada lühiajalist toitekatkestust. **Lühiajalisi toitekatkestusi tekitab** automaatne taaslülitamine. Ootamatud pikaajalised toitekatkestused on enamasti põhjustatud välistest sündmustest ja toimingutest, mida elektritarnija ei saa vältida. Normaalooldes võib üle 3 minuti kestvate toitekatkestuste esinemissagedus olla 10...50 korda aastas. Plaaniliste toitekatkestuste orienteerivaid väärtusi ei anta, sest nendest on ette teatatud.

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 väärtoimimise 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 mööduv sundseisak peale sulavkaitsme panuse vahetust. Põhilisteks mööduvate sundseisakute tüüpideks on **seadmete väärtoimimine** (*equipment malfunctioning*) – releede rakendumine siirdevoolude toimel, lülitumised naaberlülitusseadmete tegevusest tingitud voolutõuge mõjul, sulavpanuse väsimine;

kiiresti mööduvad rikked (*fugitive faults*) – okste puuted tuule toimel, lühiajalised maaühendused 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 projekteerimismisnormidest ja mille puhul esinevad
 - ulatuslikud mehaanilised vigastused
 - normaalsest suurema hulga tarbijate toitekatkestused
 - normaalsest pikemad taastamisajad (tavaliselt üle 24 tunni).
- **Lülitusaeg** (*switching time*) – ajavahemik hetkest, mil lülitamine on vajalik, hetkeni, mil see on realselt toimunud.
- **(Tõrketeta) talitusaeg** (*exposure time*) – aeg, mille kestel element täidab oma funktsioone ja võib minna sundseisakusse.
- **Seisakusagedus** ehk **seisakuintensiivsus** (või ka tõrkesagedus ehk tõrkeintensiivsus) (*outage rate, failure rate*) – seisakute arv talitlusaaja ühiku (tavaliselt aasta) kohta. Võib olla määratud erinevate seisakuliikide ja ilmastikuolude jaoks (nt püsisundseisakute 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:
 - **sundkatkestus** (*forced interruption*) – katkestus, mille on põhjustanud sundseisak
 - **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
 - **lühikatkestus** (*momentary interruption*) – määratud kestusega katkestus, mis on vajalik toite automaatseks või käsitsi taastamiseks (nt 5 min)
 - **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:
 - **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

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

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

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

- **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.

7.3.2 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 releekaitse fiidri välja ja toiteta jäävad kõik selle fiidriga seotud tarbijad. Enne kui selgub, et tegemist on püsirikkega, toimub tavaliselt kiirtaaslülitus ja seejärel viittaaslülitus pinge 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 etteteatamine.

Toitekatkestuste kahju on raske kvantitatiivselt määrata. Vaid andmata jäänud toodangut ning tootmisega seotud muid ebakohti (praak, seadmete rikked) võib ligikaudu hinnata. Seevastu kommunaal- ja tööstustarbijatele 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 võrguettevõtete 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.

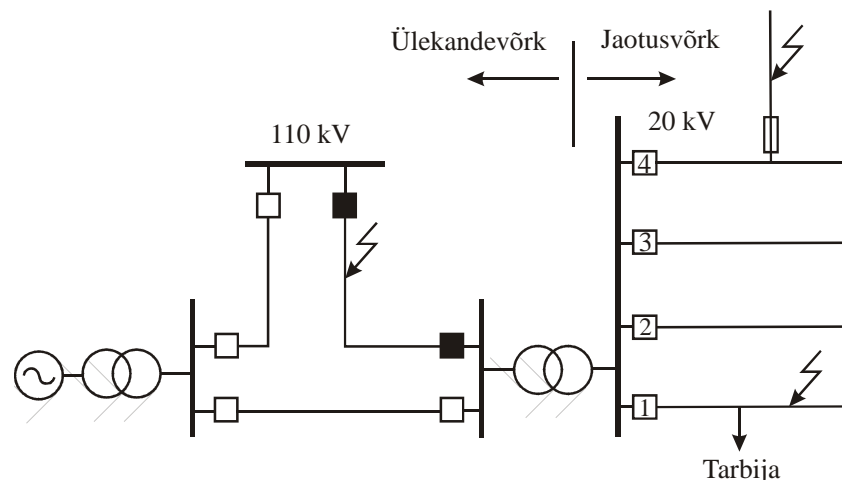
Nõuded toitekatkestuste suhtes fikseeritakse võrguettevõtte ja tarbija vahelises lepingus. Määratakse kindlaks trahvid, mida võrguettevõtte peab maksma, kui katkestuse aeg ületab kriitilise väärtuse. Nii kriitiline aeg kui leppetrahvi suurus sõltuvad tarbija tüübist (nt kodu- või tööstustarbijad). Kõrgema 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.

7.3.3 Lühikesed toitekatkestused

Lühikesi toitekatkestusi tekitavad enamasti **rikked elektrivõrgus**. Keskpingevõrgu õhuliinide rikestest **90% on mööduvad** ning kaovad taaslülituse toimel. **Kiirtaaslülituse tulemusel kaob 75% rikestest**, ülejäänud **15%** likvideerib viittaaslülitus. **Vaid 10%** õhuliinide rikestest 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 releekaitse toimest, tekib pingelohk, mis puudutab kõiki toitepiirkonna tarbijaid.

Joonisel 7.24 esitatud skeemil **kogeb fiidri 1 tarbija rikke hetkel pingelohku** ja sellele järgnevat toitekatkestust juhul, kui rike leiab aset samal fiidril. Fiider **lülitatakse välja releekaitse toimel**, 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 releekaitse sätestest ning võib ulatuda 12 perioodist kuni 5 sekundini sõltuvalt releekaitse 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 lühiste 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.



Joonis 7.24 Rikkekohad võrguettevõtte elektrivõrgus

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.

7.4 Elektri kvaliteedi vajalikkus

Elektri kvaliteedi kõrvalekallede **mõju on mitmesugune**. Osa neist, nagu toodangu vähenemine ja praak, kaitsmete ja juhtimisseadmete väärtiming 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 töömasina 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 väärtiminguid 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.

Seadmed \ Tundlikkus häiringutele	Pingelohud		Liigpinged	Harmoonikud	Ebasümmeetria	Pinge fluktuatsioonid
	< 0,5 s	> 0,5 s				
Asünkroonmootor		■		■		
Sünkroonmootor		■		■		
Aktuaator		■				
Elektrijam	■	■	■	■		
Arvutuskeskus	■	■	■	■		
Induktsioonahi			■			
Valgustus			■			■
Kondensaatorpatari			■			
Trafo			■			
Vaheldi	■	■			■	
Võimsuslülit			■	■		
Kaabel			■	■		

Joonis 7.25 Elektri kvaliteedihäiringute mõju

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

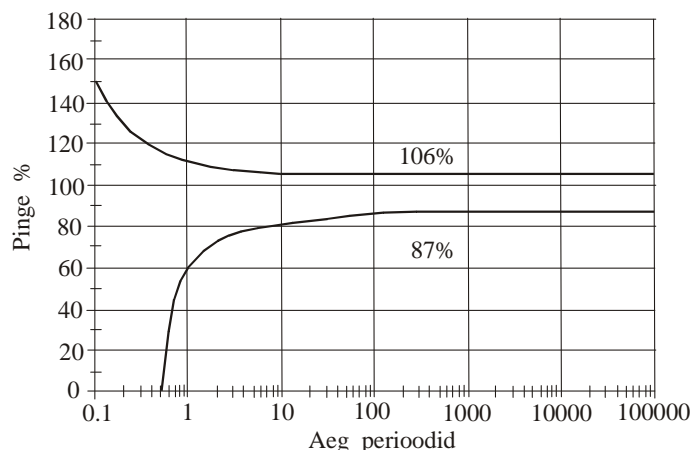
Pingehälbed võivad tekitada probleeme, kui nad ületavad $\pm 10\%$. **Flikker** mõjub häirivalt nägemisaistingule, väsitab silmi ja tekitab stressi. **Toitepinge asümmeetria** põhjustab lisakadusid ja kuumenemist kolmefaasilistes elektrimasinates.

Kokkuvõtlikult näeb elektri kvaliteedihäiringute mõju joonisel 7.25. Allpool vaadeldakse lähemalt nõudeid tundlike seadmete toiteks ning pingelohkude ja lühiajaliste elektrikatkestuste ning harmoonikute mõju.

7.4.1 CBEMA- ja ITI-kõverad

Levinud näidik elektri kvaliteeti hindamisel on **CBEMA-kõver** (*Computer and Business Equipment Manufacturers Association, CBEMA*). See kõver (joonis 7.26) **võeti kasutusele 1980. aastate alguses** kirjeldamaks, kuidas arvutid taluvad toitepinge muutuste ulatust ja kestust. Hoolimata sellest, et tänapäeva

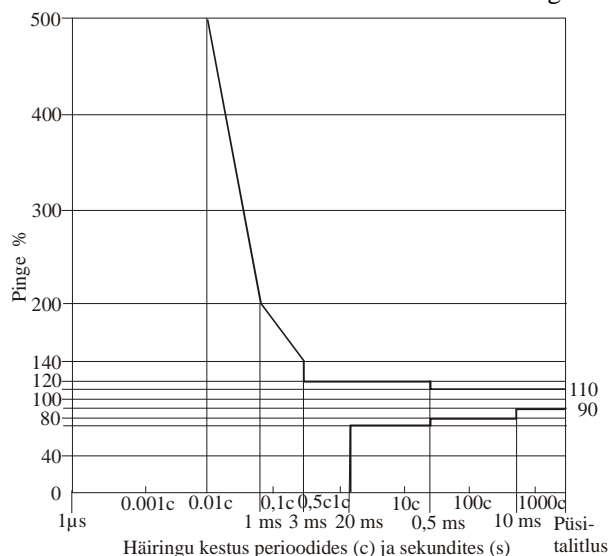
arvutite tolerantsid on palju suuremad, on nendest kõveratest saanud tundlike seadmete projekteerimise lähtekoht ning üldlevinud formaat elektri kvaliteedi mõõteandmete analüüsimisel.



Joonis 7.26 CBEMA-kõver elektri kvaliteedi hindamiseks

Joonise teljed kujutavad pingehälvete ulatust ja kestust. **Kahe joone vahele jääb ala**, kus seadmed peaksid tõrgeteta töötama. Olukorrad, mis asuvad **allpool alumist joont**, põhjustavad seadmete väljalülitusi. **Ülemisest joonest kõrgemal** asuvad punktid põhjustavad isolatsiooni ülelööke, liigpingelist väljalülitumist, üleergutust jne.

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.



Joonis 7.27 ITI-kõver elektri kvaliteedi hindamiseks

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 kaua, kas siis aeglaselt muutudes või konstantse väärtusena. Järgneb piirkond, mis iseloomustab pingepuudumise 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 kondensaatorpatareid 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%

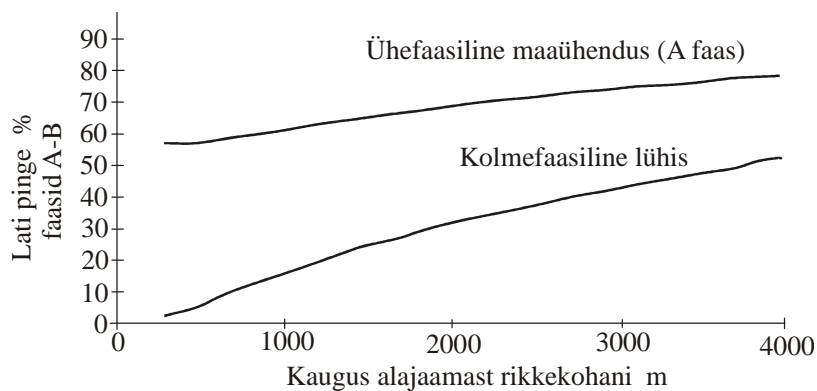
sagedusega 5 kHz. Neljandaks piirkonnaks on tüüpiliselt välgu tagajärjel tekkinud transient, mida iseloomustatakse amplituudi ja kestusega, mitte efektiivväärtusega. Viies ja kuues piirkond vastab 80% ja 70% ulatusega pingelohkudele tüüpilise kestusega 10 ja 0,5 sekundit. Need pingelohud tekivad suurte koormuste lülitamisest ja riketest võrgus. Seitsmes piirkond hõlmab tekkivaid rikkeid ning järgnevat rikete kadumisi. Siia kuuluvad nii pingelohud kui ka katkestused, millele järgneb kohe pinge nimiväärtuse taastumine. Kestuseks võib olla kuni 20 ms.

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.

7.4.2 Pingelohud ja lühikesed toitekatkestused

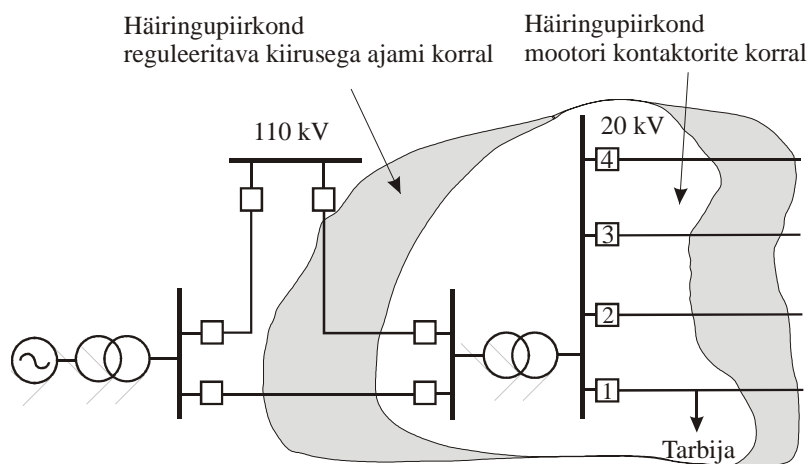
Valgustus- ja turvaseadmete ning arvutite ja muude mikroprotsessorseadmete kõrval võivad pingelohkude ja toitekatkestuste suhtes olla **tundlikud asünkroonmasinad**. Pinge langemisel suureneb asünkroonmasina libistus ja väheneb tema maksimaalmoment võrdeliselt pinge ruuduga. Sõltuvalt pingelohu või katkestuse kestusest ning asünkroonmasina enda ja töomasina 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 lülitada võivad ka mootorite **kontaktorid ja muud juhtimiseadmed**. 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 7.28 on näide rikkekohta kauguse ja rikke tüübi mõjust radiaalse konfiguratsiooniga jaotusvõrgus.



Joonis 7.28 Näide pingelohu ulatusest tarbija juures funktsioonina rikkekohta kaugusest paralleelfiidris

Pingelohkude mõju iseloomustab **mõiste kahjustatavuspiirkond**. 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 (väärtötamine või väljalülitumine). Joonisel 7.29 on jaotusvõrgust toidetava tarbija kahjustatavuspiirkond mootori kontaktorite ja reguleeritava kiirusega ajami koormuste korral.



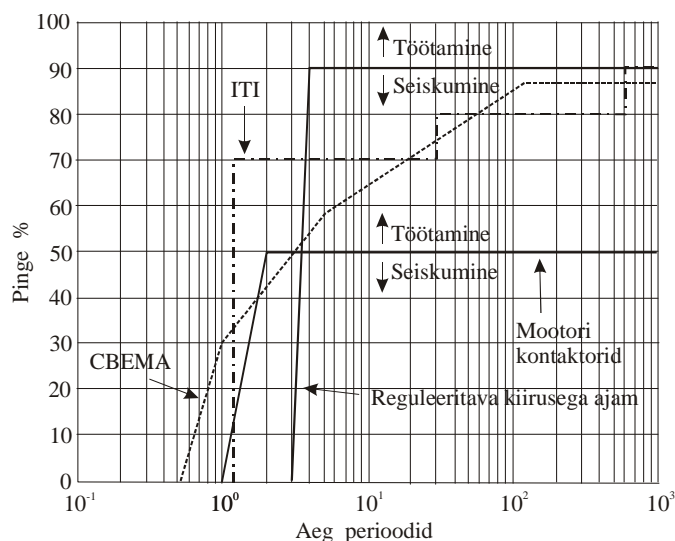
Joonis 7.29 Häiringupiirkonnad

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.

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, elektrijamite juhtimissüsteemid ning mitmesugused automatiseeritud masinad.
- Seadmed, mis on **tundlikud nii pingelohu ulatuse kui ka kestuse suhtes**. Rühma kuulub enamik seadmeid, mille toiteskeemides kasutatakse jõuelektroonikat. 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 7.30 on sellised kõverad kontaktorjuhtimisega elektrimootorite ja sätestatava kiirusega ajamite kohta. Esitatud on ka *ITI*- ja *CBEMA*-kõverad.



Joonis 7.30 Tüüpilised seadmete pingelohu eduka läbimise võime 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

7.4.3 Harmoonikute tagajärjed

Mittelineaarsete koormuste põhjustatud vooluharmoonikud **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 harmoonmoonutustegur **ületada 8%**, kuid probleemid tekivad juba siis, kui see tegur on 5...6% (tabel 7.3). Tabelis on harmoonikute variatsioonitegur (*harmonic variation factor*).

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

Kondensaatorpatareide reaktants **väheneb pöördvõrdeliselt sagedusega**. Tulemuseks võivad olla **suured vooluharmoonikud**, mis koormavad üle kondensaatorpatareid ja võivad põletada läbi sulavkaitsmed. Harmoonikud tõstavad dielektrikuskadusid, mis põhjustab täiendavat soojenemist ja kondensaatorpatareid elua lühenemist. Kondensaatorpatareid koos toiteallika induktiivsusega võivad moodustada **paralleelresonantsahela**. Resonantsi korral harmoonikud võimenduvad ning nende põhjustatud pinged ületavad oluliselt nimipingeid. Tulemuseks on kondensaatorpatareid rikked või sulavkaitsmete läbipõlemine.

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

Tabel 7.3 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)	$U_h / U_l \leq 6...12\%$
Kaablid	Täiendavad dielektrilised ja oomilised kaod	$THD_U \leq 10\%$, $U_h / U_l \leq 7\%$
Arvutid	Talitluse probleemid	$U_h / U_l \leq 5\%$
Jõuelektronika	Lainekujust tingitud probleemid (kommutatsioon, sünkroniseerimine)	

Pöörlevate masinate korral suurendavad harmoonikud **vases- ja rauaskadusid** ning masinad kuumenevad. 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. Mõõteseadmete reageering mittesiinuseliste signaalidele erineb. Harmoonikud kahjustavad elektroonikaseadmete ja juhtimisahelate tööd otseselt ja ka nullpunkti nihke tõttu.

7.5 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*).

7.5.1 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

- **teisaldatavad**, 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 pingele, voolu ja sageduse väärtuse, pingemuutused, pingelohud ja värelevuse, pingele vastujärgnevus-, null- ja alaliskomponendi väärtused jm, samuti andmed toitekatkestuste kohta. Andmed säilitatakse mõõturi mälus 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 7.4). 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 7.4 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 värelustegur	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
Harmonoonmoonutustegur	10 min	1 nädal
Signaalpinge %	3 s	1 päev

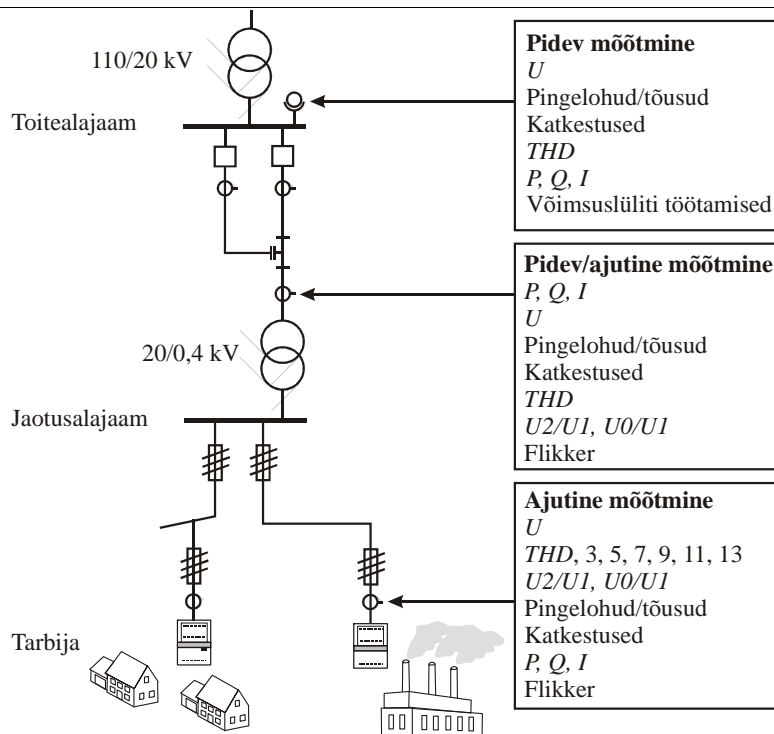
Selleks et õigel ajal avastada kõrvalekalded elektri kvaliteedis ja välja selgitada nende põhjused, läheb vaja **seiresüsteemi**. Seiresüsteem tugineb statsionaarselt paigaldatud multifunktsionaalsetele mõõturitele. Mõõteandmed edastatakse andmeedastussüsteemi kaudu keskusesse, kus andmeid töödeldakse.

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 kurtnud 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 7.31 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 teisaldatavate mõõturitega kindla kava kohaselt.



Joonis 7.31 Kvaliteedi seiresüsteem

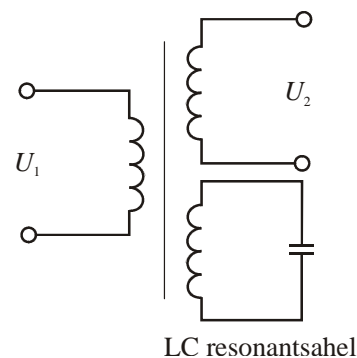
7.5.2 Pingelohkude mõju vähendamine

Ohtlike **pingelohkude mõju vähendamiseks** võivad mõndagi teha nii võrguettevõtte 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 tundlikke 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 ettevõteteni.

Ferroresonantstrafod on pingele kvaliteeti tõstvad seadmed, mis suudavad toime tulla enamiku pingelohkude tüüpidega. Tegemist on trafoga, mille **ülekanadesuhe on 1:1** ning mis **talitleb südamiku püsiva küllastumise juures**. Seetõttu ei avalda primaarpinge muutused mõju südamiku magnetvoo tihedusele ning trafo sekundaarmähise väljundpinge on peaaegu konstantne olenemata primaarmähise sisendpinge muutustest. Südamiku küllastumine põhjustab **siinuspinge moonutusi**, tekitades harmoonikuid. Harmoonikute väljafiltreerimiseks on trafol **lisasekundaarmähis** (joonis 7.32), 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.

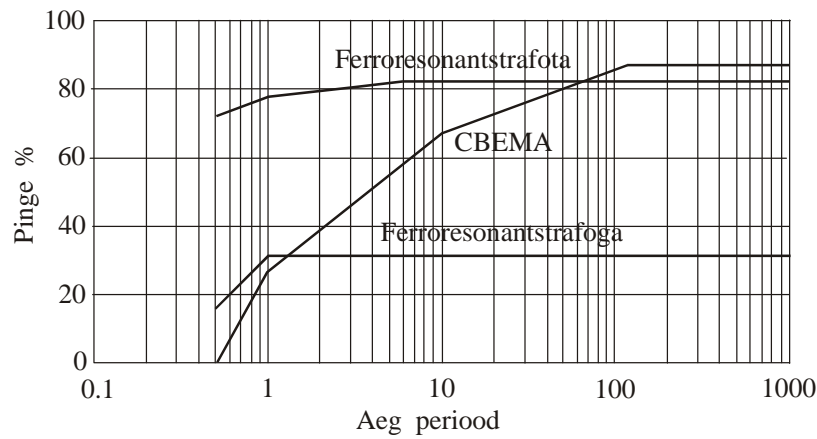
Ferroresonantstrafode **eeliseks on lihtsus** jõuelektroonikaseadmetega võrreldes. Ferroresonantstrafod taluvad hästi ülekoormust ja transientliigpingeid, kuid nende kaod ja reaktiivvõimsuse tarve on suured. Trafod sobivad enam **püsivate koormuste korral**. Muutuvad koormused, eriti aga suured käivitusvoolud,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

Ferroresonantstrafoga **nimivõimsus peaks olema tunduvalt suurem kui koormus**, mille tarvis see on mõeldud. Ferroresonantstrafoga mõju pingelohu eduka läbimise võimele on kujutatud joonisel 7.33.



LC resonantsahel

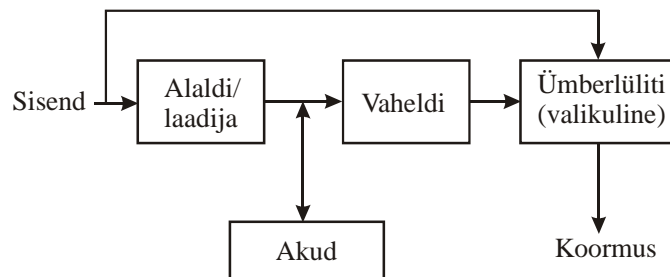
Joonis 7.32 Ferroresonantstrafoga põhimõtteskeem



Joonis 7.33 Seadme pingelohu eduka läbimise võime suurenemine ferroresonantstrafoga kasutamisel

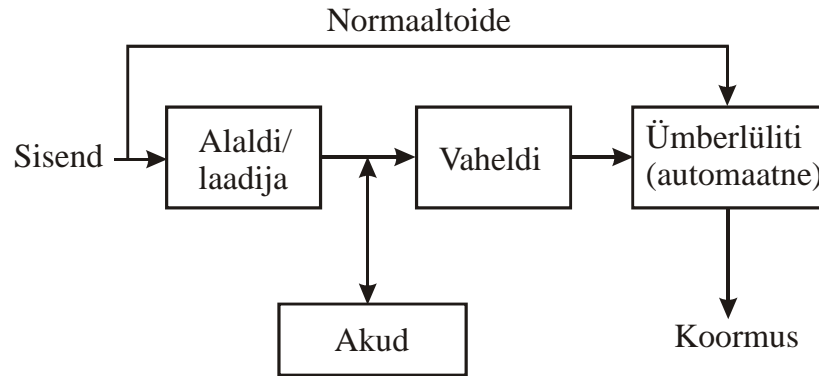
Lubatud **pingelohk sõltub ka koormusest**. Koormuse tõusmisel lubatava pingelohu **sügavus väheneb**. Ferroresonantstrafot kasutatakse tavaliselt koormustel kuni 3 kVA. Kolmefaasilised ferroresonantsil põhinevad seadmed (*magnetic synthesizers, MS*) on võimelised pingelohkudega paremini toime tulema. Selliseid seadmeid võimsusega kuni 200 kVA kasutatakse suurtes arvutisüsteemides ja muude konstantse koormusega toitesüsteemides.

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 7.34 on tüüpilise **otselülituses UPSi** konfiguratsioon. Siin alandatakse 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.



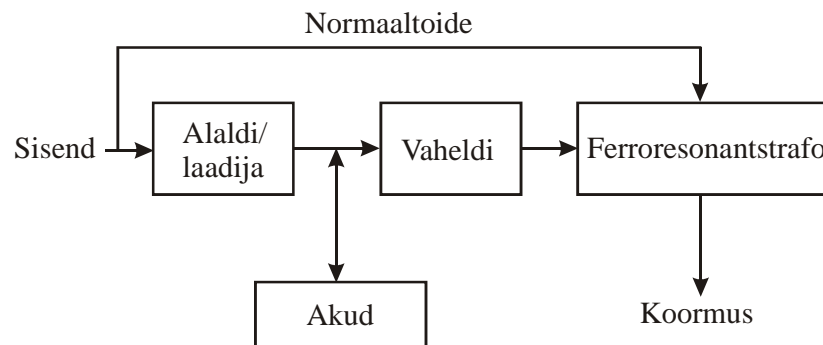
Joonis 7.34 Otselülituses UPSi skeem

Varutoimega UPSi korral toidetakse tavatalitluses tarbijat otse võrgust (joonis 7.35). Hetkel, kui tuvastatakse häiring, lülitatakse koormus ümber vaheldile, mida toidetakse akudelt. Sellise **UPSi** korral on oluline ümberlülitamise aeg, mis **CBEMA**-kõvera 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.



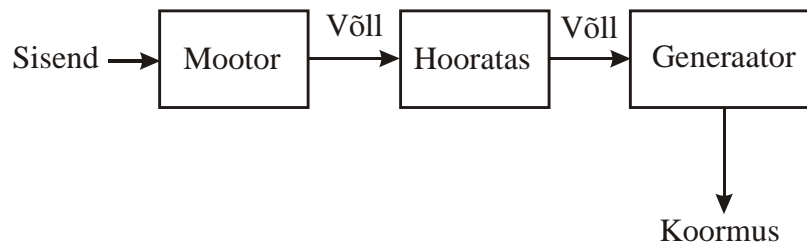
Joonis 7.35 Varutoimega UPSi skeem

Hübriid-UPSi konfiguratsioon (joonis 7.36) sarnaneb varutoimega UPSi konfiguratsiooniga, kuid võimaldab reguleerida väljundi pinget ning kiiret ümberlülitust tavatalitlusest UPSi-talitluse. Kasutatakse võimsustel 5...50 kVA.



Joonis 7.36 Hübriid UPSi skeem

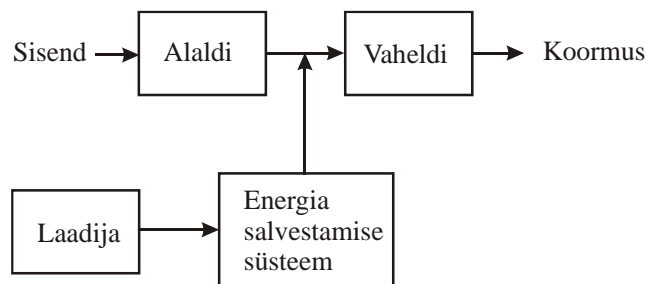
Mootori-generaatorisüsteemi tuntakse juba väga kaua aega, kuid seda kasutatakse ka tänapäeval. Seadme tööpõhimõte on lihtne (joonis 7.37). Võrgust toidetav mootor käitab generaatorit, millega on ühendatud koormus. Häiringut võimaldab läbida hooratta inerts. Lahenduse puuduseks on masinatega seotud kaod ja hoolduse vajadus. Ka põhjustab sageduse ja pinge langus häiringu ajal masina aeglustumise, mis ei pruugi iga koormuse korral sobida.



Joonis 7.37 Mootori-generaatorisüsteemi skeem

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 diiseldisgeneraatoriga							< 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 7.38), 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 tühjendamistsüklite jooksul. Ülijuhtivuse saavutamiseks tuleb magnetit jahutada kuni 4,2 °K. Tüüpiline ülijuhtiv süsteem on võimeline kaitsma kuni 8 MVA võimsusega tarbijaid kuni 25% pingelohu korral 10 sekundi jooksul.



Joonis 7.38 Ülijuhtiva energiasalvesti põhimõtteskeem

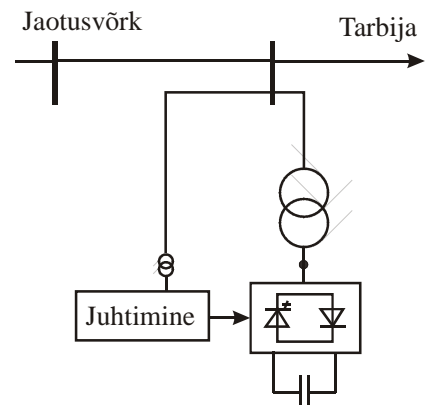
Erinevate lahenduste sobivuse hindamisel konkreetse tarbija tarvis tuleb lähtuda tehnilistest tingimustest ja piirangutest. Samuti ei saa unustada majanduslikku külge. Kokkuvõtlikult on reservtoiteallikaid iseloomustatud tabelis 7.5.

Võrguettevõttel on pingelohkude ja katkestuste vähendamiseks rida võimalusi. Siia kuuluvad

- neutraali maandamine läbi kaarekustuspooli
- regulaarne puude piiramine

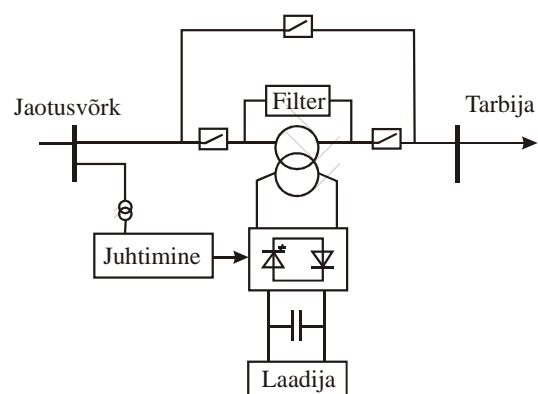
- isoleeritud juhtmete kasutamine
- silmusskeemide kasutamine
- fiidrite skeemide modifitseerimine
- releekaitse parem koordineerimine
- jõuelektronikal põhinevate kompensatorite rakendamine.

Jõuelektronikal põhinevates kompensatorites kasutatakse ära nii nagu põhivõrgus rakendatavates FACTS-seadmeteski ahelate kiire kommuteerimise võimalused. Joonisel 7.39 on võrguga põiki ühendatud staatilise kompensatori (STATCOM) põhimõtteskeem, mis võimaldab reguleerida reaktiivvõimsust võrgu sõlmes nii genereerimise ($U_3 > U_2$) kui tarbimise ($U_3 < U_2$) 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.



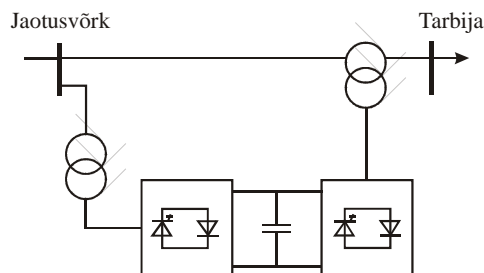
Joonis 7.39 STATCOMi põhimõtteskeem

Dünaamiline pingetaastaja (*dynamic voltage restorer, DVR*) on võrgu suhtes pikilülituses (joonis 7.40). Erinevalt STATCOMist avaldab DVR mõju ainult tema taha jäävale võrgu osale. Seade reguleerib tarbijale antavat pinget, lisades vajaduse korral täiendavalt kompenseerimiseks sobiva amplituudi, sageduse ja nurgaga pinge komponendi (joonis 7.41). Kasutusel on DVR-seadmeid võimsusega kuni 50 MVA.

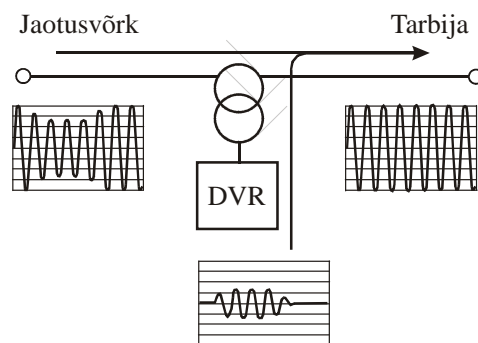


Joonis 7.40 DVRi põhimõtteskeem

STATCOM- ja DVR-seadmete kombineerimisel (joonis 7.42) on tulemuseks seade, mida kutsutakse ühitatud võimsusvoogude regulaatoriks (*unified power flow controller, UPFC*). Sisuliselt on selle seadmega võimalik reguleerida mitmesuguseid elektrivõrgu talitusparameetreid, 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.



Joonis 7.42 UPFC põhimõtteskeem



Joonis 7.41 DVRi mõju tarbija pingele võimalike häiringute korral võrgus

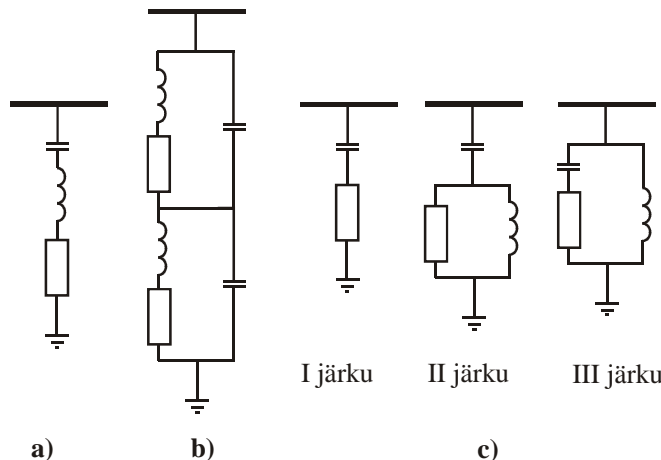
7.5.3 Harmoonikute vähendamine

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 eesmärgi võib täita ka reaktor, mille lisamisel muudetakse võrgu parameetreid.

Harmonikute vähendamiseks kasutatavaid **filtreid liigitatakse passiivseteks ja aktiivseteks**.

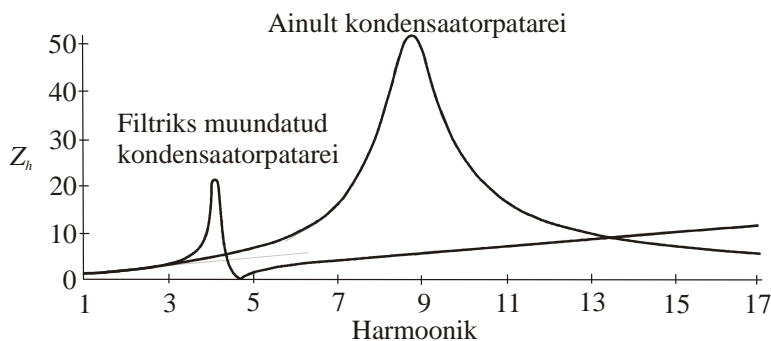
Passiivfiltrid koosnevad kondensaatorist ja reaktorist, mis on seadistatud teatud harmooniku sagedusele. Teoreetiliselt on filtril sellel sagedusel nulltakistus ning sellest tulenevalt läbib seda vastava harmooniku vool ning harmooniku pingeline võrdub nulliga. Tüüpilised filtrite skeemid on joonisel 7.43.



Joonis 7.43 Tüüpiliste harmoonikute filtrite lülitused: pikiühenduses filter (a), topelt ribapääsufilter (b) ning esimest, teist ja kolmandat järku summutusfilter (c)

Passiivfiltrite kasutamine vähendamaks harmoonikute mõju on levinud nende odavase töttu võrreldes teiste moodustega. Puuduseks on võimalik ebasoodne vastasmõju elektrivõrguga (paralleelresonants) ja häälestuse mittestabiilsus ajas.

Pikiühenduses filtrid (joonis 7.43a) 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 7.43b on topelt ribapääsufilter, milles on pikiühenduses põhikondensaator, põhireaktor ja häälestamisseade, mis koosneb paralleelselt lülitatud reguleerkondensaatorist ja -reaktorist. Sellise filtri impedants on madal kahel häälestatud sagedusel. Joonisel 7.43c 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 7.44 Viienda harmooniku filter ja selle mõju võrgu karakteristikule

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 7.44). Tekitavat resonantssagedust peab oluliselt erinema võrgus esinevate muude harmoonikute sagedusest. Joonisel 7.45 on firma Nokia Capacitors passiivfilter.

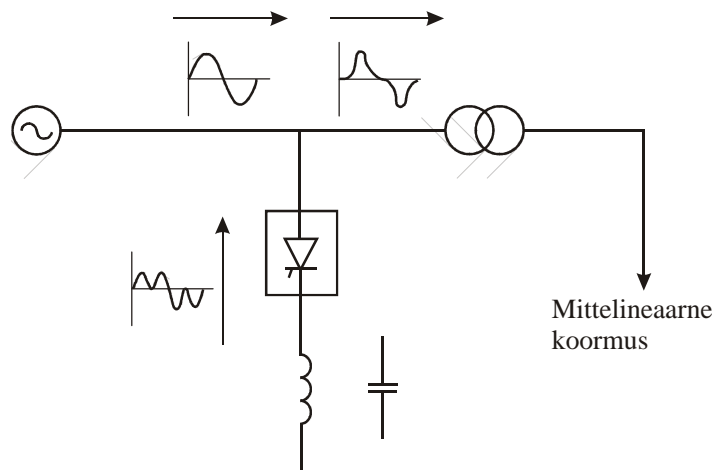


Joonis 7.45 Harmoonikute filter

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 korraga summutada rohkem kui ühte harmoonikut ning aidata kaasa teiste kvaliteediprobleemide (nt flikkeri) leevendamisele.

Aktiivfiltri põhimõte on asendada see osa siinuslainest, mis mittelineaarse koormusvoolu korral on moonutatud (joonis 7.46). Elektrooniline juhtimisseade jälgib liini voole ja pingeid ning lülitab jõuelektroonikaseadmeid 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.

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 harmoonik



Joonis 7.46 Aktiivfiltri põhimõtteskeem