



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

ELEKTROTEHNIKA INSTITUUT

Ehitajate tee 5 TALLINN 19086 Tel 620 3800

Aruanne

Nr 19062

Toitepinge kvaliteet Eesti 0,4 kV madalpingevõrkudes ja tarbijapaigaldiste liitumispunktides

Töö põhitäitja:
Toomas Vinnal

Instituudi teadus- ja
arendustööde
koordinaator:
Aleksander Kilk

Sisukord

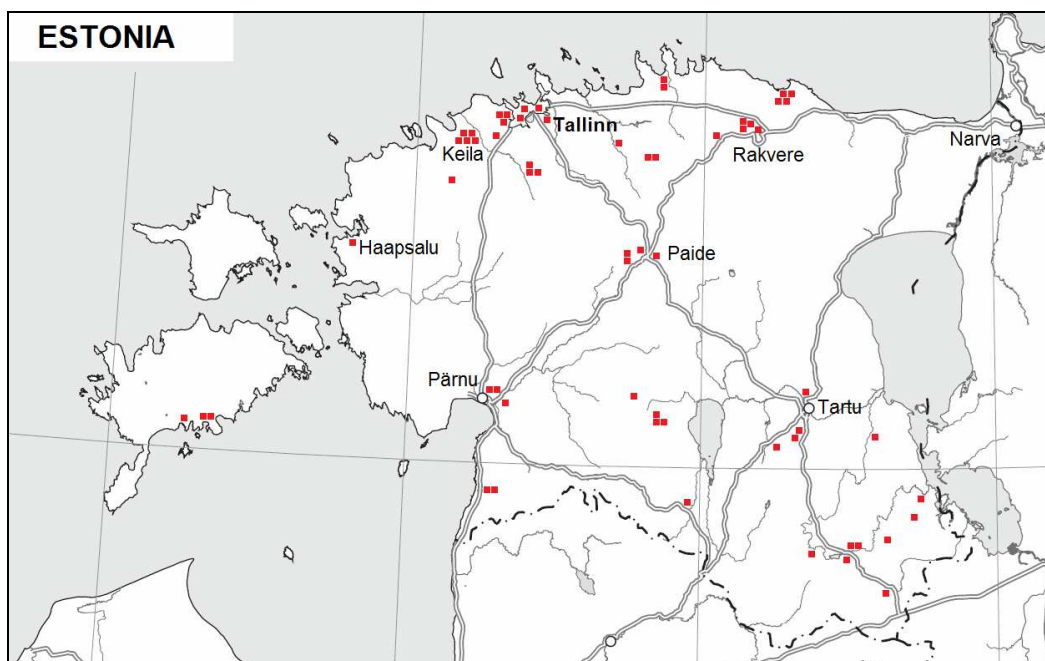
| | |
|---|----|
| Sissejuhatus | 2 |
| 1. Uuringu tulemuste lühikokkuvõte ja järeldused | 3 |
| 2. Toitepinge ja elektrivarustuse kvaliteet | 4 |
| 3. Pinge kvaliteedi analüüsi meetoodika | 7 |
| 4. Toitepinge kvaliteeti iseloomustavad parameetrid ja mõõtetulemused | 9 |
| 4.1 Toitepinge kvaliteedi parameetrid ja standardid | 9 |
| 4.2 Toitepinge sagedus | 10 |
| 4.3 Toitepinge suurus ja pingeniivo | 11 |
| 4.3.1 Pingeniivo, selle keskmine väärtus ja hajuvuse ulatus | 13 |
| 4.3.2 Toitepinge suuruse mõõtetulemuste analüüsi meetoodika | 14 |
| 4.3.3 Toitepinge niivo mõõtetulemused | 15 |
| 4.4 Lühiajalised võrgusagedusliku pingehälbed – pingelohud ja pingemuhud | 18 |
| 4.4.1 Pingelohud ja pingemuhud | 18 |
| 4.4.2 Pingehälvete mõõtetulemused | 19 |
| 4.4.3 Pingehälvete ulatuse-kestuse diagramm | 20 |
| 4.5 Harmoonilised moonutused toitepinges ja toitevoorus | 22 |
| 4.5.1 Harmoonilised pinged ja voolud | 22 |
| 4.5.2 Pinge ja voolu harmooniliste moonutustegurid ja seosed | 23 |
| 4.5.3 Harmooniliste pingete ja voolude lubatavad piirväärtused | 24 |
| 4.5.4 Pinge harmooniliste moonutuste mõõtetulemused | 25 |
| 4.6 Toitepinge muutustega seotud valguse värelus ehk flikker | 27 |
| 4.7 Toitepingete asümmeetria | 29 |
| 5. Toitepinge kvaliteedi mõju elektriseadmetele ja elektritarbimisele | 32 |
| 5.1 Toitepinge niivo probleemi aktuaalsus ja pingeniivo reguleerimise vahendid | 32 |
| 5.2 Toitepinge harmooniliste moonutuste mõju tarbijatele | 33 |
| 6. Aktiiv- ja reaktiivvõimsuse tarbimise sõltuvus pingeniivoost | 35 |
| 6.1 Aktiiv- ja reaktiivkoormuse staatilised mudelid | 35 |
| 6.2 Aktiivvõimsuse ja reaktiivvõimsuse pingesõltuvuse katseline määramine | 36 |
| 7. Kokkuvõte ja järeldused | 39 |
| 7.1 Toitepinge kvaliteedi mõju elektriseadmetele | 39 |
| 7.2 Pingeniivo | 39 |
| 7.3 Lühiajalised pingehälbed (ehk pinge sündmused) | 40 |
| 7.4 Pinge harmoonilised moonutused | 40 |
| 7.5 Pinge värelus ja pingete asümmeetria | 41 |
| 7.6 Elektrisüsteemi pingesõltuvuse määramine | 41 |
| 8. Ettepanekud võrguettevõtetele ja tarbijatele toitepinge kvaliteedi parendamiseks | 41 |
| Lisa 1. Näiteid toitepinge parameetrite mõõtetulemustest | 44 |

Toitepinge kvaliteet Eesti 0,4 kV madalpingevõrkudes ja tarbijapaigaldiste liitumispunktides

Sissejuhatus

Käesolevas töös on esitatud ülevaade toitepinge kvaliteedi põhilistest parameetritest, neid reguleerivatest standarditest, mõõtetulemustest Eesti madalpingevõrkudes, pinge kvaliteedi mõjust elektritarbimisele ning abinõudest pinge kvaliteedi parendamiseks. Töös on välja toodud toitepinge järgmiste parameetrite mõõtetulemused - pingeniivo ja selle hajumine, pingehälvete ulatus ja kestus ning seni väheuuritud pinge harmooniliste moonutuste, väliluse ehk flikkeri ja pingete asümmeetria taseme kohta Eesti madalpingevõrkudes. Välja on toodud meetodika pingeniivo analüüsimiseks ja hindamiseks ning ettepanekute ja soovitude andmiseks pingeniivo optimeerimisel. Samuti on esitatud iseloomulikke näiteid toitepinge parameetrite mõõtetulemustest. Pinge kvaliteedi parameetrid on esitatud statistiliste arvvaartustena ning graafilisel kujul, mis võimaldab toitepinge parameetrite sobivust ülevaatlukult hinnata. Samuti on töös esitatud soovitusi ja ettepanekuid madalpinge (0,4 kV) elektrisüsteemide ning samuti keskpinge (6...35 kV) jaotusvõrkude täiendamiseks ja seadistamiseks lähtudes energiatarbimise optimeerimise, võimsuskadude vähendamise ning häiringute vähendamise vajadusest tarbija elektrisüsteemides.

Pinge kvaliteedi parameetrite registreerivad mõõtmised on läbi viidud aastatel 2002 ... 2012 Eesti erinevates piirkondades, vt joonis 1. Mõõtetulemusi on kokku ca 70-s mõõtepunktis erinevates liitumispunktides, millest suure osa moodustavad tootmis- ja kaubandusettevõtted, büroohood ja ka väiksemad tarbijad. Mõnedes mõõtepunktides on pingeparameetrid registreeritud korduvalt või pikema kui üks nädal ajavahemiku vältel. Toitepinge parameetrid on peamiselt registreeritud tarbijate liitumispunktides 0,4 kV poolal ja alajaama madalpinge poolal, kuhu on vähemalt üheks nädalaks ühendatud pingekvaliteedi analüsaator LEM-Memobox 300 või 800, mis registreerib pingeparameetrid vastavalt standardile EN 50160.



Joonis 1. Mõõtepunktide asukohad toitepinge kvaliteedi mõõtmistel

1. Uuringu tulemuste lühikokkuvõte ja järeldused

Ideaalse kvaliteediga toitepinget tegelikkuses ei esine. Toitepinge kvaliteedi hälbeid ideaalsest põhjustavad tarbijad ise oma koormustega, aga samuti avariid ja lülitused ülekande- ja jaotusvõrgus ning loodusnähtused. Enamasti jääb toitepinge kvaliteedi mõju elektri-seadmetele märkamatuks, kuni ei teki häiringuid või tõrkeid elektriseadmete töös. Käesolevas uuringus on jõutud järgmiste seisukohtadeni.

Toitepinge kvaliteet tarbija liitumispunktis sõltub järgmistest teguritest:

- tarbija enda koormused.
- jaotusvõrgu parameetrid.
- juhuslikud tegurid, loodusnähtused, avariid.
- teiste tarbijate koormused samas võrgupiirkonnas.

Kõige olulisemad toitepinge parameetrid nii tarbija kui ka jaotusvõrgu jaoks on järgmised:

- pingeniivoo ja selle hälbed;
- harmoonilised moonutused toitepinges ja toitevoolus;
- pingelohud ja toitekatkestused;
- pingete asümmeetria kolmes faasis.

Nendest kõige olulisemad on pingeniivoo, pinge harmoonilised moonutused ja pingelohud. Pingete märkimisväärne asümmeetria esineb harva või ainult lühiajalistes avariitalitlustes.

Pinge kvaliteedi mõõtetulemused tarbijate liitumispunktides vastasid peaaegu kõigil läbiviidud mõõtmistel standardile EVS-EN 50160:2007. Pinge kvaliteet ei vastanud standardile ainult üksikjuhtudel. Seega ei võimalda võrdlemine ainult standardis sätestatud normidega otsustada, kas pinge kvaliteet on antud elektrisüsteemile optimaalne või mitte. Lisaks standardis toodud piirväärtustele on tarbija või jaotusvõrgu piirkonna jaoks kasulik määratleda oma elektrisüsteemile optimaalsed parameetrid.

Pingeniivoo optimeerimine (reguleerimine) nii jaotusvõrkudes kui ka tarbijate madalpinge elektrisüsteemides koos reaktiivvõimsuse kompensatsiooniga on üks kõige olulisemaid abinõusid elektritarbimise optimeerimisel. Neid kahte abinõud tuleb rakendada üheskoos, sest reaktiivvõimsuse kompensatsioon mõjutab otseselt ka toitepinget.

Elektrisüsteemi talitluse optimeerimisel on oluline teada, kuidas pingeniivoo mõjutab tarbitavat aktiiv- ja reaktiivvõimsust. Aktiivvõimsuse ja reaktiivvõimsuse sõltuvust pingest püsiolukorras kirjeldavad koormuse staatilised mudelid. Mudelite parameetrite määramiseks on töös esitatud katseline meetodika, mis on hõlpsasti läbiviidav. Katset saab korrata mitu korda ja tarbija või elektrisüsteemi võimsuste pingesõltuvus ongi olemas.

Pingelohud ja lühiajalised katkestused on sageli nii tarbija kui ka jaotusvõrgu jaoks kõige suurem ja häirivam probleem. Samuti on lahendused selle probleemi leevendamiseks vägagi kulukad. Peamiselt jagunevad pingelohud suurte mootorite käivituste tagajärjel tekkinuteks ja jaotusvõrgust või ülekandevõrgust lähtuvateks. Pingelohkude koguarvu, sügavuse ja mõju vähendamiseks on võimalusi nii tarbijal kui ka jaotusvõrgul, sh jaotusvõrgu konfiguratsiooni optimeerimine ja/või rekonstrueerimine.

Toitepinge ja -voolu harmooniliste moonutuste tõttu tekivad täiendavad lisakaod elektrimootorites, trafodes, kaablites ja kondensaatorites ja ka häiringud kaitse- ja juhtsüsteemide töös. Harmooniliste moonutuste vähendamiseks on erinevaid võimalusi, eeskätt toiteahela lühisvõimsuse (trafo võimsuse ja liinide ristlõike) suurendamine.

2. Toitepinge ja elektrivarustuse kvaliteet

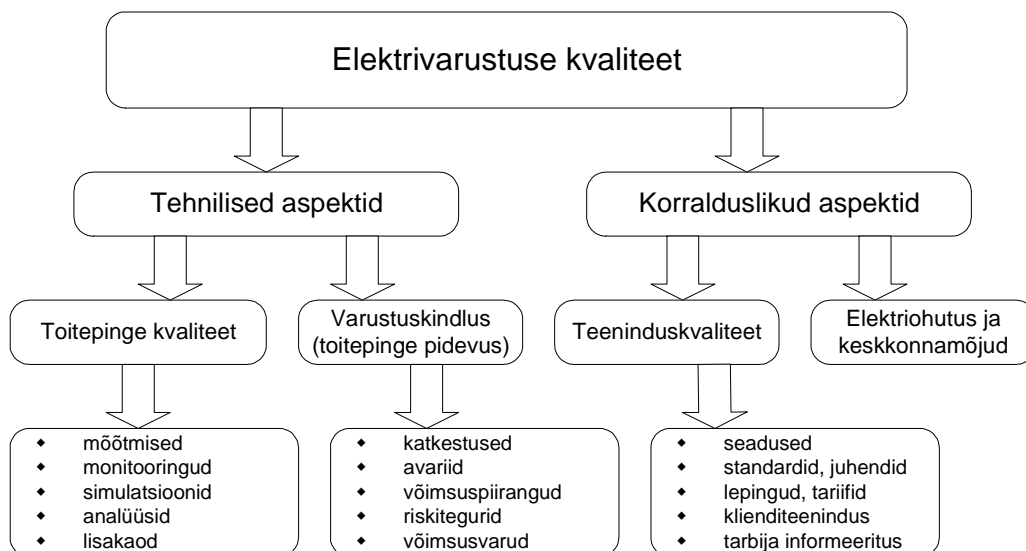
Toitepinge kvaliteet on üks osa laiemast mõistest - elektrivarustuse kvaliteet, mis hõlmab nii tehnilisi, majanduslikke kui ka lepingulisi valdkondi elektrienergia müüja ja ostja vahel. Tähelepanu toitepinge kvaliteedi probleemidele on viimastel aastatel märgatavalt kasvanud mitmel objektiivsel põhjusel (näiteks on tõusnud elektrienergia hind, seadmete tundlikkus pingekvaliteedi hälvetele on kasvanud jms.).

Kokkuvõtlikult hõlmab elektrivarustuse kvaliteet järgmisi valdkondi (joonis 2):

- elektrivarustuse töökindlus (toitepinge varustuskindlus),
- toitepinge kvaliteet,
- elektrivarustuse ohutus (käiduohutus),
- elektrivarustuse keskkonnamõjud,
- elektritarbija informeeritus,
- elektrienergia hind ja selle komponendid.

Osa neist küsimustest on Eestis reguleeritud Energiaseadusega, Elektrituruseadusega ning vastava standardiga, osa elektrienergia müüja ja ostja vaheliste lepingutega ning elektrienergia hinnakujundusega. Peale selle on elektrienergia müüja ja elektrienergia ostja (tarbija) suhetes ka küsimusi, mis on reguleerimata.

Elektrivarustuse töökindluse osas tuuakse elektrienergia ostu-müügilepingus tavaliselt välja katkestuste lubatud summaarne kestus aastas. Katkestuste koguarv ja esinemissagedus pole fikseeritud. Toitepinge kvaliteet tarbija liitumispunktis peab vastama standardile EVS-EN:50160, kuid seejuures ei tehta vahet pinge kvaliteedil ilma tarbija koormuseta ning koos tarbijapoolse mõjutusega pinge parameetritele.



Joonis 2. Elektrivarustuse kvaliteediga seotud valdkonnad

Tarbija seisukohalt on olulise tähtsusega elektri varustuskindlus (*reliability of power supply*) ehk toitepidevus (*supply reliability*). Toitekatkestus on standardi EVS-EN 50160 kohaselt seisund, kus pinge on tarnepunktis väiksem kui 1% lepingulisest pingest. Praktikas võiks toitekatkestuseks lugeda olukorda, kus pinge on väiksem kui 50% võrgu nimipingest. Ootamatuid katkestusi põhjustavad loodusnähtused, kaevetööd või seadmete (liinide, jaotusseadmete) avariid ja rikked. Tarbija seisukohalt olulised parameetrid on katkestuste koguarv aastas ning nende summaarne ajaline kestus.

Elektrivarustuse teeninduskvaliteet hõlmab eelkõige suhteid elektrienergia müüja ja ostja vahel ning tarbija informeeritust. Informeeritus on tänu veebikeskkonnale tunduvalt paranenud, kuid siin on ka arenguruumi. Tarbijal on kasulik teada, millised investeeringud puudutavad tema võrgupiirkonda, missugune on toitepinge kvaliteet tema liitumispunktis jne. Tänapäevase seisuga on tarbijal võimalik tellida tagasiulatavalt aktiiv- ja reaktiivvõimsuse tunnipõhised koormusgraafikud, toitepinge kvaliteedi osas selline võimalus praegu puudub. Elektriarvestite ja veebikeskkonna tarkvara arenedes tekib ilmselt lähitulevikus võimalus tarbijal jooksvalt andmeid saada nii tarbitava võimsuse kui ka pingekvaliteedi parameetrite kohta. Selleks sobivad elektriarvestid (multifunktsionaalsed kaugloetavad arvestid) on juba praegu olemas.

Toitepinge kvaliteeti mõjutavad tegurid, kvaliteeditasemed

Toitepinge kvaliteet on osa laiemast valdkonnast – elektrivarustuse kvaliteedist. Ühest küljest mõjutab toitepinge kvaliteet otseselt energiatarbimist, tõrgete ning häiringute ulatust elektriseadmete töös ning tarbija kulutusi toodangu- või teenuseühikule. Teisest küljest on ettevõtete seadmeпарк ja tootmistehnoloogiad muutunud järjest keerukamaks ning toitepinge kvaliteedihälvete suhtes tundlikumaks. Lisaks on ka elektrienergia hind aja jooksul pidevalt kasvanud.

Ideaalne toitepinge ja reaalne pinge.

Ideaalne toitepinge ehk ideaalse kvaliteediga toitepinge on pinge, mida iseloomustavad järgmised omadused:

- toitepinge sagedus on võrgu nimisagedus, Eestis 50 Hz;
- toitepinge suurus vastab antud võrgu nimipingele, Eesti madalpingevõrkudes enamasti 230/400 V;
- toitepinge võrgusagedusliku hälbed (pingelohud ja pingemuhud) puuduvad;
- toitepinge (etteteatamata) katkestused puuduvad;
- toitepinge harmoonilised moonutused on tühiselt väikesed, pingekõver on ideaalse siinuskujuga;
- faasipinged kolmefaasilises süsteemis on täiesti sümmeetrilised.

Tegelikkuses ideaalset toitepinget ei esine. Teatud mööndustega võiks ideaalseks lugeda pinge elektriijaama generaatori klemmidel. Mida kaugemale elektriijaamast ja lähemale tarbijale minna, seda enam on toitepinge kvaliteet ideaalsest hälbinud. Seda põhjustavad peamiselt just tarbijad ise ja on järelikult ka ise toitepinge kvaliteedi hälvetes "süüdi". Peale selle põhjustavad pingekvaliteedi hälbeid loodusnähtused ja nendest tingitud lülitused ning avariid ülekande- ja jaotusvõrgus.

Ideaalne ja reaalne tarbija.

Elektrienergia tootmist, ülekandmist ja jaotamist saab kõige ökonoomsemalt ja väiksemate kadudega korraldada juhul, kui tarbijad on elektritarbimise mõttes ideaalsete omadustega ja jaotatud üle jaotusvõrgu vastavalt võrgu läbilaskevõimele. Ilmselt talitleks kogu energiatootmise ja –jaotamise ahel minimaalsete kadudega sel juhul, kui generaatorid töötaksid oma parima kasuteguri piirkonnas, ülekande- ja jaotusvõrk oleks optimaalselt koormatud ning koormuseks oleksid ideaalsed tarbijad. Piltlikult öeldes on ideaalne selline tarbija, kes vajab just sellist elektrienergiat, mida toodavad generaatorid elektriijaamades, ja kes tarbib võimsust sellises mahus, mis on optimaalne ülekande ja jaotusvõrgule.

Reaalne tarbija erineb ideaalsest. Tarbitav võimsus võib olla ajas hüplev või pulseeriv, asümmeetriline või ühefaasiline, tarbija võimsustegur võib olla väga madal ($\cos\varphi = 0,5 \dots 0,7$), tarbija elektrisedamed võivad olla tugevasti ebalinearsed, kusjuures

tarbitava voolukõvera harmooniliste moonutustegur võib olla kuni 150%. Tarbija koormus võib olla jaotusvõrgu ja trafo optimaalse koormuse suhtes liiga madal (alla 20%) või ka liiga kõrge (üle 80%). Tarbitava voolu suured kõikumised põhjustavad pinge kõikumisi ja värelust. Madal võimsustegur põhjustab lisakadusid liinides ja trafodes ning pingetaseme hajumist. Asümmeetriline koormus põhjustab erinevaid pingeid kolmes faasis ja ka voolu neutraaljuhhis. Moonutused tarbitava voolu kujus tekitavad moonutusi toitepinges, lisakadusid tarbija seadmetes ja jaotusvõrgus.

Kõik reaalse tarbija koormusvoolu hälbed ideaalsest põhjustavad hälbeid ka toitepinge kvaliteedis ning täiendavad võimsuskadusid tarbija elektrisüsteemis, jaotusvõrgus ning ka teiste tarbijate elektriseadmetes.

Toitepinge kvaliteet tarbija liitumispunktis sõltub järgmistest teguritest.

- Tarbija koormused (koormusparameetrid – aktiiv- ja reaktiivvõimsus, liinivoolud, voolukõikumised ja voolutõuked, tarbitava voolukõvera kuju harmoonilised moonutused, liinivoolude sümmeetria kolmes faasis).
- Jaotusvõrgu parameetrid (läbilaskevõimsus ehk lühisvõimsus, võrgu aktiiv- ja induktiivtakistus, pingeniivo keskpingevõrgus, pingete sümmeetria keskpingel).
- Juhuslikud tegurid (loodusnähtused, avariid tarbija elektrisüsteemis, keskpingevõrgus, ülekandevõrgus, lülitused kesk- ja ülekandevõrgus).
- Teiste tarbijate koormused ja avariid samas jaotusvõrgus või lähedases võrgupiirkonnas.

Pinge kvaliteedinäitajad võib jaotada kolme gruppi.

- Äärmised lubatavad kvaliteedihälbed, mis on määratud tarbija elektrisüsteemi osade, selle elektriseadmete ja tarvitite tehniliste tingimuste ja kasutusjuhenditega.
- Normeeritud kvaliteedihälbed, mis on sätestatud vastavate pingekvaliteedi standarditega, normidega ja lepingutega.
- Optimaalsed ehk majanduslikult soodsaimad kvaliteediparameetrid, mis arvestavad nii tarbija kui ka võrguettevõtte elektrisüsteemi investeeringute, käidu, häirete ja tõrgete, võimsuskadude ja seadmete tööeaga seotud kulusid.

Pinge kvaliteedi uurimise eesmärgid

Toitepinge kvaliteedi uurimise üheks eesmärgiks on määrata, kas pinge vastab standardi nõuetele ja kas pingekvaliteedi hälbed võivad põhjustada häireid elektriseadmete töös.

Teiseks uurimise eesmärgiks on välja selgitada, kas antud parameetritega toitepinge on sobiv (optimaalne) energiatarbimise ja võimsuskadude seisukohast, kas antud toitepinge tagab tõhusa ja säästliku energiakasutuse ning kas ja kuidas saab toitepinge parameetreid mõjutada/muuta niiviisi, et ettevõtte elektrisüsteemis väheneksid võimsuskaod ja võimalikud häiringud. Millised on võimalused tarbija elektrisüsteemi täiendada või muuta ning kuidas hinnata, milliseid tulemusi need täiendused võiksid anda?

Seega toitepinge kvaliteedi uurimine annab meile infot selle kohta, millised on võimalused vähendada energiakadusid ning tõrkeid elektriseadmete töös, seega kokkuvõttes elektrikulusid. Reaalne pingekvaliteet madalpingevõrkudes on kompromiss tehniliste ning majanduslike võimaluste vahel, kuna ideaalse elektrikvaliteedi tagamine osutuks mõttetult kulukaks. Eesmärgiks peaks olema piisavalt hea pinge kvaliteet tarbijate liitumispunktides.

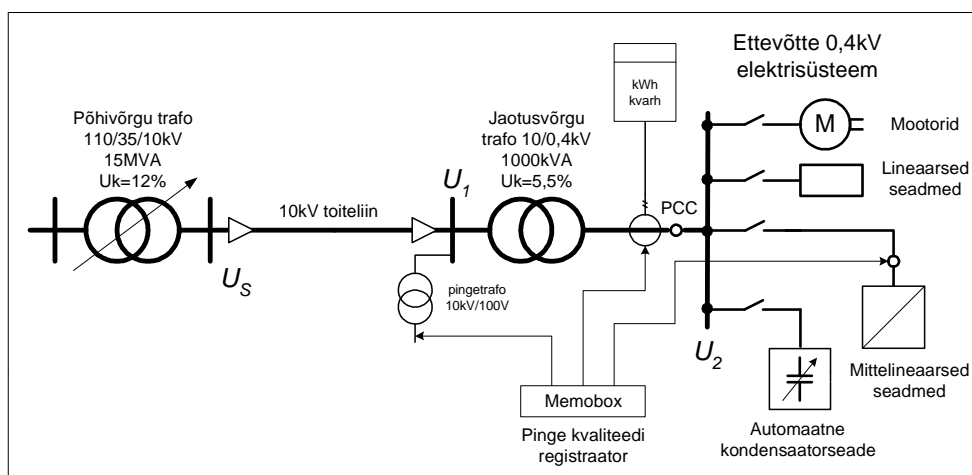
3. Pinge kvaliteedi analüüsi meetodika

Mõõtepunkti valik toitepinge kvaliteedi uurimisel

Mõõtepunktiks ehk kontrollpunktiks on sobivaim tarbija liitumispunkt (*point of common coupling – PCC*) või sellele lähim punkt madalpinge poolel, näiteks:

- alajaama madalpinge latid või alajaama trafo madalpinge klemmid;
- ettevõtte või hoone mõõtekilp (arvestite kilp);
- hoone sisestuskilp või peakilp;
- muu jaotuskilp, milles võib pinge lugeda võrdseks liitumispunkti pingega;
- analüüsiks valitud elektriseadme klemmid või selle seadme toitekilbi klemmid;
- keskpingel 6...35 kV jaotla pingetrafo klemmid tavaliselt pingega $3 \times 100 \text{ V}$;

Toitepinge kvaliteedi registreerimise mõõtepunktid 0,4 kV elektrisüsteemi pingekvaliteedi uurimisel on näidatud joonisel 3. Käesolevas töös kasutatud mõõtetulemused on reeglina saadud pinge parameetrite registreerimisel tarbijate liitumispunktides.



Joonis 3. Toitepinge kvaliteedi registreerimise mõõtepunktid pingekvaliteedi uurimisel

Tarbija elektrivarustuse toiteahelas võib välja tuua järgmised lülid (liikudes joonisel 3 vasakult paremale). Põhivõrgu viimane lüli on põhivõrgu alajaam ehk toitekeskus, mille trafo on varustatud koormus-astmelülitiga (*on-load tap-changer*) ja mille lattidele on ühendatud jaotusvõrgu (keskpingevõrgu) 6...35 kV väljuvad liinid ehk fiidrid. Ühe fiidri kaudu tuleb toitepinge tarbija 10/0,4 kV alajaama või trafopunkti, millest omakorda saavad toite üks või mitu tarbijat (joonisel 3 on näidatud üks tarbija - ettevõtte).

Pinge kontrollmõõtmistega saame vastuse küsimusele, millise kvaliteediga on pinge ja kas pinge kvaliteet vastab standardi nõuetele. Lisaks huvitab tarbijat, kas pinge kvaliteet on sobiv antud elektrisüsteemile. Mõõtmistulemuste analüüsiga saame selgitada, mis põhjusel pinge kvaliteet ei vasta püstitatud nõuetele või ei ole tarbijale sobiv kas energiatarbimise seisukohast või seadmete töö stabiilsuse ja tõrketuse seisukohast. Samuti saab analüüsida, milliseid meetmeid on vaja pinge kvaliteedi parendamiseks rakendada ning milliseks kujuneb kvaliteet pärast meetmete rakendamist.

Võrreldes erinevate kontrollpunktide pinge parameetreid tarbija elektrisüsteemis, saame välja selgitada probleemide põhjused ja kavandada ka meetmed pingelukorra parandamiseks. Seega saab tarbija elektrisüsteemi kontrollpunkti(de) pinge kvaliteedi parameetrite alusel anda vastuseid järgmistele küsimustele:

- kas pingekvaliteet vastab standardile EVS-EN:50160;

- kui suur on teatud parameetri lubatavasse või soovitatavasse vahemikku sattumise tõenäosus;
- kui suur on teatud parameetri hajuvus, kas see on piisav;
- kui suur on väljaspool soovitavaid piirväärtusi asuvate parameetrite tõenäosus;
- mis on mittesoovitava või ebasoodsa pingeolukorra põhjused ja missuguste abinõudega saab seda muuta;
- milliseks kujunevad pinge kvaliteedi parameetrid pärast soovitatud abinõude rakendamist.

Mõõtetulemuste statistiline analüüs toitepinge kvaliteedi uurimisel

Toitepinge kvaliteedi mõõtetulemuste analüüsil on tegemist väga suuremahulise informatsiooni töötlemisega. Nädalas on 1008 10-minutilist intervalli. Registreeritavaid toitepinge parameetreid kolmes faasis võib olla ca 90 (s.h. pingete kesk-, miinimum- ja maksimumväärtused, harmoonilised pinged ja moonutustegurid, asümmeetria ja värelus), järelikult koguneb nädalase mõõtmistsükli tulemusena $1008 \times 90 = 91720$ arvvärtust. Saadud mõõtetulemusi on hõlpsam analüüsida, kui need on statistiliste parameetritena.

Käesolevas töös on toitepinge parameetrite esitamisel kasutatud matemaatilise statistika üldtuntud põhimõisteid, mis kirjeldavad juhusliku suuruse keskvärtust (ootusvärtust) ja hajumist teatud tõenäosusega. Nende mõistete abil on kirjeldatud pingeniivo, pinge harmooniliste moonutuste, väreluse ja asümmeetria olukorda.

Enamasti on tarbija koormuse muutused juhusliku iseloomuga ning seetõttu on ka pinge parameetrid liitumispunktis juhusliku iseloomuga.

Juhusliku suuruse jaotuskõverad võivad olla väga mitmesuguse kujuga. Praktikas kõige sagedamini esinev jaotusseadus on normaaljaotus ehk Gaussi jaotusseadus. Juhuslik suurus allub normaaljaotusele, kui ta on määratud suure arvu võrdväärsete teguritega, mis pole üksteisest sõltuvad või on üksteisest vähe sõltuvad.

Normaaljaotusele on omane järgmine sõltuvus standardhälbe ja tõenäosuse vahel: juhusliku suuruse V 4-kordse standardhälbe laiusesse vahemikku 4σ sattumise tõenäosus on 95,4%. Selle vahemiku piirid määratakse seostega

$$V_1 = \bar{V} - 2\sigma \quad \text{ja} \quad V_2 = \bar{V} + 2\sigma, \quad (3.1)$$

kus \bar{V} – parameetri matemaatiline ootus ehk keskmine väärtus;

σ – parameetri standardhälve.

Normaaljaotuse tihedusfunktsiooni avaldis on:

$$f(v) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(V-\bar{V})^2}{2\sigma^2}} \quad (3.2)$$

Elektrisüsteemi pinge parameetrid on määratud suure arvu koormustega, mida lülitatakse sisse ja välja või mis muutuvad üksteisest sõltumatult – seega on loodud normaaljaotuse kujunemise eeldused. Normaaljaotuse puhul on väga lihtne arvutada tõenäosust, millega juhuslik suurus, näiteks pinge suurus, asub etteantud vahemikus.

Kokkuvõttes võib öelda, et statistilised parameetrid vähendavad oluliselt elektritarbimise ja pinge kvaliteedi andmete mahtu ja sisaldavad seejuures piisavat informatsiooni.

4. Toitepinge kvaliteeti iseloomustavad parameetrid ja mõõtetulemused

4.1 Toitepinge kvaliteedi parameetrid ja standardid

Pingekvaliteedi parameetrid. Vastavalt IEC klassifikatsioonile kuuluvad toitepinge kvaliteedi küsimused madalsageduslike juhtivusnähtuste alla. Toitepinge kvaliteet hõlmab erinevaid parameetreid ja kirjeldab nende hälbeid ideaalsest toitepingest. Pinge kvaliteeti kolmefaasilises vahelduvvooluvõrgus iseloomustavad järgmised põhilised parameetrid:

- toitepinge sagedus ehk võrgusagedus,
- toitepinge suurus, pingeniivo ning selle hajumine,
- toitepinge võrgusageduslikud hälbed nimipingest (pingelohud ja pingemuhud),
- toitepinge katkestused (lühi- ja pikaajalised toitekatkestused),
- siirdeliigpinged ehk transientliigpinged,
- toitepinge harmoonilised moonutused,
- toitepinge värelus ehk flikker,
- pingete asümmeetria kolmefaasilises süsteemis.

Pingekvaliteedi standardid. Toitepinge kvaliteedi põhiliste parameetrite lubatavad või soovitatavad suurused on toodud pingekvaliteedi standardites. Toitepinge kvaliteedi parameetrid on reguleeritud standarditega EVS-IEC 60038:2010, (IEC standardpinged), standardiga EVS-EN 50160:2007 (Elektrijaotusvõrkude pinge tunnussuurused), standarditega sarjast IEC 61000 (Elektromagnetiline ühilduvus ja elektri kvaliteet). Siinjuures võib välja tuua järgmised tähelepanekud toitepinge standardite kohta:

- mida kõrgem on pingeklass, seda rangemad on normid;
- mida suurem on tarbitav vool, seda rangemad on normid;
- mida kõrgem on harmoonilise pinge sagedus, seda rangemad on normid;
- elektrienergia tootjast sõltub ainult sageduse hälve nimisagedusest, kõigi teiste parameetrite hälve sõltub kas tarbijatest või ülekandevõrgust ja jaotusvõrgust;

Eestis praegu kehtivas standardis EVS-EN 50160:2007 on arvuliselt välja toodud nõuded järgmistele toitepinge kvaliteedinäitajatele:

- toitepinge nimisagedus f ja sagedushälve Δf ,
- nimipinge ja pinge püsikõrvalekalle U_n ja ΔU ,
- toitepinge hälbed (pingelohud ja pingemuhud) U_{min} ja U_{max} ,
- harmoonilised pinged U_h ja pinge harmoonilised kogumoonutused THD_u ,
- värelus ehk flikker P_{fl} ,
- pingete asümmeetria kolmefaasilises süsteemis pingete vastujärgnevuskomponendi järgi K_{2U} .

Erinevates riikides on normid erinevad. Näiteks Venemaal on standardiga GOST 13109 lubatud pingemuutuse ulatus kitsam - normaaltingimustel $\pm 5\%$ nimipingest. USA-s näiteks on nõuded pinge suurusele määratletud kahes kategoorias (standardiga ANSI C84.1, ANSI – *American National Standards Institute*):

- Kategoorias A on normaaltingimustel lubatav pingemuutuste ulatus kuni $\pm 5\%$ nimipingest tarbija liitumispunktis (*service entrance*).
- Kategoorias B on lühiajaliselt ja ebatavalistes olukordades lubatud pingemuutuste ulatus vahemikus $-8,3\%$ kuni $+5,8\%$.

4.2 Toitepinge sagedus

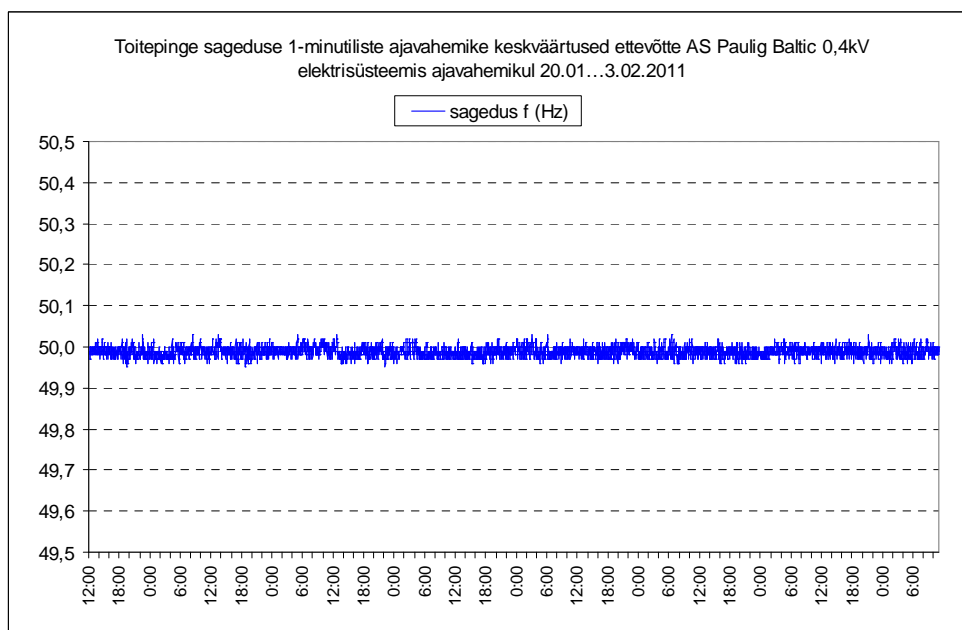
Toitepinge sagedus (*frequency of the supply voltage*) on etteantud ajavahemiku jooksul mõõdetud toitepinge põhiharmoonilise sagedus. Eestis on toitepinge nimisagedus 50 Hz. Normaaltalitlustingimustel peab põhiharmoonilise sageduse 10-sekundilise vahemiku keskmine väärtus olema:

- 50 Hz \pm 1% (st 49,5...50,5 Hz) 99,5% aastast;
- 50 Hz -6% / $+4\%$ (st 47...52 Hz) 100% ajast.

Ühendelektrisüsteemiga ühendamata võrkudes, näiteks saarte lokaalsetes elektrivõrkudes, on lubatud tunduvalt suuremad sageduse hälbed. Sagedus ühendenergiasüsteemis on määratud generaatorite ja turbiinide pöörlemiskiirusega. Koormuse kasvades generaatorite pöörlemiskiirus väheneb ja see tuleb kompenseerida. Sagedust saab reguleerida ainult aktiivvõimsuse reservi korral ja pingeniivoode reguleerimisega teatud ulatuses, sest pingest sõltub ka aktiivvõimsuse tarbimine. Sageduse hälve arvutatakse järgmiselt:

$$\Delta f = \frac{f - f_{nimi}}{f_{nimi}} 100\% . \quad (4.1)$$

Eesti elektrijaamad ise sagedust mõjutada ei saa, kuivõrd Eesti energiasüsteem on ühendatud Loode-Venemaa energiasüsteemiga ning töötab sellega sünkroonselt. Ühendatud energiasüsteemis osalemine on Eestile kasulik, kuna suures energiasüsteemis on lihtsam hoida sagedust püsivana, sest tarbitava võimsuse muutused on sujuvamad ja täpsemini prognoositavad. Samuti ei saa sagedust mõjutada tarbijad. Toitepinge sagedust reguleeritakse suurte elektrijaamade generaatorite töö juhtimisega. Toitepinge sagedus on Eestis olnud viimasel aastakümnel väga stabiilne - vahemikus 49,95 ... 50,05 Hz ehk suhtelise hälbega $\pm 0,1\%$. Seda kinnitavad arvukad mõõtetulemused aastatel 2000 ... 2012. Seega on sageduse hälve Eesti ühendatud elektrisüsteemis ligikaudu 10 korda väiksem kui standardis lubatud hälvete vahemik $\pm 1\%$. Tarbijatele ei avalda nii väike sageduse hälve mitte mingisugust mõju. Sageduse suuremaid hälbeid võib esineda ainult isoleeritud elektrisüsteemides, näiteks mõnedel Eesti väikesaartel. Kuna tarbijad ise sagedust kuidagi ei mõjuta ja väga väikesed sageduse hälbed ka mingit probleemi ei põhjusta, siis ei ole käesolevas töös sageduse mõõtetulemusi põhjalikumalt kajastatud. Näide toitepinge sageduse muutustest ühe nädala vältel on toodud joonisel 4.1.



Joonis 4.1. Toitepinge sagedus Eesti ühendatud elektrisüsteemis ühe nädala vältel

4.3 Toitepinge suurus ja pingeniivoo

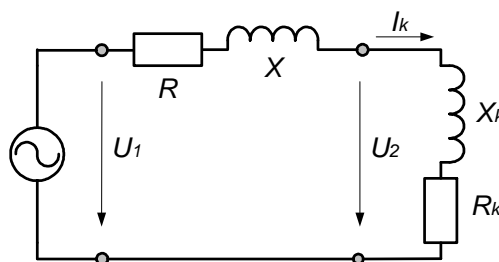
Toitepinge suurus (*supply voltage magnitude*) on pinge keskmine efektiivväärtus teatud ajavahemikul, kusjuures pinge efektiivväärtus U (U_{rms}) on tema ruutkeskmine väärtus perioodi kohta:

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt} \quad (4.2)$$

Võrgu nimipinge U_{nimi} (*nominal voltage, rated voltage*) on pinge, millele võrk on ette nähtud ja millega võrreldakse talitluspinge suurst. Aeglased pingemuutused (*voltage variations*) on toitepinge suuruse suhteliselt väikesed pinge kõrvalekalded nimipingest.

Madalpingevõrgu nimipinge U_{nimi} on Eestis 230 V faasi- ja neutraaljuhi vahel neljajuhilises kolmefaasilises võrgus või faasijuhtide vahel kolmejuhilises kolmefaasilises võrgus.

Tarbija jaoks on pinge liitumispunktis muutuv suurus. Tarbija vool I_k põhjustab toiteahelas pingelangu, mis sõltub toiteahela takistustest ning tarbitava voolu suurusel, joonis 4.2.



Joonis 4.2. Pingelangu tekkimine toiteahelas tarbija koormusvoolu tõttu

Toiteahela takistus ajas üldjuhul ei muutu, aga tarbija vool muutub pidevalt. Seetõttu muutub pidevalt ka pinge liitumispunktis mingis vahemikus võrgu nimipinge U_{nimi} suhtes. Seega sõltub pinge tarbija liitumispunktis peamiselt tarbija enda koormusest ning tarbija toiteahela näivtakistusest (piltlikult öeldes kaugusest elektrijaama generaatorist).

Kõige lihtsamal juhul võib pingelangu (vektorsuurus) toiteahelas arvutada järgmiselt:

$$\underline{U}_1 - \underline{U}_2 = \underline{I}_k (R + jX) , \quad (4.3)$$

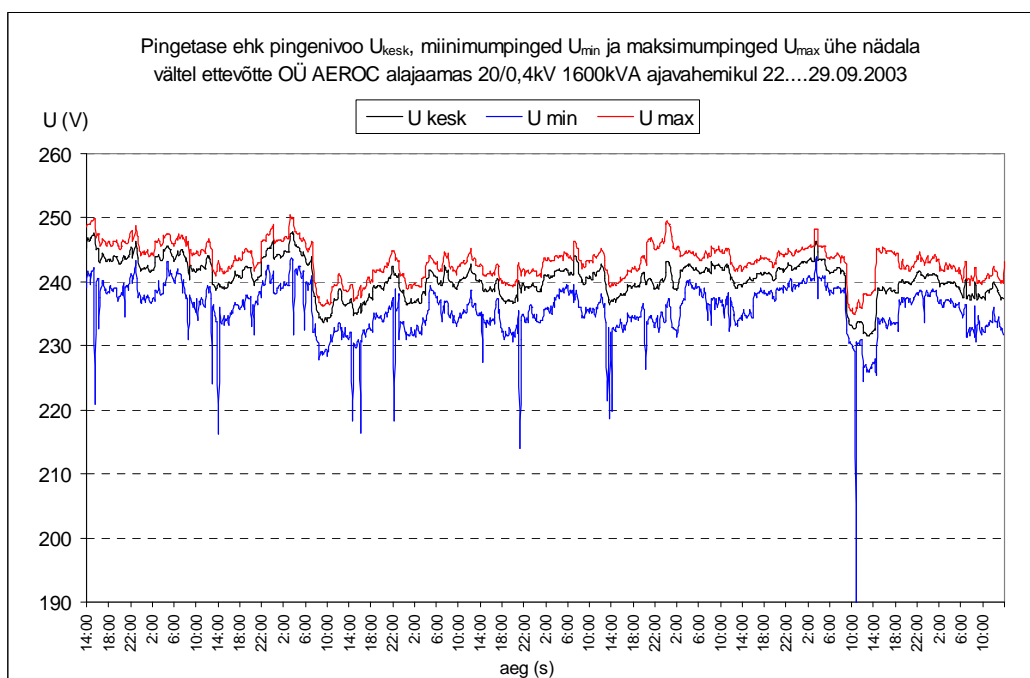
kus I_k – tarbitav vool,

R – toiteahela aktiivtakistus,

X – toiteahela reaktiivtakistus.

Toiteahela takistus ajas üldjuhul ei muutu, aga tarbija vool muutub pidevalt. Seetõttu muutub pidevalt ka pinge liitumispunktis võrgu nimipinge U_{nimi} suhtes. Seega sõltub pinge tarbija liitumispunktis peamiselt tarbija enda koormusest ning tarbija toiteahela näivtakistusest (piltlikult öeldes kaugusest elektrijaama generaatorist). Tarbijate koormusest tingitud pingekõikumised võivad olla seotud nädalase tööritmiga, ööpäevase tööritmiga ja tsüklilised. Tavaliselt on hästi jälgitav ööpäevane pinge muutumise rütm – päeval on pinge madalam ja öösel kõrgem.

Pinge suurust saab iseloomustada kolme arvulise parameetriga – keskmise väärtusega igas 10 min intervallis ning pinge poole perioodi miinimum- ning maksimumväärtustega igas 10 min intervallis. Joonisel 4.3 on toodud need kolm erinevat pingekõverat ühe nädala vältel: faaspingete keskmine efektiivväärtus 10 min ajavahemikes, pinge poolperioodi efektiivväärtuste miinimumväärtused ja maksimumväärtused igas 10 min vahemikus. Seega on pinge tegelik efektiivväärtus mingil ajahetkel alati joonisel 4.3 toodud miinimum- ja maksimumväärtuste kõverate vahel.



Joonis 4.3. Toitepinge 10 min intervalli keskmine pinge U_{kesk} , miinimumpinged U_{min} ja maksimumpinged U_{max} ühe nädala vältel ettevõtte 0,4 kV elektrisüsteemis

Pingenivoo all mõeldakse ühe pingeastme võrgu keskmist pinget teatud ajavahemiku vältel. Selliseks ajavahemikuks on sobiv valida üks nädal. Tarbija jaoks on pingeniivoo ühe nädala pinge ettevõtte liitumispunktis, mida iseloomustatakse keskmise pinge ja pinge hajumisega keskmise väärtuse ümber. Kuigi toitepinge ühe nädala keskmine väärtus on tavaliselt üsna lähedal nimipingele või isegi sellega võrdne, ei ole ta suvalisel ajahetkel nimipingega võrdne, vaid on pidevas muutumises.

Aeglasel pingemuutusel on pinge efektiivväärtuse suurenemised või vähenemised, mida iseloomustatakse pinge absoluutse või suhtelise kõrvalekaldega nimipingest:

$$\Delta U = U_i - U_{nimi} \quad \text{või} \quad \Delta U = \frac{U_i - U_n}{U_{nimi}} 100\%, \quad (4.4)$$

kus U_i – pinge efektiivväärtuste keskmine väärtus ühes intervallis.

Standard EVS-EN 50160 sätestab tõenäosuse P , mille kohaselt peavad toitepinge efektiivväärtuse 10-minutiliste intervallide keskmised väärtused U_i olema miinimum- ja maksimumväärtuste vahel :

$$P(U_{i_{min}} \leq U_i \leq U_{i_{max}}) . \quad (4.5)$$

Toitekatkestuste aega siin arvesse ei võeta. Kuna mõõtetulemused registreeritakse 10-minutiliste intervallide keskmiste väärtustena, siis väga lühikese kestusega pingehälbed samuti tulemust ei mõjuta. Pinge keskmised väärtused U_i igas intervallis peavad olema vahemikus $\pm 10\%$ nimipingest 230 V tõenäosusega vähemalt 95% :

$$P(207 \leq U_i \leq 253) \geq 0,95 . \quad (4.6)$$

Lisaks peab ühe nädala vältel 100% pinge efektiivväärtuse 10-minutiliste intervallide keskmistest väärtusest olema piirides $+10\%$ kuni -15% nimipingest 230 V :

$$P(196 \leq U_i \leq 253) = 1 . \quad (4.7)$$

Kui toitepinge väärtused registreeritakse 10-minutilistes intervallides ühe nädala vältel, siis saadakse 1008 mõõtetulemust ühe faasi kohta, neist 50 mõõtetulemust võib olla väljaspool lubatud vahemikku $\pm 10\%$ nimipingest. Võrgu normaaltalitluse olukorras on väga vähe tõenäoline, et tegelikud mõõtetulemused satuksid pingele lubatud vahemikust väljapoole.

Pingenivoo statistiliseks kirjeldamiseks võib kasutada erinevaid arvulisi ja graafilisi parameetreid. Neist väga ülevaatlik on pingele tõenäosustiheduse funktsioon graafilisel kujul ehk tõenäosustiheduse jaotuskõver, mida on lihtne võrrelda standardis toodud pingele jaotuskõveraga või soovitatava pingele jaotuskõveraga.

Vahet tuleb teha kahe sisuliselt erineva mõiste vahel – pingele sündmus (*voltage event*) ja pingeniivoo hälve ehk pingele kõrvalekalle (*voltage deviation, voltage variation*). Pingele sündmuste iseloomustamisel on olulised pingehälbe kestus, hälbe ulatus ja hälvete vaheline aeg. Pingeniivoo hälvete iseloomustamiseks sobivad tõenäosustiheduse jaotuskõverad.

4.3.1 Pingeniivoo, selle keskmine väärtus ja hajuvuse ulatus

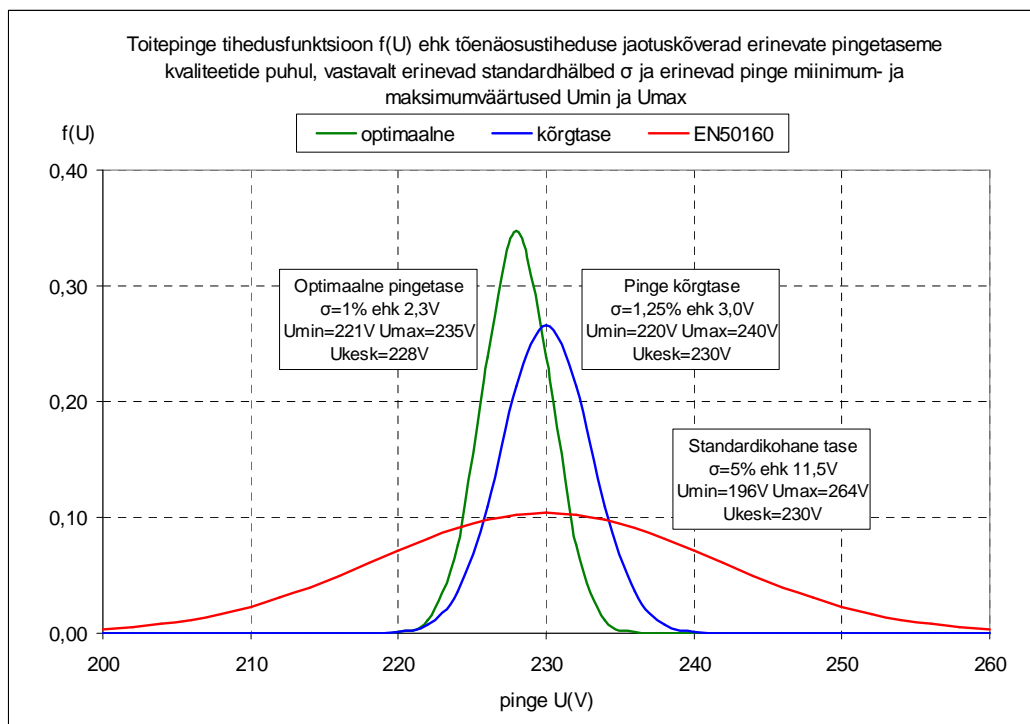
Ettevõtte pingeniivoo analüüsil tekib põhjendatult küsimus, missugune peaks antud juhul olema optimaalne ehk antud elektrisüsteemile kõige sobivam pingeniivoo, selle keskmine väärtus ja hajuvuse ulatus. Üks võimalus on lähtuda pingekvaliteedi standardist ja hinnata pingetaset standardis toodud pingele piirväärtustest lähtuvalt. Selline lähenemine ei võimalda kahjuks anda pingetaseme kohta mingeid täpsemaid soovitusi, sest standardis on pingetaseme osas määratletud vaid nimipingele väärtus ja pingele piirväärtused. Eestis kehtiva standardi kohaselt peab pingele olema 100% ajast vahemikus 230 V $+10\%$ kuni -15% ehk vahemikus 196...253 V ja 95% ajast olema vahemikus 230 V $\pm 10\%$ ehk 207...253 V.

Tunduvalt kitsamad piirid seatakse pingele kvaliteedile kõrgtaseme puhul, kus pingele loetakse väga heaks ainult juhul, kui nädala keskmine pingele jääb vahemikku 225...235 V ja kõigi 10 min intervallide pingele on piirides 220...240 V. See vastab standardhälvele väärtusele $\sigma = 3$ V ehk 1,25%. Energiatarbimise optimeerimisel on soovitatav lähtuda veelgi kitsamast vahemikust, kus ühe nädala keskmine pingele on vahemikus 225...232 V ja iga 10 min intervalli pingele piirides 221...235 V ehk 230V $+2\%$, -4% . See vastab ligikaudu pingele keskmisele väärtusele 228 V ja standardhälbele $\sigma = 2,3$ V ehk 1%. Niisugune asümmeetriline valik nimipingele 230 V suhtes tuleneb asjaolust, et nimipingele kõrgem pingele suurendab märgatavalt energiatarbimist ja võimsuskadusid, eriti mootorites ja trafodes. Seejuures kasulikuks tööks muunduv energiaosa jääb pingeniivoo väikese muutuse ulatuses ($\pm 5\%$) praktiliselt samaks, näiteks asünkroonmootorite kiirus sõltub pingelest väga vähe. Pingele jaotuskõverad kõrgtaseme, optimaalse taseme ja standardkohase taseme puhul on näidatud joonisel 4.4.

Missugune on optimaalne pingeniivoo? On ilmne, et elektriseadmed töötavad kõige tõhusamalt nimipingele juures, millele nad on projekteeritud. Just nimipingele juures on tagatud nende nimiparameetrid – võimsus, kasutegur ja tööiga. Pingetel üle nimipingele suureneb energiatarbimine ja väheneb seadme tööiga. Seega optimaalseks võiks lugeda sellist pingeniivoo, kus keskmine pingeniivoo on nimipingega võrdne või veidi madalam, aga oluliselt väiksema hajuvusega, kui standardi kohaselt lubatud. Pingeniivoo ülemised väärtused võiksid ulatuda kuni 2% üle nimipingele, seega kuni 235 voldini. Pingele alumised väärtused võiksid olla kuni 4% madalamad kui nimipingele, seega kuni 221 V. Sel juhul on optimaalse pingeniivoo keskmine väärtus 228 V ja standardhälve 1% ning vastavalt normaaljaotusele jääb pingele 95,4% tõenäosusega vahemikku 223...233 V ja tõenäosusega 99,7% vahemikku 221...235 V.

Optimaalse pingele nimipingele suhtes ebasümmeetrilise paigutuse esimene põhjendus on see, et suur osa elektriseadmetest on alakoormatud. Eriti valdav on see töötlevas tööstuses

asünkroonmootorite puhul, kus mootorite keskmine koormus on sageli ainult ca 20% nimivõimsusest. Seega on nende mootorite optimaalne tööpunkt pingel, mis ongi nimipingest väiksem. Teiseks põhjenduseks on, et praegu on tööstus-ettevõtetes kasutusel veel suur hulk seadmeid, mille nimipinge on 220/380 V. Seega on soovitatav igal suuremal tarbijal määrata optimaalne pinge ja püüda trafo võimsuse valiku, trafo astmelüliti asendi ja reaktiivvõimsuse kompensatsiooniga saavutada optimaalne pingeniivo.



Joonis 4.4. Toitepinge tõenäosustihedused $f(U)$ erinevate pingeniivo kvaliteetide puhul, vastavalt erinevad standardhälbed σ ja erinevad pinge piirväärtused U_{min} ja U_{max} , kus tegelik pinge jääb tõenäosusega 95% vahemikku 4σ

4.3.2 Toitepinge suuruse mõõtetulemuste analüüsi meetodika

Pingetaseme mõõtetulemuste analüüs võimaldab teha mitmeid olulisi järeldusi ettevõtte elektrisüsteemi olukorra, elektritarbimise ja toitepinge kvaliteedi kohta ning samuti anda soovitusi toitepinge taseme ja hajuvuse optimeerimiseks toiteahela ja elektrisüsteemi seadistamise ja täiendamise teel. Seega tuleb saada vastused järgmistele küsimustele:

- missugune on pingeniivo ja selle hajuvus;
- missugused on pingeniivo miinimum- ja maksimumväärtused;
- kas toitepinge niivo ja selle hajumine vastab standardile EVS EN:50160;
- kas toitepinge on sobiv energiatarbimise ja võimsuskadude seisukohast;
- kas keskpinge automaatne pingereguleerimine on kooskõlas koormuste ööpäevaste muutustega;
- kas toitetrafo võimsus on sobiv antud koormuste puhul;
- kas viimase astme trafo astmelüliti asend on sobivalt valitud;
- kas faasipinged ja faasikoormused on sümmeetrilised;
- kas reaktiivvõimsuse kompensatsioon on piisav antud võimsuse puhul.

Pingeniivo analüüsil on sobiv kasutada erinevaid statistilisi parameetreid arvulisel ja graafilisel kujul. Arvulistest parameetritest on kasulik välja tuua järgmised:

- keskmised faasipinged kolmes faasis \bar{U}_{L1} , \bar{U}_{L2} ja \bar{U}_{L3} ;
- keskmine pinge ehk kolme faasi keskmine faasipinge \bar{U}_L ;
- pinge keskmine absoluuthälve K vaatlusvahemiku keskmisest pingest;
- pinge keskmine hälve pinge nimiväärtusest ΔU ;
- dispersioon D ja standardhälve σ ;
- pinge miinimumväärtus (10 min vahemiku vähim keskmine väärtus) U_{min} ;
- pinge maksimumväärtus (10 min vahemiku suurim keskmine väärtus) U_{max} .

Pingenivoo graafilistest parameetritest on ülevaatlik välja tuua järgmised:

- faasipinged kolmes faasis vaatlusvahemiku vältel;
- faasipingete keskmise tõenäosustihedus pinge absoluutväärtuse skaalal või kolme faasipinge tõenäosustihedused juhul, kui esineb märgatav pingete asümmeetria;
- faasipingete keskmise integraalsed jaotuskõverad keskmise pinge ja pinge miinimum- ja maksimumväärtuste kohta;

4.3.3 Toitepinge nivoo mõõtetulemused

Mõõtmiste eesmärgiks oli tarbijate tegeliku pingenivoo ja pingenivoo hälvete väljaselgitamine elektritarbimise optimeerimisel või seoses kondensaatorseadmete paigaldamisega. Toitepinge suurus on registreeritud järgmiselt. Tarbija liitumispunkti 0,4 kV poolel või peakilpi on ühendatud pingekvaliteedi mõõteseade LEM-Memobox 300 või 800, mis registreerib kolm faasipinget ühe nädala vältel 10-minutilistes ajavahemikes, samuti ka pingete miinimum- ja maksimumväärtused igas ajavahemikus. Saadud mõõtetulemused annavad küllalt suure tõenäosusega ülevaate tegelikust pingenivoost 0,4 kV elektrisüsteemides. Statistilised koondtulemused pingenivoo parameetritest kõigi vaatlusvahemike alusel on toodud tabelis 4.1. Näiteid faasipingete registreerimise tulemustest on toodud Lisas 1. Iga näite juures on ka lühike kommentaar antud elektrisüsteemi pingeolukorra ja selle põhjuste kohta.

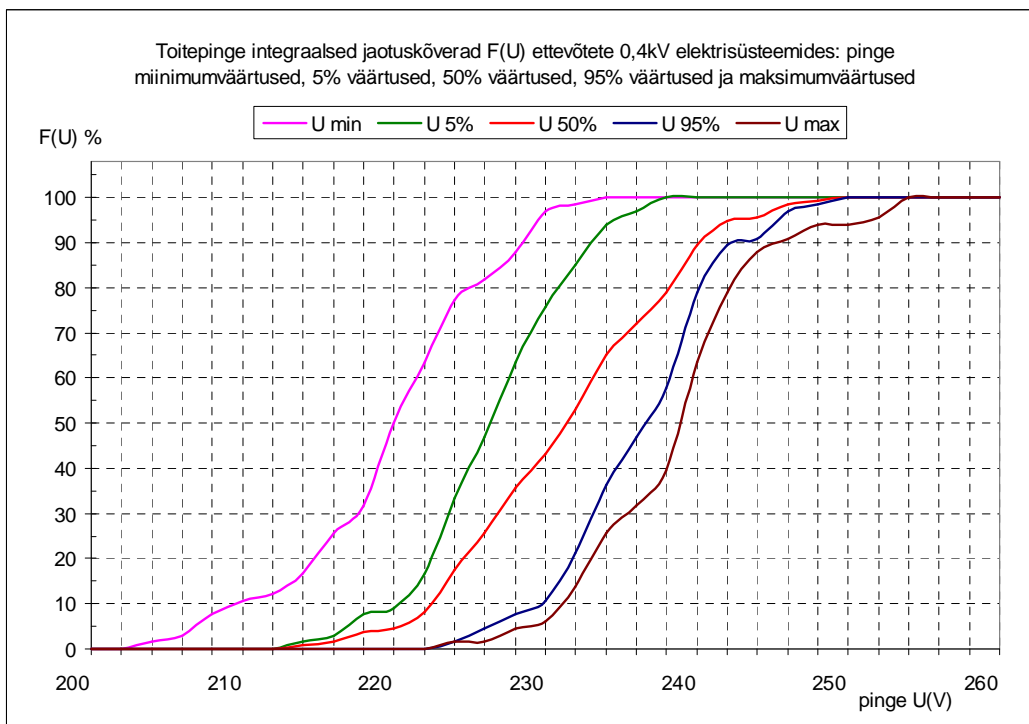
Tabel 4.1. Pingenivoo parameetrid mõõtetulemuste alusel Eesti 0,4 kV elektrisüsteemides

| | U_{min} | $U_{5\%}$ | $U_{50\%}$ | $U_{95\%}$ | U_{max} |
|---------------------------------------|-----------|-----------|------------|------------|-----------|
| Mõõtmiste koguarv | 66 | 66 | 66 | 66 | 66 |
| Dispersioon D | 6,57 | 5,12 | 4,78 | 5,32 | 6,00 |
| Standardhälve σ , (V) | 2,56 | 2,26 | 2,19 | 2,31 | 2,45 |
| Keskmine absoluuthälve K (V) | 5,06 | 4,13 | 4,00 | 4,32 | 4,49 |
| Pinge keskmine väärtus U_{kesk} (V) | 221,6 | 226,5 | 231,7 | 236,3 | 239,0 |
| Pinge miinimumväärtus U_{min} (V) | 204,0 | 213,0 | 220,5 | 223,0 | 224,0 |
| Pinge maksimumväärtus U_{max} (V) | 236,0 | 239,0 | 242,0 | 250,0 | 254,0 |

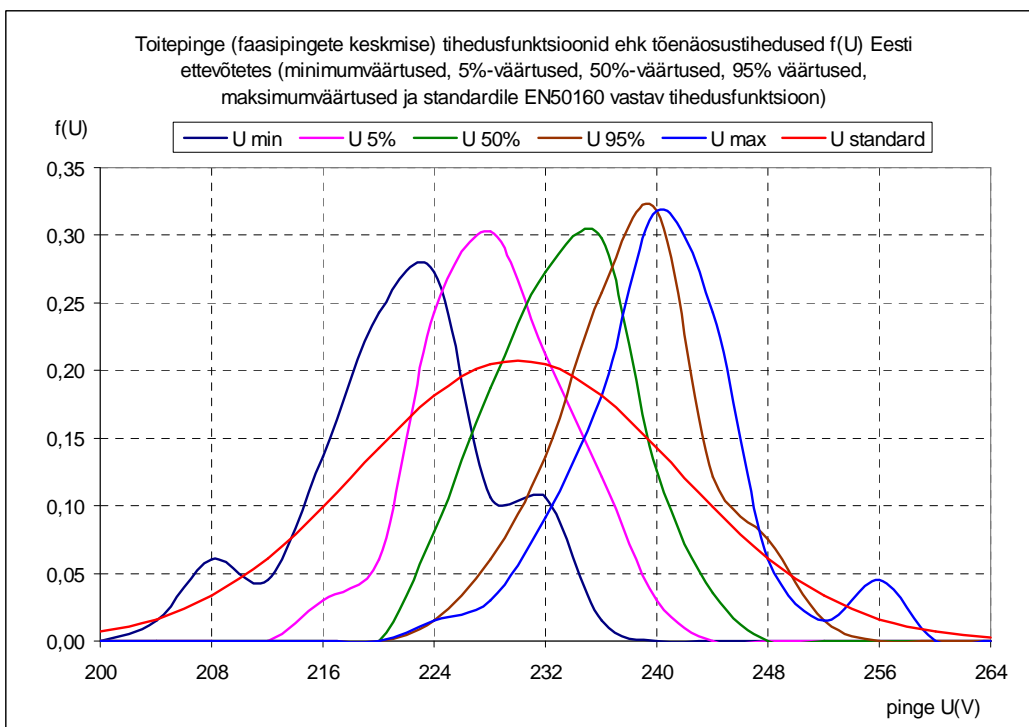
Toitepinge nivoo integraalsed jaotuskõverad ehk kumulatiivsed tõenäosused näitavad graafiliselt kujul, kui suur osa mõõtetulemustest on etteantud pingenivooga või sellest kas madalamad või kõrgemad. Jooniselt 4.5 selgub, et tõenäosusega 50% on pingetaseme miinimumväärtus ettevõtete 0,4 kV elektrisüsteemides 220 V, keskmine pinge 232 V ja maksimumpinge 239 V. Samuti selgub näiteks, et 11% elektrisüsteemidest on miinimumpingega alla 210 V ja 37% elektrisüsteemidest maksimumpingega üle 240 V.

Toitepinge tihedusfunktsioonid ehk tõenäosustihedused näitavad graafilisel kujul kõige suurema tõenäosusega esinevaid pingenivoo väärtusi ja pingenivoo hajumist, samuti seda, kuidas pingejaotus normaaljaotusest erineb. Jooniselt 4.6 selgub, et kõige suurema

tõenäosusega on pingetaseme maksimumväärtus 240 V, kuid selle hajumine on piirides 220...260 V. Samuti näeme, et pingete miinimum- ja maksimumväärtuste jaotuskõverad erinevad normaaljaotusest rohkem, samas kui pingete keskmiste väärtuste jaotuskõver on väga lähedane normaaljaotusele.



Joonis 4.5. Toitepinge nivoo integraalsed jaotuskõverad mõõtetulemuste alusel Eesti 0,4 kV elektrisüsteemides



Joonis 4.6. Toitepinge nivoo tihedusfunktsioonid ehk tõenäosustihedused mõõtetulemuste alusel Eesti 0,4 kV elektrisüsteemides

Järeldused pingeniivo mõõtetulemuste kohta

1. Ühe nädala keskmise pingeniivo miinimumväärtus oli 220 V ja maksimumväärtus 248 V. Jaotusfunktsiooni mood oli 235 V ja mediaan 234 V. Pinge kõrgtasemele vastavaks (vahemikku 225 kuni 235 V) osutus 60% mõõtetulemustest, 10% mõõtetulemustest oli alla 225 V ja 30% üle 235 V. Seega on keskmine pinge veidi kõrge, ületades soovitatavat pingetaset ca 5...6 V võrra, mis vastab toitetrafode astmelüliti ühele astmele 2,5%.
2. Pingeniivo madalaim väärtus oli 201 V ja kõrgeim 238 V, mood 223 V ja mediaan 224 V. Soovitatavalt peaks miinimumpinge jääma vahemikku 207 V kuni 230 V. Seega on miinimumpingeniivo hajumine suurem kui soovitav, kusjuures nii allapoole kui ka ülespoole soovitavat vahemikku. See viitab trafode võimsuste ja koormuste mittevastavusele ja trafo astmelülite ebasobivale astmele kõrgemate pingete osas.
3. Pingeniivo maksimumväärtused algavad 220 voldist ja ulatuvad 260 voldini. Mood ja mediaan on ca 240 V. Soovitatavalt peaksid pingete maksimumväärtused jääma vahemikku 230 V kuni 240 V. Seega on ka maksimumväärtuste hajumine liiga suur. Põhjuseks on koormuste mittevastavus trafo võimsusele, trafode ebasobiv aste ja reaktiivkoormuse suur osakaal võimsustarbes, üksikutel juhtudel ka neutraaliahela liiga suur takistus.
4. Toitepinge niivo, selle keskmine väärtus ja eriti selle miinimumväärtused suuremate koormuste ajal sõltuvad oluliselt sellest, kas suuremates ettevõtetes kasutatakse reaktiivvõimsuse kompensatsiooni ja kas see on piisav ka suurte koormuste piirkonnas. Kui kompensatsioon puudub, siis on pingetaseme jaotuskõver enamasti kahemodaalne ja suurema hajuvusega. Jaotuskõvera kõrgema pingega (ülemine) tipp vastab väikestele koormustele ja jaotuskõvera alumine tipp madalama pinge piirkonnas vastab suurematele koormustele. Kompensatsiooni kasutamisel vähe pingeniivo hajuvus vähemalt 2...3 korda, ühtlasi tõuseb pinge miinimumväärtus.
5. Pingeniivo hajuvus sõltub oluliselt trafo võimsusest. Mida suurem on trafo võimsus, seda väiksem on pingeniivo hajuvus. Lähtuda võiks sellest, et heaks võib pidada pinge keskmist absoluuthälvet kuni 2,5 V – sellele vastab pingeniivo muutumise vahemik piirilukordades (tühijooks/täiskoormus) kuni 15 V ja ebasobivaks olukorda, kus keskmine absoluuthälve on 5 V või enam. Sel juhul on pingeniivo muutumise vahemik ca 30 V ja enam. Seega on pingeniivo hajuvust võimalik vähendada trafo võimsuse suurendamisega.
6. Registreeritud pingeniivod ja pinge suurused vastavad peaaegu kõigil juhtudel standardile EVS-EN 50160. Seega ei võimalda võrdlemine standardi lubatud vahemikuga otsustada, kas pinge on antud elektrisüsteemile optimaalne või mitte.
7. Pingete suur hajumine on mõnel juhul (3 juhtumit) tingitud neutraaliahela suurest takistusest. Selline olukord esines 0,4 kV õhuliinidega toitevõrkudes. Sel juhul tuleb pingete tõenäosustiheduse jaotuskõverad arvutada kindlasti iga faasipinge kohta eraldi, kolme faasi keskmise pinge jaotus annab täiesti vale tulemuse.
8. Pingeniivo piisavalt väikese hajumise tagamisel on oluline keskpinge võrgu pinge automaatse reguleerimise sätete õige valik. Tavaliselt tõstetakse pinget hommikul koormuse suurenedes ja vähendatakse õhtul, kui koormus langeb. Reageerimine koormuse muutustele piisavalt väikese viitega on oluline. Pingete registreerimine 1-minutilistes intervallides võimaldab tuvastada ka keskpinge võrgu pingestaste lülitused.

4.4 Lühiajalised võrgusagedusliku pingehälbed – pingelohud ja pingemuhud

Lühiajalised pingehälbed ehk pinge sündmused (*voltage events*) on oluline osa pingekvaliteedi parameetritest, mis mõjutavad elektriseadmete tööd häiringute ja tõrgete osas väga tugevasti. Pingehälvete põhjused võivad olla nii võrgupoolsed kui ka tarbijapoolsed. Võrgupoolsete pingehälvete puhul on pinge ja voolu muutused tavaliselt samasuunalised, tarbijapoolsete pingehälvete puhul vastassuunalised.

Elektrivõrgust põhjustatud pingehälbed. Võrgupoolsed hälvete põhjused võivad tuleneda avariilistest olukordadest (lühised, sh maalühised, liinide katkemised, seadmete avariid) või toitevõrgus toimuvatest lülitustest ja reguleerimisest (trafode lülitused, võrgu skeemi muudatused). Võrgupoolsed pingehälbed on enamasti juhuslikud, esinevad tavaliselt harva (kord nädalas kuni kord paari kuu vältel) ja neid ei pruugi ühe mõõteperioodi (1 nädal) vältel üldse esineda. IEC vastava töögrupi poolt on antud soovitus harvaesinevate pingemuutuste registreerimisel kasutada vaatlusperioodina vähemalt 4 nädalat. Käesoleva töö autor on mõnel juhul kasutanud veelgi pikemat vaatlusperioodi – kuni 3 kuud. Selline vaatlusperiood annab usaldusväärse pildi võrgupoolsetest pingehälvetest, kui need esinevad suhteliselt harva ja on juhuslikud.

Tarbija poolt põhjustatud pingehälbed. Tarbija poolt põhjustavad pingehälbeid käivitused, lülitamised ja lühised tarbija elektrivõrgus, näiteks võimsate asünkroonmootorite käivitused, kraanade ning keevitusseadmete töö. Suure mõjuga on punktkeevitusseadmed, kus pingehälbed võivad ulatuda kuni 20%-ni [10]. Pingekõikumised võivad olla juhuslikud või tsüklilised ja põhjustada tugevat värelust kogu 0,4 kV elektrisüsteemis ja isegi keskpingel. Pingelohud võimsate asünkroonmootorite käivitusest on tavaliselt sügavusega 5...10%, harvem kuni 15%. Tarbija põhjustatud pingehälbeid on lihtsam registreerida, kuna nad esinevad kas reeglipäraselt mingi seadme tööga seotult, tsükliliselt või on neid võimalik mõõteperioodil ise tekitada (näiteks mingi seadme käivitusega). Lühised tarbija elektrivõrgus tavaliselt olulist pingelohku ei tekita, kuna õigesti valitud kaitselülite kaskaadi korral ei teki piisavalt suurt lühisvoolu. Tavaliselt piisab tarbijapoolsete pingehälvete uurimiseks vaatlusperioodist üks nädal.

Pingehälvete – pingelohkude ja pingemuhkude – mõõtmine toimub vastavalt standardile EN 6100-3-3 järgmiselt. Registreeritakse iga sündmuse (milleks on pingelohk või -muhk) kestus ja pinge madalaim või kõrgeim väärtus sellel ajavahemikul. Pingelohk algab hetkest, kui pinge langeb alla $0,9U_{nimi}$ ja lõpeb siis, kui pinge on uuesti üle $0,9U_{nimi}$. Pingemuhk algab, kui pinge ületab $1,1U_{nimi}$ ja lõpeb siis, kui pinge langeb alla $1,1U_{nimi}$. Kolmefaasilises süsteemis on sündmuseks iga pingelohk või pingemuhk ühes kolmest faasist.

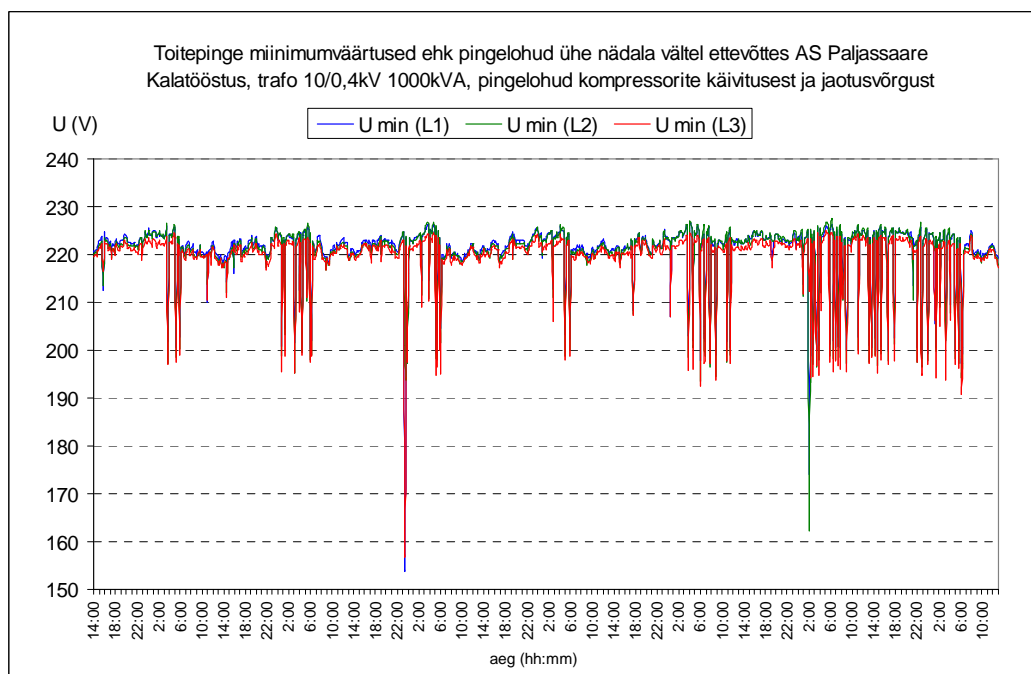
4.4.1 Pingelohud ja pingemuhud

Pingelohk (*voltage dip, voltage sag*) on toitepinge äkiline langus alla 90% nimipingest ja sellele järgnev pinge taastumine kestusega 10 ms kuni 1 min. Pingemuhk ehk liigpinge (*voltage swell*) on ajutine võrgusageduslik liigpinge kestusega 10 ms kuni 1 min. Tööstusettevõtete elektrisüsteemis lubatakse pinge vähenemist kuni –15% nimipingest ehk nimipingest 230 V puhul kuni pingeni 196 V. Harilikult on sellised pingelohud tingitud võimsate mootorite käivitusest ja ei põhjusta probleeme. Pingelohkude hulk ühe aasta jooksul võib ulatuda mõnekümnest tuhandeteni. Pingelohud on enamikus tingitud:

- asünkroonmootorite käivitusest;
- lühistest tarbija enda elektrisüsteemis või kesk- ja kõrgepinge toitevõrgus;
- trafode pingestamisest või korduvpingestamisest keskpinge jaotusvõrgus.

Asünkroonmootorite käivitusest põhjustatud pingelohud on väga sagedased ettevõttes, kus kasutatakse võimsaid asünkroonmootoreid, näiteks saed, hõõvliid ja hakkurid puidutööstuses, suruõhu- ja külmutuskompressorid toiduainetetööstuses, veskite ajamid jne, vt joonis 4.7. Asünkroonmootorite käivitusvool on tavaliselt 5...7 kordne nimivool. Sellest voolust põhjustatud pingelohu sügavus sõltub mootori võimsusest, käivitusmeetodist, mootori ning tööseadme inertsist ja koormusest ning süsteemi takistusest antud punktis. Nende pingelohkude sügavus on tavaliselt kuni 85% nimipingest ja kestus 0,2 kuni 20 sekundit. Mootorite põhjustatud pingelohud on sümmeetrilised, kõigis kolmes faasis langeb pinge võrdselt ja taastub seejärel sujuvalt.

Lühistest tingitud pingelohud võivad olla sümmeetrilised või asümmeetrilised sõltuvalt sellest, kas lühis on faasijuhi ja neutraalijuhi või faasijuhtide vahel ning esineb ühes, kahes või kolmes faasis. Mida lähemal on lühis liitumispunktile, seda sügavam on pingelohk. Samuti, mida suurem on toiteahela näivtakistus Z_0 , seda sügavam on pingelohk. Lühistest põhjustatud pingelohud on riskülikukujulised, pinge taastub rikke kõrvaldamise järel kiiresti. Nende pingelohkude kestus sõltub kaitseaparatuuride rakendumiskiirusest.



Joonis 4.7. Pingelohud toiduainetetööstuse ettevõttes ühe nädala vältel

Trafode sisselülitamine tekitab samuti pingelohke. Põhjuseks on sisselülitamisel esinev magnetahela ajutine küllastumine, mis põhjustab suuri magnetimisvoolusid. Need voolud on tugevasti asümmeetrilised ja vähenevad siirdprotsessi käigus eksponentsiaalselt. Pingelohu sügavus sõltub pinge hetkväärtusest trafo sisselülitamise ajahetkel, toiteahela takistusest ja trafo jääkmagneetumusest. Seda tüüpi pingelohud esinevad trafode pingestamisel ning korduvalülitamisel pärast lühise kõrvaldamist. Nende pingelohkude kestus on tavaliselt 0,06 kuni 0,2 s ja sügavus kuni 80%.

4.4.2 Pingehälvete mõõtetulemused

Pingehälvete registreerimisel mõõdeti iga poole perioodi pinge efektiivväärtus. Kui tegelik pinge väljub lubatud pinge vahemikust, siis on tegemist pingehälbega ehk sündmusega ja pingehälbe ulatus ning ajavahemiku kestus, mil pinge oli väljaspool etteantud vahemikku, salvestati. Toitepinge kvaliteedi analüsaator Memobox 300 salvestab pingehälbe kohta kaks parameetrit – selle ulatuse ja kestuse – poole perioodi (10 ms) täpsusega. Toitepinge hälvete

statistiliseks analüüsiks ja esitamiseks on IEC töögrupi poolt välja töötatud vastav tabeli vorm. Käesoleva töö käigus saadud pingehälvete mõõtetulemused on esitatud IEC vormile vastavas tabelis 4.4.

Tabel 4.4. Registreeritud pingehälvete koondtabel vastavalt IEC pingehälvete klassifikatsioonile

| Pingehälbe kestus | kuni 20 ms | 20...100 ms | 100...500 ms | 0,5...1 s | 1...3 s | 3...60 s | üle 60 s |
|-------------------|------------|-------------|--------------|-----------|---------|----------|----------|
| Pingemuhud | 453 | 31 | 1648 | 83 | 77 | 43 | 2 |
| Pingelohud | | | | | | | |
| 10 ... < 15% | 33262 | 14788 | 8416 | 364 | 393 | 227 | 22 |
| 15 ... < 30% | 167 | 73 | 52 | 13 | 48 | | 3 |
| 30 ... < 60% | 10 | 30 | 23 | 6 | 4 | | |
| 60 ... < 99% | 2 | 28 | 10 | 4 | 1 | 15 | 4 |
| Katkestused | | 3 | | 1 | 6 | 27 | 54 |

4.4.3 Pingehälvete ulatuse-kestuse diagramm

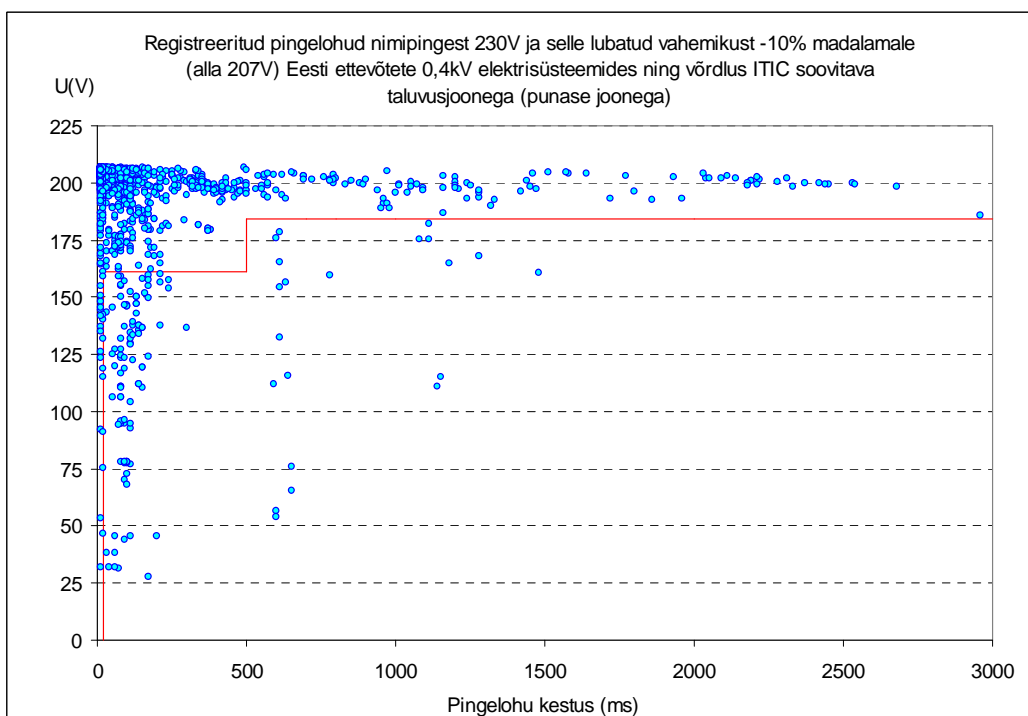
Teades pingehälvete ulatust ja kestust saab pingehälbed kujutada graafiliselt ulatuse-kestuse diagrammil (*magnitude-duration plots*). Selline esitus on ülevaatlik ja võimaldab saadud mõõtetulemusi võrrelda näiteks nn ITIC (*Information Technology Industry Council*) pingetaluvuskõvera ja hõlpsamini leida pingehälvete tõenäolisi põhjustajaid. Pingelohkude võimalikud põhjused ulatuse-kestuse diagrammil:

- Ülekandevõrgu avariid, mis on põhjustatud lühistest ülekandevõrgus, harilikult lühikese kestusega ca 50 kuni 100 ms.
- Kaugelasuvate jaotusvõrkude avariid, mille sügavus võib olla kuni 80% nimipingest ja kestus ühest perioodist kuni mitme sekundini.
- Kohalike jaotusvõrkude avariid, mille sügavus võib olla 40...70%.
- Võimsate mootorite käivitused, mis põhjustavad pingelohke kuni 85% kestusega 0,2...20 s.
- Sularite rakendumisel tekkivad pingelohud on väga lühikese kestusega, poolest perioodist kuni 5 perioodini.

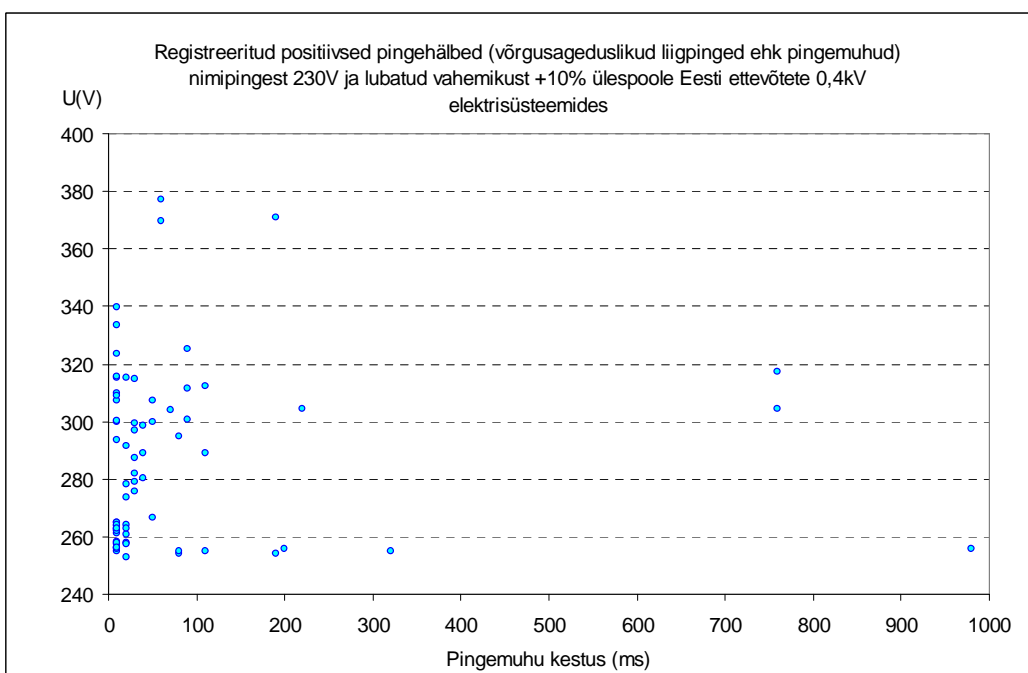
Registreeritud pingelohud on esitatud graafiliselt joonisel 4.8, kus iga punkt vastab ühele pingehälbele ulatuse-kestuse graafikul. Joonisel on punase astmelise joonega näidatud pingelohkude taluvuspiir vastavalt ITIC graafikule, punasest joonest allpool olevad pingelohud võivad põhjustada probleeme.

Pingemuhud ehk ajutised võrgusageduslikud liigpinged (*voltage swell, temporary power frequency overvoltage*) on suhteliselt pika kestusega liigpinged, mis tekivad tavaliselt lülituste või rikete tõttu (koormuse mahaviskel, ühefaasilisel lühisel, maalühisel, trafo pingestamisel, neutraaljuhi suure takistuse korral või liiga suure mahtvusliku koormuse tõttu). Liigpingetest eristatakse võrgusageduslikke pingemuhke ja tunduvalt suurema sagedusega siirdeliigpingeid (*transient overvoltages*), mida käesolevas töös ei vaadelda.

Sageli ettetulevaks põhjuseks võrgusageduslike liigpingete tekkimises on ajutised toitekatkestused, millele järgnevad asümmeetrilised siirdeprotsessid trafo sisselülitamisel, kus faasipinge võib mõne perioodi vältel olla lähedane liinipingele. Teise osa ajutistest liigpingetest moodustavad neutraalinihkest põhjustatud liigpinged. Võrgusageduslike liigpingete registreerimise tulemused on toodud tabelis 4.4 ja graafiliselt pingehälbe ulatuse-kestuse graafikul joonisel 4.9.



Joonis 4.8. Pingekvaliteedi mõõtmistel registreeritud pingelohud, mis on alla 90% nimipingest 230 V Eesti ettevõtete 0,4 kV elektrisüsteemides



Joonis 4.9. Pingekvaliteedi mõõtmistel registreeritud pingemuhud, mis on üle 110% nimipingest 230 V Eesti ettevõtete 0,4 kV elektrisüsteemides

Järeldused pingehälvete esinemissageduse ja nende ulatuse kohta

1. Registreeritud pingehälvetest on suures ülekaalus pingelohud sügavusega 0,85...0,9 nimipinget U_{nimi} ja kestusega kuni 500 ms. Väga lühikese kestusega pingelohud, kuni 20 ms, on sügavusega kuni 0,7 nimipinget. Niisugused pingelohud tavaliselt elektriseadmetele probleeme ei põhjusta.

2. Pingelohud kestusega 20...100 ms ja sügavusega alla $0,85U_{nimi}$ on esinenud kokku 131 korda 66 mõõtevahemiku kohta ehk ca 2 sündmust ühe mõõtevahemiku kohta. Ilmselt on põhjustajaks lühised ülekande- ja jaotusvõrgus. Samuti esines ka samasuguse sügavusega, kuid pikema, 100...500 ms kestusega pingelohkused. Niisugused pingelohud põhjustavad probleeme paljudes seadmetes.
3. Samuti esines pingelohkused kestusega vahemikus 20 ms kuni 20 s, kus pinge langes alla $0,4U_{nimi}$. Niisugust olukorda võib pidada ka toitekatkestuseks või faasikatkestuseks, kus elektriseadmete töö katkeb.
4. Tulemustes saab eristada veel pingelohkused kestusega 1...3 s ja sügavusega $(0,7...0,85)U_{nimi}$, mis on ilmselt tingitud lühistest ja taaslülitustest kaugemal-asuvates jaotus- või ülekandevõrgu osades.
5. Positiivsetest pingehälvetest on kõige sagedasemad esiteks võrgusageduslikud liigpinged ehk pingemuhud kestusega 100...1000 ms ja ulatusega $(1,1...1,3)U_{nimi}$ ning teiseks lühikesed pingemuhud kestusega kuni 20 ms ja ulatusega $(1,1...1,7)U_{nimi}$. Probleeme ettevõtetes on tekitanud just teist liiki pingemuhud, kus seadmete toiteahelad on selle tõttu riknenud.
6. Tarbijate jaoks on tavaliselt probleemiks just pingelohud ja faasitoite katkestused, mis näiteks mõnel juhul on sundinud paigaldama ettevõtte toitesisendisse pingekontrolli kontrolleri ja peakontaktori, mis faasipingete väljumisel etteantud vahemikust lahutab ettevõtte elektrisüsteemi teatud ajaks võrgust.

4.5 Harmoonilised moonutused toitepinges ja toitevoolus

4.5.1 Harmoonilised pinged ja voolud

Mõiste harmoonilised on seotud energiavooga, mille sageduslik kooslus on kõrgem kui võrgusagedus. Kui ideaalsel juhul on pinge ja vool siinuselise lainekujuga, siis realselt on nii pinge kui ka vool vähem või rohkem moonutatud kujuga perioodilised laineprotsessid. Moonutatud siinuskujuga perioodilisi protsesse saab esitada vastavalt Fourier' teisendusele reana, mis koosneb erineva sagedusega siinuselistest komponentidest. Põhikomponendi sagedus on Eestis 50 Hz ja ülejäänud komponentidel mingi põhisageduse kordne sagedus. Igal komponendil on ka oma amplituudväärtus ja algfaasinurk. Seega avalduvad pinge hetkväärtused järgmisel kujul:

$$u(t) = u_1(t) + u_2(t) + u_3(t) + \dots \quad (4.11)$$

või

$$u(t) = \sum U_{mh} \sin(h\omega_0 t + \psi_{uh}). \quad (4.12)$$

Samuti esitatakse voolu hetkväärtused kujul:

$$i(t) = i_1(t) + i_2(t) + i_3(t) + \dots \quad (4.13)$$

või

$$i(t) = \sum I_{mh} \sin(h\omega_0 t + \psi_{ih}). \quad (4.14)$$

Kui pinge- või voolukõvera positiivne ja negatiivne poolperiood on sama kujuga (ehk alaliskomponent puudub), siis koosneb Fourier' rida ainult paaritute harmoonilistest. Harmoonilisi iseloomustatakse nende sagedusega (näiteks 250, 350, 550, 650 Hz) või nende järguga h , milleks on nende kordsus põhiaharmoonilise suhtes, vastavalt $h5$, $h7$, $h11$, $h13$ jne. Elektriseadme voolu harmooniliste koosseis võib olla ajas püsiv (näiteks elektroonse süüturiga luminofoorlambid) või ajas muutuv nii amplituudilt kui ka sageduse spektrilt (näiteks sagedusmuundurid, keevitusseadmed).

Harmooniliste voolude allikad

Harmooniliste voolude allikaks on kõik siinusest erineva voolukujuga seadmed, mille pingevoolutunnusjoon on ebalineaarne. Sellised on näiteks kõik alaldid, muundurid ja magnetahela küllastusega seotud ferromagnetseadmed.

Ühe moonutatud voolukõveraga elektritarviti ühiku võimsus võib olla väga väike. Näiteks kompaktluminofoorlampide võimsused on vahemikus 3...25 W. Kui aga selliste tarvitite hulk on väga suur ja arvestades, et nende vooluharmoonilised liituvad samas faasis, siis võivad nad põhjustada märgatavaid moonutusi toitevoolus. Näiteks kompaktlampide vool sisaldab harmoonilisi komponente väga suurel määral, harmooniliste kogumoonutusvoolus THD_i võib ulatuda kuni 150%-ni, voolu kolmandat harmoonilist võib olla 60...80%, viiendat 20...40%, seitsmendat 20...30% jne. Kuigi tegemist on väga väikeste vooludega, tavaliselt 100...200 mA suurenevad voolu suhtelised moonutused uute valgustite kasutamisel kindlasti.

Harmooniliste moonutuste uurimisel võib elektriseadmed (tarvitid) jagada kahte rühma.

- Seadmed, mille vool on siinuseline ja toitepingega faasis (aktiivkoormus) või sellest ees (mahtuvuslik koormus) või taga (induktiivne koormus); niisuguste tarvitite pingevoolutunnusjoon on kaldsirge ja neid võib nimetada lineaarseteks tarvitjateks. Mida suurem on pingearv, seda suurem on ka tarvitav vool.
- Seadmed, mille voolukõver ei ole siinuseline, vaid moonutatud kujuga, nende tarvitite pingevoolutunnusjoon ei ole lineaarne ning neid võib nimetada mittelineaarseteks tarvitjateks.

4.5.2 Pingevoolu harmooniliste moonutustegurid ja seosed

Kõrgemaid harmoonilisi nii pinges kui ka voolus iseloomustatakse moonutusteguriga THD (*total harmonic distortion*), mis arvutatakse pingevoolu puhul vastavatest seostest:

$$THD_u = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} (U_h)^2}}{U_1}, \quad (4.15)$$

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} (I_h)^2}}{I_1}. \quad (4.16)$$

Pingevoolu efektiivväärtused U (U_{rms}) ja I (I_{rms}) võib avaldada pingevoolu või voolu üksikute harmooniliste komponentide efektiivväärtuste kaudu või põhisagedusliku komponendi ja moonutustegurite kaudu:

$$U = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} U_h^2} = U_1 \sqrt{1 + THD_u^2}, \quad (4.17)$$

$$I = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} = I_1 \sqrt{1 + THD_i^2}. \quad (4.18)$$

Harmooniliste moonutuste ulatuse hindamiseks tarvitaja elektrisüsteemis on soovitatav teada mõlemat parameetrit. Mittelineaarset tarvitit iseloomustatakse voolu harmooniliste moonutuste teguri THD_i kaudu. Voolu moonutustegur näitab, kuivõrd on tarvitaja voolu kuju moonutatud võrreldes põhisagedusliku siinuskõveraga. Voolu moonutustegur THD_i võib olla väga erinev vahemikus 2...150%. Kõrge voolu moonutustegur ei ole iseenesest kriitiline, kui selle voolu efektiivväärtus on väike võrreldes toiteahela nimivooluga.

Selleks, et iseloomustada harmooniliste voolude suurust toiteahela (trafo) nimivoolu suhtes kasutatakse parameetrit – voolu moonutustegur liinivoolu suhtes TDD_i (*total demand distortion*). Liinivool I_L on siin suurim lubatav vool liitumispunktis:

$$TDD_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} (I_h)^2}}{I_L}. \quad (4.19)$$

Reaalselt võib moonutatud voolus ja pinges esineda väga kõrget järku (kuni 200-ndani) harmoonilisi, kuid tavaliselt piirduakse mõõtmistel 25-nda järguga. Sellest kõrgema sagedusega harmooniliste osa spektris on enamasti väga väike (alla 0,1%), eriti juhul, kui elektrisüsteemi on lülitatud kondensaatorid.

4.5.3 Harmooniliste pingete ja voolude lubatavad piirväärtused

Pikaajaliste uurimistööde ja praktika käigus on välja töötatud sellised pinge- ja vooluharmooniliste piirväärtused, mille puhul loetakse, et harmoonilised lisakaod on vastuvõetavad. Need piirväärtused on toodud standardites. Standard EVS-EN 50160 sätestab nõuded pingeharmoonilistele, standard IEC 61000-3-2 suurimad lubatavad vooluharmoonilised seadmetele nimivooluga kuni 16 A ja standard IEC 61000-3-4 lubatavad vooluharmoonilised seadmetele nimivooluga üle 16 A.

Üldjuhul sõltub lubatav voolumoonutuste piirmäär seadmetele nimivooluga üle 16 A toiteahela lühisvõimsusest. Orienteeruvaks voolumoonutuste piirväärtuseks võib lugeda TDD_i väärtust 20%. Paljudes uurimustes on jõutud seisukohale, et pinge kogumoonutuste THD_u tase üle 5% ei ole soovitatav, kuna põhjustab elektrisüsteemis lisakadusid ning pinge harmooniliste kogumoonutuste tase üle 10% ei ole lubatav, kuna põhjustab häiringuid seadmete töös.

Standardi EVS EN:50160 kohaselt peab pinge harmooniliste moonutustegur $THD_u \leq 8\%$. Samuti on sätestatud lubatud piirväärtused üksikutele pingeharmoonilistele, vt tabel 4.5.

Tabel 4.5. Kõrgemate harmooniliste pingete (kuni 25-ndat järku) lubatavad piirväärtused liitumispunkti nimipinge U_{nimi} suhtes

| Paaritud harmoonilised | | | | Paarisharmoonilised | |
|------------------------|---------------------------|--------------|---------------------------|---------------------|---------------------------|
| 3-ga jagumatud | | 3-ga jaguvad | | | |
| Järk h | Suhteline pinge u_h , % | Järk h | Suhteline pinge u_h , % | Järk h | Suhteline pinge 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 | | | | | |

Pingeharmooniliste osas on ka rangemaid nõudeid. Näiteks USA standardis IEEE 519 lubatakse madalpingel ja keskipingel (kuni 69 kV) pinge harmooniliste kogumoonutuste THD_u väärtuseks kuni 5% ja üksikute harmooniliste pingete väärtuseks kuni 3%.

4.5.4 Pinge harmooniliste moonutuste mõõtetulemused

Käesoleva töö käigus on toitepinge harmoonilised moonutused registreeritud pingekvaliteedi mõõteseadmega LEM-Memobox 300 või 800 ning registreeritud on pinge harmoonilised kogumoonutused THD_u ja üksikud harmoonilised komponendid U_h kuni järguni h_{25} kolmes faasis ühe nädala vältel 10-minutiliste (mõnel juhul ka 1-minutiliste) ajavahemike keskmiste väärtustena. Mõõtmiste eesmärgiks oli tarbijate 0,4 kV elektrisüsteemide pinge harmooniliste moonutuste ulatuse ja resonantsinähtuste uurimine ning lisaks ka seoses kondensaatorseadmete seadistamise või paigaldamisega.

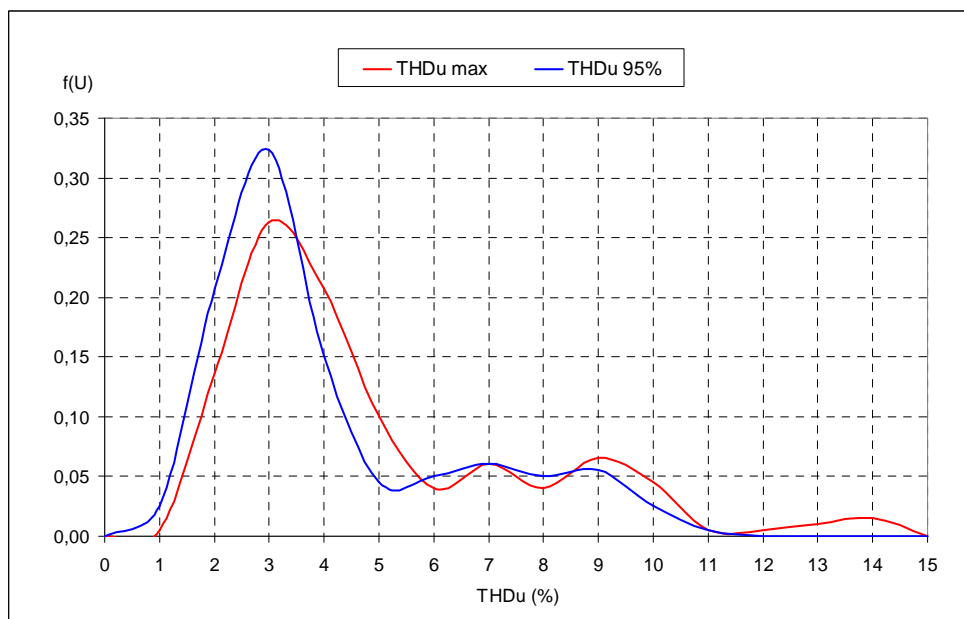
Mõõtetulemused on salvestatud andmebaasis. Toitepinge harmooniliste moonutuste statistilised mõõtetulemused on toodud tabelis 4.8 ja graafiliselt jaotuskõveratena joonistel 4.9 ja 4.10. Näiteid pinge harmooniliste moonutuste mõõtetulemustest ettevõtete 0,4 kV elektrisüsteemides on toodud Lisas 1.

Tabel 4.8. Toitepinge harmooniliste kogumoonutuste THD_u statistilised mõõtetulemused

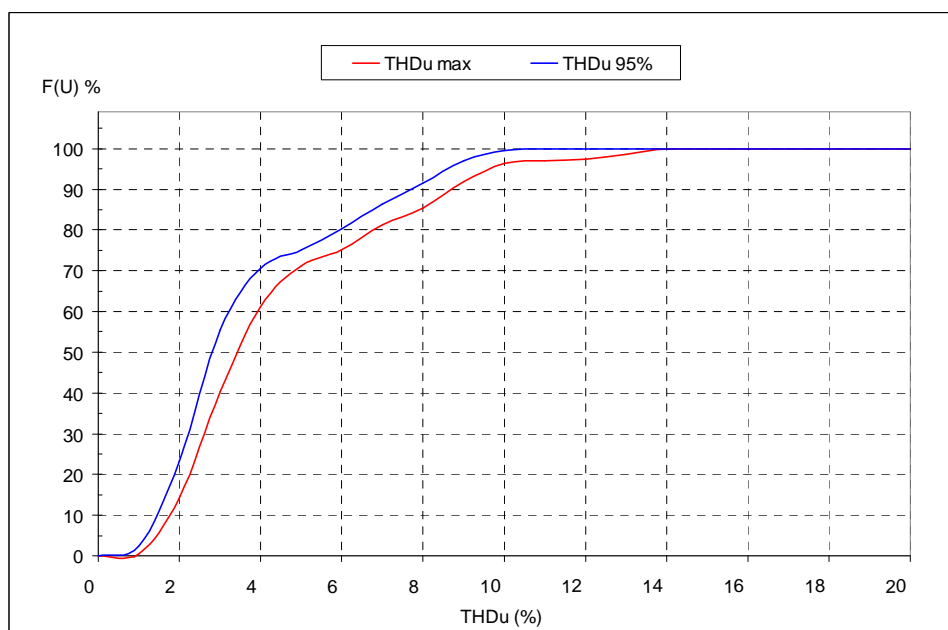
| Parameeter | THD_u min | THD_u 5% | THD_u 50% | THD_u 95% | THD_u max |
|------------------------------|----------------|---------------|----------------|----------------|----------------|
| Mõõtmiste arv | 66 | 66 | 66 | 66 | 66 |
| Dispersioon D | 0,73 | 0,90 | 2,11 | 2,31 | 2,79 |
| Keskm. absoluuthälve K , % | 0,49 | 0,62 | 1,56 | 1,86 | 2,20 |
| THD_u keskmine, % | 1,26 | 1,6 | 2,70 | 3,8 | 4,8 |
| THD_u miinimum, % | 0,39 | 0,53 | 0,72 | 1,05 | 1,39 |
| THD_u maksimum, % | 4,96 | 5,46 | 7,81 | 9,81 | 13,85 |

Järeldused pinge harmooniliste moonutuste taseme kohta

1. Pinge harmooniliste kogumoonutuste THD_u keskmine miinimumtase oli 1,1%, mis iseloomustab pinge harmoonilisi moonutusi koormusmiinimumi ajal (öösi ja puhkepäevadel) olukorras, kus koormus on väike. Võib eeldada, et ligikaudu selline on THD_u tase ka keskpinge jaotusvõrgus. Samas esineb madalpinge elektrisüsteeme, kus THD_u miinimumväärtus on 4,48%, mis viitab liiga kõrgele moonutuste tasemele.
2. Pinge harmooniliste moonutuste soovitusliku taseme 5% ületavad maksimumväärtusena 30% mõõtetulemustest ning 95% väärtusena 25% mõõtetulemustest. Siit võib teha järelduse, et 25...30 protsenti 0,4 kV elektrisüsteemidest on niisuguse harmooniliste tasemega toitepinges, mille puhul võib esineda probleeme. Selline olukord nõuab tähelepanu, eriti juhul kui soovitakse koormust suurendada, paigaldada täiendavaid muundureid või kondensaatorseadmeid.
3. Pinge harmooniliste moonutuste taseme integraalselt tõenäosuse jaotuskõveralt selgub, et lubatud THD_u taseme 8% ületavad maksimumväärtusena 15% mõõtetulemustest ning 95% väärtustena 9% mõõtetulemustest. Seega ca 10...15% elektrisüsteemidest on ületanud standardis sätestatud taseme 8%. Sellistes olukordades tuleb analüüsida, mida ette võtta, et harmooniliste moonutuste taset vähendada. Selleks on kasutada erinevaid lahendusi - trafo võimsuse suurendamine, kondensaatorseadme varustamine filterreaktoritega, täiendavate passiivfiltrite kasutamine, aegunud muundurite asendamine uute võrgusõbralike muunduritega.
4. Pinge harmooniliste moonutuste tõenäosustiheduse jaotuskõveratelt selgub, et THD_u maksimumväärtuste ja samuti 95% väärtuste maksimum ehk mood on ligikaudu 3%. Seega suurel osal (ca 40%) elektrisüsteemidest on THD_u tase suhteliselt madal.



Joonis 4.9. Toitepinge harmooniliste kogumoonutuste THD_u registreeritud tõenäosustihedused (95% väärtused ja maksimumväärtused)



Joonis 4.10. Toitepinge harmooniliste kogumoonutuste THD_u registreeritud integraalse tõenäosuse jaotuskõverad (maksimumväärtused ja 95% väärtused)

5. Pinge harmooniliste moonutuste spektrites on tavaliselt domineeriv 5-s pingeharmooniline, mis sageli annabki suurima osa kogumoonutustest THD_u . Arvestatavalt esineb veel järgmist järku harmoonilisi: h_7 , h_{11} , h_3 , h_{13} , h_{17} , h_{19} ja h_{23} . Viimasest kõrgemat järku pingeharmooniliste osa on väga väike, tavaliselt alla 0,2%.
6. Pinge harmooniliste moonutuste uurimine 0,4 kV elektrisüsteemides on oluline, sest selle mõju elektriseadmetele ning võimsuskadudele ei ole tajutav ja jääb teadvustamata seni, kuni tekivad tõrked seadmete töös.

4.6 Toitepinge muutustega seotud valguse värelus ehk flikker

Valguse värelus ehk flikker on energiavoo häiring, mida põhjustab valgustite toitepinge pidev muutumine, kus pingemuutused on võrgusagedusest väiksemad, tavaliselt alla 30 Hz. Kõige häirivam on valguse värelus, mille sagedus on 8...9 Hz, sellest sagedusest üles- ja allapoole värelus väheneb. Värelus on nähtus, mida inimene tajub valgusallikate valgusvoo või selle spektri muutustena. Väreluse põhjuseks on suhteliselt aeglased pingemuutused elektrisüsteemis, kusjuures väreluse suurust mõjutavad nii pingemuutuste suurus kui ka sagedus. Värelust põhjustavad järgmised elektriseadmed:

- asünkroonmootorid tsüklilise koormusega tootmisliinides, näiteks puidutööstuses, saeveskites, metallide survetöötlemise tsehhides;
- suure võimsusega elektriseadmed sisse-välja lülitamisel või sagedasel käivitamisel (näiteks võimsate kompressorite käivitamine);
- elektrooniliselt juhitud soojendus- ja kütteseadmed, jootmisliinid, kus juhtimine toimub SSR-tüüpi (*SSR – solid state relay*) türistorvõtmega;
- keevitusseadmed, impulsskeevitusseadmed, eriti punktkeevitusseadmed;
- kaarleeksulatusahjud valutsehhides ja metallide taassulatamisel.

Väreluse intensiivsust (*flicker severity*) arvutatakse kui pingekõikumise suhet keskmise pinge efektiivväärtusesse. Standardi EVS-EN:50160 kohaselt ei tohi väreluse intensiivsus ületada väärtust $P_{lt} = 1,0$ tõenäosusega 95% nädalasest mõõteperioodist. Väreluse intensiivsust mõõdetakse tavaliselt kahes ajavahemikus:

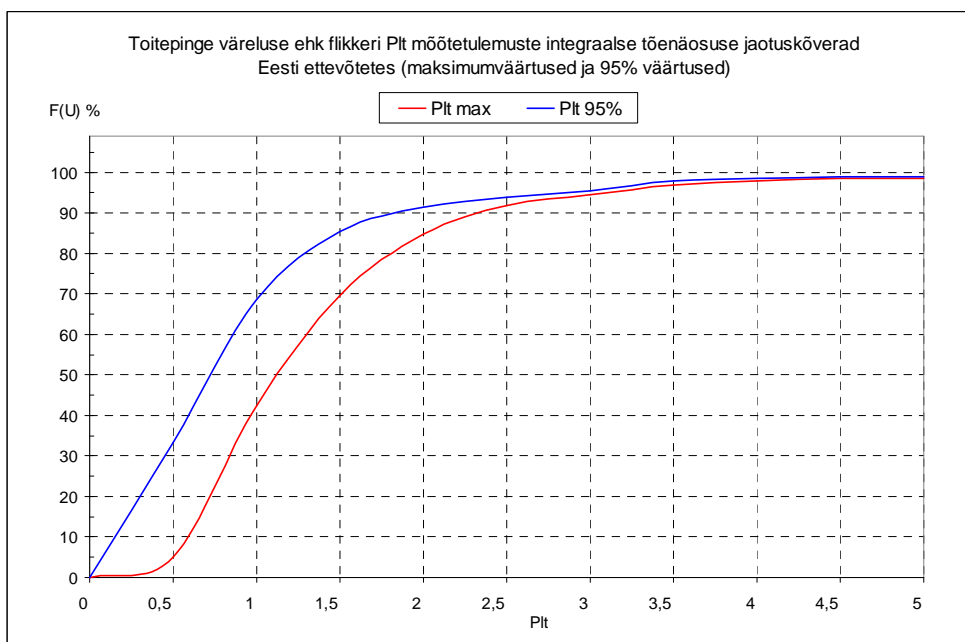
- lühikese ajavahemiku värelus P_{st} (*short term flicker severity*), mida mõõdetakse 10 min ajavahemikes, katseliselt tunnetab inimene värelust alates väärtusest $P_{st} = 1,0$;
- pika ajavahemiku värelus P_{lt} (*long term flicker severity*), mis on 2 tunni väreluse intensiivsus ja arvutatakse lühikese ajavahemiku väreluse väärtustest seosega:

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{12} (P_{st}^3 / 12)} \quad (4.20)$$

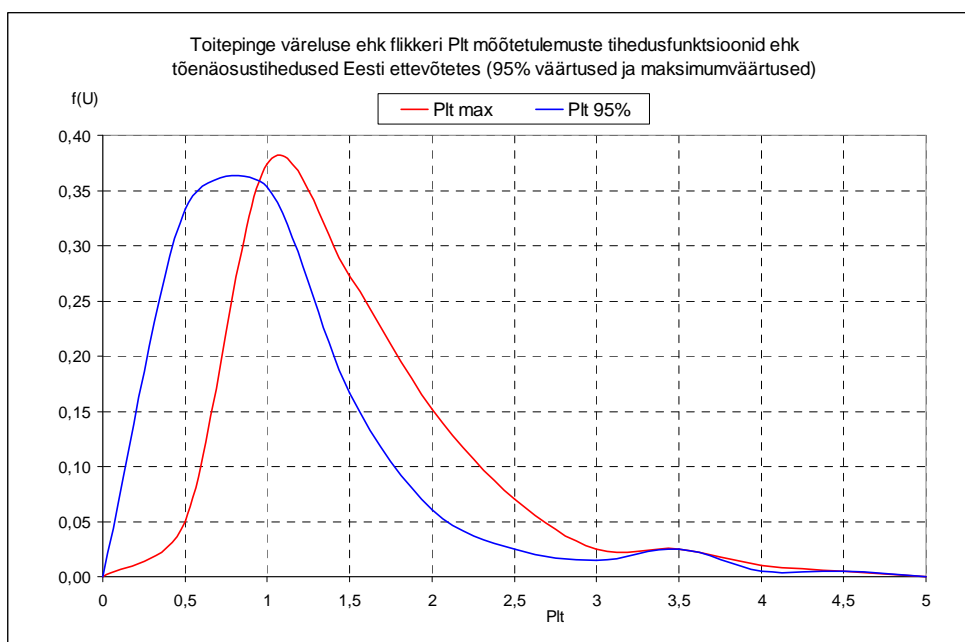
Toitepinge väreluse statistilised mõõtetulemused on toodud tabelis 4.9, integraalsed jaotuskõverad joonisel 4.11 ja tõenäosustiheduse jaotuskõverad joonisel 4.12. Näiteid väreluse tasemest 0,4 kV elektrisüsteemides on toodud Lisas 1. Mõõtetulemused näitavad, et väreluse keskmine tase 0,4 kV elektrisüsteemides rahuldab standardi nõudeid, kuid üksikutel juhtudel on väreluse P_{lt} tase tunduvalt (kuni 10 korda) kõrgem standardiga lubatud väärtusest ja ka otseselt visuaalselt häiriv. Sellised näited värelusest on registreeritud metallitöötlemistsehhis, kus kasutatakse punktkeevitus-seadmeid ja puidutööstuse saeveskites, kus perioodiliselt muutub võimsate mootorite koormus. Erinevus nende näidete vahel on selles, et kui keevitusseadmete puhul esines väreluse kõrge tase kahes faasis, siis puidutööstuses kõigis kolmes faasis.

Tabel 4.9. Toitepinge väreluse statistilised mõõtetulemused

| Parameeter | P_{lt} max | P_{lt} 95% |
|----------------------------|--------------|--------------|
| Mõõtmiste arv | 198 | 198 |
| Dispersioon D | 1,23 | 1,20 |
| Keskmine absoluuthälve K | 0,68 | 0,64 |
| P_{lt} keskmine väärtus | 1,4 | 1,0 |
| P_{lt} miinimumväärtus | 0,2 | 0,2 |
| P_{lt} maksimumväärtus | 10,9 | 10,5 |



Joonis 4.11. Toitepinge väreluse ehk flikkeri P_{lt} registreeritud integraalse tõenäosuse jaotuskõverad Eesti ettevõtete 0,4 kV elektrisüsteemides



Joonis 4.12. Toitepinge väreluse ehk flikkeri P_{lt} registreeritud tihedusfunktsioonid ehk tõenäosustiheduse jaotuskõverad Eesti ettevõtete 0,4 kV elektrisüsteemides

Järeldused väreluse mõõtetulemuste kohta

1. Väreluse maksimumväärtus oli kuni 1,0 42% mõõtevahemikest ja väreluse 95% väärtused jäävad lubatud piiridesse 69% mõõtevahemikest. Seega ligikaudu 31% mõõtetulemustest ületas väreluse tase lubatud piirväärtust.
2. Väreluse 95% väärtuse keskmine tase oli 1,0 ja maksimumväärtuse keskmine tase 1,4. Seega rahuldavad väreluse keskmised tasemed standardi nõudeid 95% ajast, kuid on soovitatav, et väreluse tase oleks vastavalt standardile kuni 1,0 100% ajast.

Töenäosustiheduse jaotuskõverate maksimumväärtus ehk mood oli vastavalt 0,8 ja 1,1. Seega on väreus kõige sagedamini lubatud piirväärtuse 1,0 lähedal. Väreuse miinimumtase oli ca 0,2, mis on väreuse tase rahuliku koormuse või miinimumkoormuse olukorras.

3. Väreuse taseme kõige suuremad väärtused, kus $P_{II}=10\dots11$, on registreeritud metallitöötlemistehhis punktkeevitusseadme töö ajal kahe faasi pinges. Keevitus toimus impulsside seeriana kestusega 2...10 s, kus vooluimpulsi amplituudväärtused olid kuni 1000 A. Kuigi antud keevitusseade oli iseseisva 10/0,4 kV toitetrafoga, põhjustas seadme töö väreust kogu piirkonna 10 kV jaotusvõrgus. Praeguseks on olukord lahendatud uute 10 kV kaabelliinide paigaldamisega.
4. Väreus on probleem, kui selle mõju on inimestele häiriv. Väreus esineb tavaliselt ainult madalpingevõrgus, kuid võib esineda ka keskpingevõrgus. Otseselt lisavõimsuskadusid väreus ei põhjusta. Peamiseks lahenduseks väreuse vähendamisel on trafo võimsuse suurendamine, toiteliini takistuse vähendamine või väreust põhjustava seadme toitmine iseseisvast trafost.

4.7 Toitepingete asümmeetria

Kui ideaalsel juhul on pinged kolmefaasilises süsteemis sümmeetrilised (s.t. faasipingete efektiivväärtused on võrdsed ning samuti on võrdsed faaside pingektorite nihkenurgad), siis reaalselt on pinge vähem või rohkem asümmeetriline. See on põhjustatud koormuste erinevusest kolmes faasis või ülekande ja jaotusvõrgu asümmeetrilistest omadustest või neutraaliahela suurest takistusest. Toitepingete asümmeetriat põhjustavad teatud määral kõik tarbijad, mis ei ole sümmeetrilises kolmefaasilises lülituses. Asümmeetriline pinge põhjustab lisakadusid kolmefaasilistes seadmetes.

Asümmeetriline seisund võib olla kestav või lühiajaline (avariiline). Kestva asümmeetrilise seisundi põhjusteks võivad olla tasakaalustamata koormused tarbijate eri faasides ning asümmeetrilised jaotusvõrguvõrgu seadmed (trafod, transponeerimata liinid). Lühiajaliste asümmeetriliste seisundite põhjuseks võivad olla rikked – faasijuhtide katkemised või lühised (ühe- ja kahefaasilised lühised või maalühised jaotusvõrgu õhuliinides).

Asümmeetrilist seisundit arvutatakse kasutades sümmeetriliste komponentide meetodit, mille kohaselt võib kolmefaasilist pingektorite süsteemi kujutada kolme sümmeetrilise süsteemi – päri-, vastu- ja nulljärgnevussüsteemi vektorite \underline{U}_1 , \underline{U}_2 ja \underline{U}_0 summana.

Asümmeetriat iseloomustatakse asümmeetriateguritega – vastujärgnevustegur ehk vastujärgnevus- ja pärijärgnevuskomponendi suhe K_{2U} ja nulljärgnevuskomponendi ja pärijärgnevuskomponendi suhe K_{0U} , kus nulljärgnevustegur K_{0U} iseloomustab tähtlülituse nullpunkti nihkumist. Asümmeetriategurid arvutatakse järgmiselt:

$$K_{2U} = \frac{U_2}{U_1} 100\% \quad ; \quad K_{0U} = \frac{U_0}{U_1} 100\% . \quad (4.21)$$

Vastavalt standardile EVS-EN: 50160 peab normaaltalitlustingimustel iga nädalase ajavahemiku kestel 95% toitepinge vastujärgnevuskomponendi K_{2U} keskmistest väärtustest olema alla 2% pärijärgnevuskomponendist, ehk $K_{2U} \leq 2\%$. Paljudes uurimustes soovitatakse sellele asümmeetriategurile poole väiksemat piirväärtust ehk $K_{2U} \leq 1\%$. On jõutud järeldusele, et kolmefaasilistes mootorites tekivad arvestatavad lisakaod, kui asümmeetriategur on oluliselt üle 1%. Standard EVS-EN: 50160 annab väärtused üksnes vastujärgnevuskomponendile, sest just see komponent on mootorite lisakadude põhjustamisel oluline. Nulljärgnevustegur K_{0U} ei ole selle standardiga normitud, küll aga on normitud näiteks Venemaa standardiga GOST 13109.

Tasakaalustamata koormusest tingitud asümmeetria ilmneb eriti märgataval kujul siis, kui neutraaljuhi takistus on suurem kui liinijuhi takistus. Niisugune olukord esineb sageli vanemates õhuliinidega võrkudes või hajaasustuse puhul.

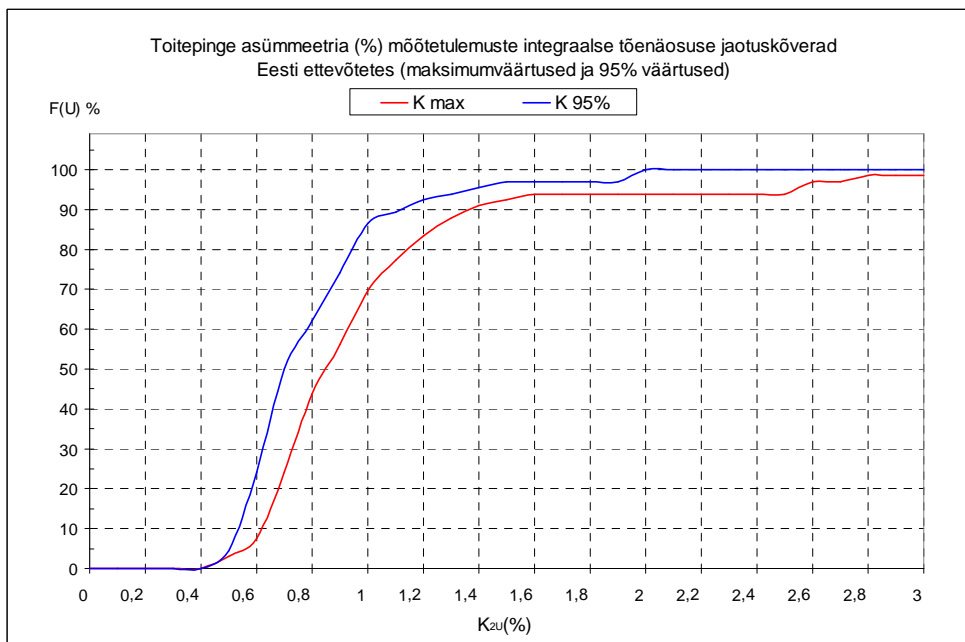
Mõõtmistel registreeritud asümmeetriateguri K_{2U} statistilised arvvaartused on toodud tabelis 4.10, integraalsed tõenäosused joonisel 4.19 ja tõenäosustiheduste jaotuskõverad joonisel 4.20. Näiteid asümmeetrielistest pingeolukordadest 0,4 kV elektrisüsteemides on toodud Lisas 1.

Tabel 4.10. Asümmeetriateguri K_{2U} statistilised arvvaartused

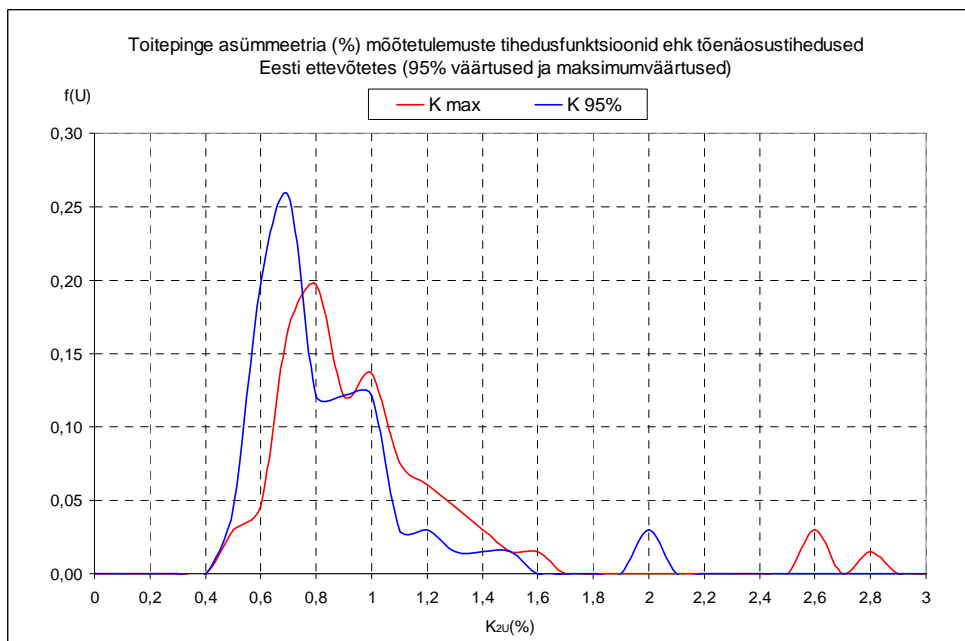
| | K_{2U} (max) | K_{2U} (95%) |
|------------------------------|----------------|----------------|
| Mõõtmiste arv | 66 | 66 |
| Dispersioon D | 0,65 | 0,30 |
| Keskmine absoluuthälve K | 0,36 | 0,20 |
| K_{2U} keskmine väärtus, % | 1,0 | 0,8 |
| K_{2U} miinimumväärtus, % | 0,5 | 0,4 |
| K_{2U} maksimumväärtus, % | 5,0 | 2,0 |

Järeldused asümmeetriateguri mõõtetulemuste kohta

1. Asümmeetriateguri K_{2U} hindamisel saab lähtuda kahest piirväärtusest – kas standardiga EVS-EN:50160 seatud piirväärtusest 2% või soovitatavast piirväärtusest 1%. Asümmeetriateguri maksimumväärtusena ületab 2% piirväärtuse 7% mõõtetulemustest ja 95% väärtusena ainult üks juhus kõigist mõõtetulemustest. Asümmeetriateguri soovitusliku piirväärtuse 1% ületab maksimumväärtusena 30% mõõtetulemustest ja 95% väärtusena 13% tulemustest. Seega, kui lugeda heaks olukorda, kus 100% ajast on asümmeetriategur alla 1%, siis 30% mõõtetulemustest ei vasta sellele tingimusele.
2. Asümmeetriateguri keskmine maksimumväärtus oli 1,0 maksimumväärtustest ja 0,8 väärtustest tõenäosusega 95%. Tõenäosustiheduse jaotuskõvera maksimum ehk mood oli 0,8 maksimumväärtustest ja 0,7 väärtustest tõenäosusega 95%. Seega on asümmeetriateguri tase suures osas mõõtetulemustest standardiga lubatud piirides ja keskmiselt ka soovitatavates piirides (kuni 1%). Asümmeetriateguri miinimumväärtus oli 0,5 kõigis vaatlusvahemikes ja 0,4 tõenäosusega 95% vaatlusvahemikest. Selline on asümmeetriatase ilmselt ka olukorras, kus faasikoormuste ebasümmeetria mõju faasipingetele on minimaalne.
3. Kuna pingete asümmeetria pole otseselt häiriv, siis tarbija 0,4 kV elektrisüsteemis jääb see parameeter tähelepanuta, kuni faasipinged jäävad soovitavasse vahemikku. Probleem on sagedasem suure takistusega toiteahelate puhul neutraalitakistusest tingitud asümmeetria puhul, kui faasikoormused pole tasakaalus ning samuti avariilistes talitluses, mis on lühiajalised. Juhul, kui avariilisi pingeolukordi esineb sageli, on soovitatav tarbija elektrisüsteemi kaitsta näiteks pinge kontrolli relega.



Joonis 4.19. Toitepinge asümmeetriateguri K_{2U} registreeritud integraalse tõenäosuse jaotuskõverad Eesti ettevõtete 0,4 kV elektrisüsteemides



Joonis 4.20. Toitepinge asümmeetriateguri K_{2U} registreeritud tõenäosustiheduse jaotuskõverad Eesti ettevõtete 0,4 kV elektrisüsteemides

5. Toitepinge kvaliteedi mõju elektriseadmetele ja elektritarbimisele

Elektriseadmete talitus, energiatarbimine, võimsuskad nendes ja seadmete tööiga sõltuvad vähem või rohkem toitepinge kvaliteedist. Seejuures mõjutab toitepinge kvaliteet elektriseadme tööd järgmistes lõikudes:

- elektriseadmete aktiiv- ja reaktiivvõimsuse tarbimine;
- võimsuskadude suurus tarbija seadmetes, trafodes ja toiteliinides;
- tööseadmete tootlikkus;
- seadmete talitluse häired ja tõrked ning seadmete tööiga;
- tööseadmetega tehtavate tehnoloogiliste operatsioonide kvaliteet.

Sõltuvalt seadme parameetritest ja funktsioonidest võib olulisem olla üks või teine ülaltoodud teguritest. Näiteks kui elektroonikatööstuses on kõige olulisem häiringukindlus. Seal kasutatakse seadme toiteahelas mitut elementi häiringute mõju vähendamiseks, näiteks passiivset võrgufiltrit ja lisaks ka eraldustrafot. Töötleva tööstuse ettevõtetes on sageli suure võimsusega tootmisliinid, mis sisaldavad võimsaid asünkroonmootoreid. Sel juhul on olulisemad võimsuskad mootorites ning samuti toiteahelas (liinides, trafodes). Näiteks tsemenditööstuses kasutatakse mootoreid võimsusega kuni 2 MW, puidutööstuses kasutatavad saagimisliinid võivad sisaldada 10...20 mootorit võimsusega 10...160 kW.

Elektrienergia tarbimist ning võimsuskadusid tarbija elektrisüsteemis mõjutavad peamiselt järgmised toitepinge parameetrid:

- pingeniivo ja selle hälbed;
- harmoonilised moonutused toitepinges ja voolus;
- pingete asümmeetria kolmes faasis;
- pingelohud ja toitekatkestused.

Nendest kõige olulisemad on keskmine pingeniivo ja selle hajuvus, pinge harmoonilised moonutused ja pingelohud. Kolmefaasiliste elektriseadmete talitlust samuti mõjutav pingete märkimisväärne asümmeetria (üle 1%) esineb harva või ainult lühiajalistes avariitalitlustes. Toitekatkestused põhjustavad energiakadusid kaudselt juhul, kui need on sagedased ning kui nende tagajärjel tekib tootmises seisak, mille järel kulub teatud aeg tootmise uuesti käivitamiseks.

Toitepinge kvaliteedi erinevad parameetrid mõjutavad elektritarbimist ja tarbija seadmeid erinevalt ning enamasti jääb toitepinge kvaliteedi mõju märkamatuks, kuni ei teki häiringuid tarbija seadmete töös.

5.1 Toitepinge nivoo probleemi aktuaalsus ja pingeniivo reguleerimise vahendid

Toitepinge optimaalse nivoo valiku probleem on aktuaalne paljudes riikides. Pingeniivo optimeerimine ehk reguleerimine (*voltage optimisation, voltage regulation*) nii keskpinge jaotusvõrkudes kui ka tarbijate madalpinge elektrisüsteemides koos reaktiivvõimsuse kompensatsiooniga on üks kõige olulisemaid abinõusid elektritarbimise optimeerimisel. Neid kahte abinõud tuleb rakendada üheskoos, sest reaktiivvõimsuse kompensatsioon mõjutab otseselt ka toitepinget.

Pingeniivo reguleerimise enamlevinud vahendid:

- trafo astmelüliti, vajalik trafo väljalülitamine (*off-load tap changer*);
- trafo koormus-astmelüliti (*on-load tap changer*);
- käsilülitamisega autotrafo (*autotransformer with manual ratio change*);
- muudetava ergutusega autotrafo (*autotransformer with variable excitation*);

- ferroresonantstrafo ehk püsiva pinge trafo (*constant voltage transformer*);
- kontaktivaba astmelülitiga trafo (*semiconductor commutated tap changer*);
- reaktiivvõimsuse kompensaatorid ja aktiivfiltrid (*series and parallel reactive power compensators and active filters*).

Pingelohkude vähendamise võimalused

Pingelohkude kui kõige sagedamini esinevate häiringute vähendamine on sageli tarbija ja jaotusvõrgu jaoks kõige suurem probleem. Peamiselt jagunevad pingelohud suurte mootorite käivituste tagajärjel tekkinuteks ja jaotusvõrgust lähtuvateks. Pingelohkude mõju vähendamiseks on erinevaid vahendeid.

- Mootorite käivitusvoolust tingitud pingelohkude vähendamiseks – täht/kolmnurk käivitus, sujuvkäivitus, sagedusmuunduriga käivitus või käivitusreostaadiga käivitus (faasirootoriga mootor suurtel võimsustel).
- Ferroresonantstrafo ehk püsiva pinge trafo (*constant voltage transformer*) tarviti toiteahelas tagab püsiva pinge väljundis, kui sisendis pinge muutub suurtes piirides (70...110%). Tavaliselt on see 3-mähiseline trafo, kus kolmas mähis on ühendatud kondensaatoriga. Trafo töötab küllastuspiirkonnas, on kiiretoimeline ja seda kasutatakse võimsustel kuni 50 kVA.
- Fiidrite staatiline ümberlülititi (*static transformer switch*), mis lülitub kiiresti (~10 ms) ühelt toitefiidril teisele, kui tekib probleem ühel fiidritest.
- Trafo staatiline astmeregulaator (*static tap changing regulator*) on mitme pingeastmega trafo, mille iga väljavõte on varustatud elektroonse lülitiga ja mis hoiab pinget püsivana. Töökiirus on ca 10 ms. Sügavaid pingelohke see ei silu.
- Staatiline pinge kompensaator (*static voltage compensator*). Tavaliselt töötab lühistatud (*by-pass*) talitluses. Kui esineb pingelohk, siis lisatakse pinge puudujääv osa. Energiavaru sisaldub kondensaatorites.
- Mootor-generaator lülitus (*motor-generator set*) katab lühemad pingelohud pöörlevates massides salvestunud energia arvel. Puuduseks on suured kaod (12...18%) ja hoolduskulud.
- Katkematu toite allikas UPS (*uninterruptible power supply*) tagab toitepinge pidevuse nii katkestuste kui ka pingelohkude ajal. Sisaldab laetud akusid ning inverterit. Puuduseks on suured hoolduskulud.

5.2 Toitepinge harmooniliste moonutuste mõju tarbijatele

Voolu ja pinge harmooniliste moonutuste mõju elektritarbimisele ja elektriseadmetele on uuritud intensiivselt, eriti viimase 20...30 aasta vältel. Sellele vaatamata puudub praegu siiski hõlpsasti kasutatav meetodika harmooniliste lisakadude mõõtmiseks.

Toitepinge ja -voolu harmooniliste moonutuste tõttu võivad tarbija elektrisüsteemis esineda järgmised häired, tõrked ja lisakaod, näiteks:

- täiendavad harmoonilised lisakaod elektrimootorites, trafodes, kaablites ja kondensaatorites;
- võimalikud resonantsinähud mingil harmoonilisel sagedusel, millega kaasnevad liigvoolud ja -pinged elektrisüsteemi osades ning elektriseadmetes;
- kaitse- ja juhtsüsteemide häiringud ja tõrked, kaitselülitite väär rakendumine;
- sideliinide ja -süsteemide häiringud elektromagnetilise müra tõttu liinide läheduses;
- häiringud seadmetes ja juhtkontrollerites, kus reguleerimine käib pinge hetkväärtuse järgi, näiteks generaatori sünkroniseerimiskontroller.

Harmonilised lisakaod elektriseadmetes

Harmonilised lisakaod elektriseadmetes on kaod, mille põhjuseks on toitepinge ja -voolu harmonilised moonutused. Kui pinge harmonilised moonutused on väga väikesed (näiteks $THD_u \approx 0,5 \dots 2,0\%$), siis on harmonilised lisakaod mootorites ja trafodes tühised. Harmoniliste lisakadude hindamisel lähtutakse pinge- ja voolukõvera kogumoonutustest, mida iseloomustavad parameetrid THD_u ja THD_i ning üksikute harmoniliste pingete ja voolude väärtused U_h ja I_h . Tarbija, aga samuti ka jaotusvõrgu huvides on teada, kui suured on harmonilised lisakaod ning mida ette võtta nende vähendamiseks.

Harmonilised lisakaod liinides

Harmonilised lisakaod kaablites, kui kaablisoont läbivad põhisagedusest kõrgema sagedusega voolud tekivad pinnaefekti tõttu kaablisoones.

Kolmefaasilises neljajuhtmelistes süsteemis avalduvad kaod kaablis järgmiselt:

$$\Delta P_h = \sum_{c=1}^n \sum_{h=1}^{40} R_{ch} I_{ch}^2, \quad (5.1)$$

kus R_{ch} – kaablisoone takistus harmonilisel sagedusel h ,

I_{ch} – vooluharmoniline ühes kaablisoones sagedusel h .

Juhul kui liinivool sisaldab peale põhisageduse ka kõrgemaid sagedusi, suureneb ka voolu efektiivväärtus ja suurenevad kaod liinis sõltuvalt voolu harmoniliste kogumoonutusest järgmiselt:

$$\Delta P_{kaod} / \Delta P_{kaod1} = 1 + THD_i^2, \quad (5.2)$$

kus ΔP_{kaod1} on kaod põhisagedusel 50 Hz.

Seega, kui näiteks $THD_i = 30\%$ (mis esineb väga sageli), siis kaod kaablites on ca 10% suuremad kui põhisagedusel.

Uurimused on näidanud, et võimsuskaod kaablites 6-pulsiliste alaldite toites on ca 40% suuremad kui siinuselise voolu korral.

Harmonilised lisakaod trafodes

Trafodes põhjustavad harmonilised moonutused lisakadusid nii mähistes pinnaefekti ja voolu ebahürtlase jagunemise tõttu kõrgematel sagedustel kui ka magnetahelas suuremate hüstereesikadude ja pöörisvoolukadude tõttu. Tugevasti moonutatud voolu puhul ei ole võimalik ära kasutada trafo kogu nimivõimsust, tegelikult kasutatav võimsus on sellest ca 10...20% võrra väiksem. Trafo lisakadude arvutamiseks on olemas erinevad meetodid. Enamlevinud meetodika puhul kasutatakse tegurit K (K -factor), mis iseloomustab trafokadude suhet moonutatud voolu ja siinuselise voolu korral ning arvutatakse järgmiselt:

$$K = \sum_{h=1}^{h_{\max}} \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 h^2. \quad (5.3)$$

Teguri K alusel toimub trafo kasutatava võimsuse taandamine nimivõimsusest allapoole (*transformer derating*). Mitmed uurimused viitavad, et kui pingemoonutuste ulatus on $THD_u \approx 10\%$, suurenevad trafokaod kuni 20%.

Harmonilised lisakaod mootorites

Tööstusettevõtetes on suur osa asünkroonmootoritel. Toitepinge kõrgemad harmonilised põhjustavad asünkroonmootoris lisakadusid ning tööea vähenemist.

Moonutatud kujuga pingekõver mootori klemmidel põhjustab lisakadusid nii mähistes kui ka magnetahelas. Harmonilised lisakaod mähistes on oomilised kaod ehk nn Joule'i kaod.

Madalamat järku $f_h \leq 1500$ Hz harmoonilistel vooludel on siin suurem osa. Lisakaod magnetahelas koosnevad hüstereesikadudest ja pöörivoolukadudest.

Lisaks eeltoodule põhjustavad harmooniliste pingete vastujärgnevuskomponendid (5-s, 11-s, 17-s) mootoris pöörleva magnetvälja, mille suund on põhiseduse pöördmagnetväljale vastupidine ning mille sagedus suurem vastava harmoonilise järgu võrra. Mootori pöördemoment põhisedusel ja harmoonilisel sagedusel liituvad ja seega muutub resulteeruv mehaaniline karakteristik. See suurendab mootori harmoonilisi lisakadusid, põhjustab mootori kuumenemist ja vibratsioone.

Harmoonilised lisakaod kondensaatorites

Pinge harmoonilised moonutused halvendavad oluliselt ka kondensaatorite töötingimusi, suureneb kondensaatori vool ja kaod, tõuseb kondensaatori temperatuur ja väheneb tööiga (kuna kiireneb dielektrilise materjali vananemine).

Harmooniliste moonutuste vähendamise võimalused

Harmooniliste moonutuste vähendamiseks või piiramiseks on järgmised võimalused:

- toiteahela lühisvõimsuse (eeskätt trafo võimsuse ja liinide ristlõike) suurendamine ja võimalusel toiteskeemi ümberkorraldamine selliselt, et mittelineaarsed tarvitid on lineaarsetest tarvititest eraldatud;
- kolmandat järku harmooniliste filtreerimine (elimineerimine) trafo mähiste sobiva lülitusgrupiga; näiteks on trafo keskpingemähis kolmnurklülituses või sikk-sakkülituses, et selles sulguksid kolmanda harmoonilise voolud; selliseks trafoks võib olla ka täiendav 0,4/0,4 kV või 10/0,4 kV trafo;
- passiivfiltrite kasutamine, mille näivtakistus on teatud harmoonilisel sagedusel väga väike; passiivfiltreid saab kasutada ettevõtte, kes on ainus alajaama tarbija; kui alajaamal on mitu tarbijat, hakkab passiivfilter „neelama“ ka teiste tarbijate vooluharmoonilisi;
- aktiivfiltrite kasutamine, milles täiendav muundur genereerib sellise kujuga voolukõvera, mis tarbija voolukõveraga liitumisel annab kokku siinuskõvera – see on väga kallis ja erandlik lahendus;
- niisuguste sagedusmuundurite ja alaldite kasutamine, mille toitesisend on varustatud kvaliteetse filtriga, mille voolukõver on siinuselähedase kujuga, väikeste moonutustega ning kõrge võimsusteguriga; selliseid muundureid ja alaldeid näiteks kaarleekahjude ja keevitusseadmete toiteks on põhjalikult uuritud TTÜ Elektrotehnika instituudis.

6. Aktiiv- ja reaktiivvõimsuse tarbimise sõltuvus pingeniivoost

6.1 Aktiiv- ja reaktiivkoormuse staatilised mudelid

Tarbija elektrisüsteemi talitluse optimeerimisel on oluline teada, kuidas pingeniivo mõjutab tarbitavat aktiiv- ja reaktiivvõimsust ning missugune on optimaalne pingeniivo antud elektrisüsteemis. Aktiivvõimsuse ja reaktiivvõimsuse sõltuvust pingest püsiolukorras kirjeldavad koormuse staatilised mudelid. Kõige sagedamini kasutatakse ühte kolmest alltoodud mudelist:

- eksponentsiaalne mudel;
- polünoommudel;
- lineaarne mudel.

Ekspponentsiaalne mudel on üheks sagedamini kasutatavaks mudeliks, kus koormuse aktiiv- ja reaktiivvõimsuse sõltuvus pingest esitatakse kujul:

$$P = P_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^\alpha \quad \text{ja} \quad Q = Q_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^\beta, \quad (6.1)$$

kus P_0 ja Q_0 on vastavalt aktiivvõimsus ja reaktiivvõimsus kas nimipingel U_0 või parameetrite määramise lähteolukorras.

Koormust iseloomustavad koefitsiendid α ja β on pinge suhteliselt väikeses muutumisvahemikus konstantsed, aga iga erinevat tüüpi koormuse jaoks erinevad. Praktikas on oluline määrata koefitsiendid kogu tarbija elektrisüsteemi jaoks tervikuna. Kirjanduses on segakoormuse jaoks toodud koefitsientide α ja β väärtused $\alpha = 0,4 \dots 0,6$ ja $\beta = 1,4 \dots 1,6$.

Polünoommudel kirjeldab koormuse sõltuvust pingest polünoom–võrrandi kujul. Kuna ettevõtte koormus on segakoormus (*composite load*), siis selle mudeli puhul koosneb koormus kolmest iseloomulikust koormustüübist:

- püsiva näivtakistusega koormus (*constant Z*), kus $\alpha = \beta = 2$;
- püsiva vooluga koormus (*constant I*), kus $\alpha = \beta = 1$;
- püsiva võimsusega koormus (*constant P*), kus $\alpha = \beta = 0$.

Koormuse polünoommudelit nimetatakse sageli ZIP-mudeliks. Aktiiv- ja reaktiivvõimsus esitatakse ZIP-mudeli puhul kujul

$$P = P_0 \left(a_0 + a_1 \frac{U}{U_0} + a_2 \left(\frac{U}{U_2} \right)^2 \right), \quad Q = Q_0 \left(b_0 + b_1 \frac{U}{U_0} + b_2 \left(\frac{U}{U_2} \right)^2 \right), \quad (6.2)$$

kus $a_0 + a_1 + a_2 = 1$ ja $b_0 + b_1 + b_2 = 1$.

Parameetrid a_2 ja b_2 esindavad püsiva näivtakistusega koormuse osa, parameetrid a_1 ja b_1 püsiva vooluga osa ja parameetrid a_0 ja b_0 püsiva võimsusega osa kogu koormuses. Koormuse polünoommudel võimaldab koormuse tegelikku sõltuvust pingest kõige täpsemini kirjeldada. Näiteks kodutarbijate jaoks on tegelike mõõtetulemuste alusel saadud järgmine mudel:

$$P = P_0 \left(0,5 + 0,5 \frac{U}{U_0} \right), \quad Q = Q_0 \left(9,5 - 21 \frac{U}{U_0} + 13 \left(\frac{U}{U_0} \right)^2 \right). \quad (6.3)$$

Lineaarne mudel kui kõige lihtsam on ülalkirjeldatud mudelite erikuju, mis pinge suhteliselt väikeses muutumisvahemikus ($\pm 5\% U_{nimi}$) on piisavalt täpne. Aktiiv- ja reaktiivvõimsused avalduvad lineaarses mudelis järgmiselt:

$$P = P_0 \left(a_0 + a_1 \frac{U}{U_0} \right), \quad Q = Q_0 \left(b_0 + b_1 \frac{U}{U_0} \right). \quad (6.4)$$

Lineaarne mudel on sobiv ka sel juhul, kui funktsiooni katsetulemused on olemas ainult kahe muutuja väärtuse puhul, st kui pingesõltuvuse määramise katset saab teha ainult kahes (sees/väljas) talitluses.

6.2 Aktiivvõimsuse ja reaktiivvõimsuse pingesõltuvuse katseline määramine

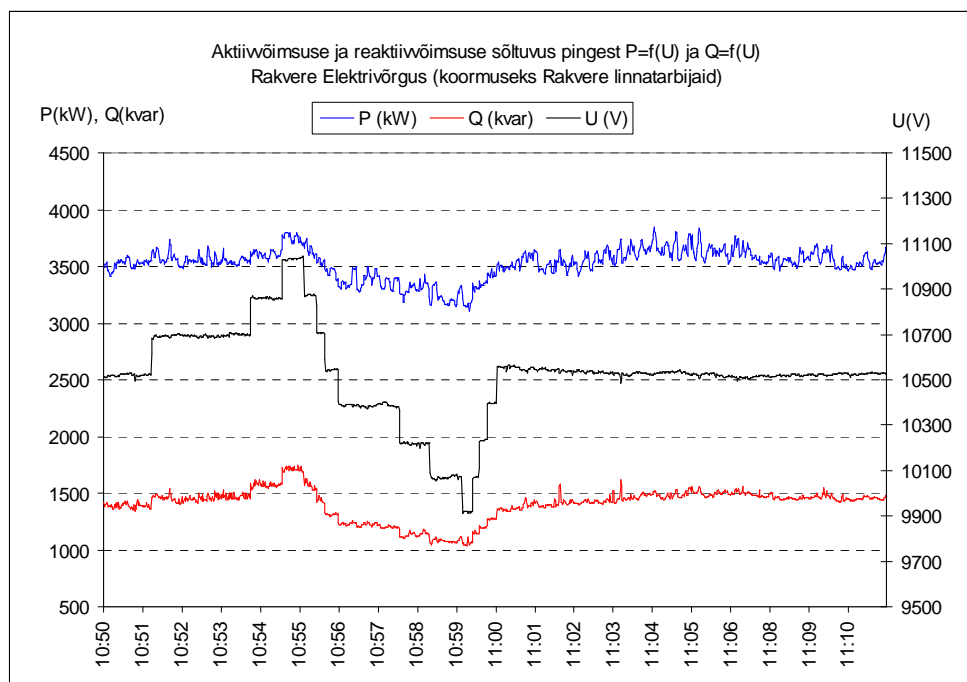
Allpool on kirjeldatud hõlpsasti teostatav katse pingesõltuvustegurite määramiseks. Katse eesmärgiks oli uurida, kuidas registreerivate mõõtmistega kindlaks määrata reaalsed pingesõltuvustegurid. Selleks on tehtud reaalse koormusega järgmised katsed. Esimeses katses oli koormuseks linnatüüpi segakoormus, kus koormuseks oli ca pool Rakvere linna

tarbijatest ja teises katses Kunda tsemenditehase tsemendiveski ajami asünkroonmootor nimivõimsusega 1600 kW ja nimipingega 6 kV. Katse käigus on muudetud keskpinge 10 kV jaotusvõrgu pinget 110/10 kV keskalajaama trafo automaatse astmelüliti astmete ümberlülitamisega mõlemas suunas, nii allapoole kui ülespoole nimipinget. Samal ajal on registreeritud aktiiv- ja reaktiivvõimsuse ning pingete ühe sekundi keskvaartused. Mõõtmisteks on kasutatud elektroonseid arvesteid täpsusklassiga 0,5 aktiivenergiale ja 1,0 reaktiivenergiale. Katsete tulemused on esitatud joonistel 6.1, 6.2 ja 6.3.

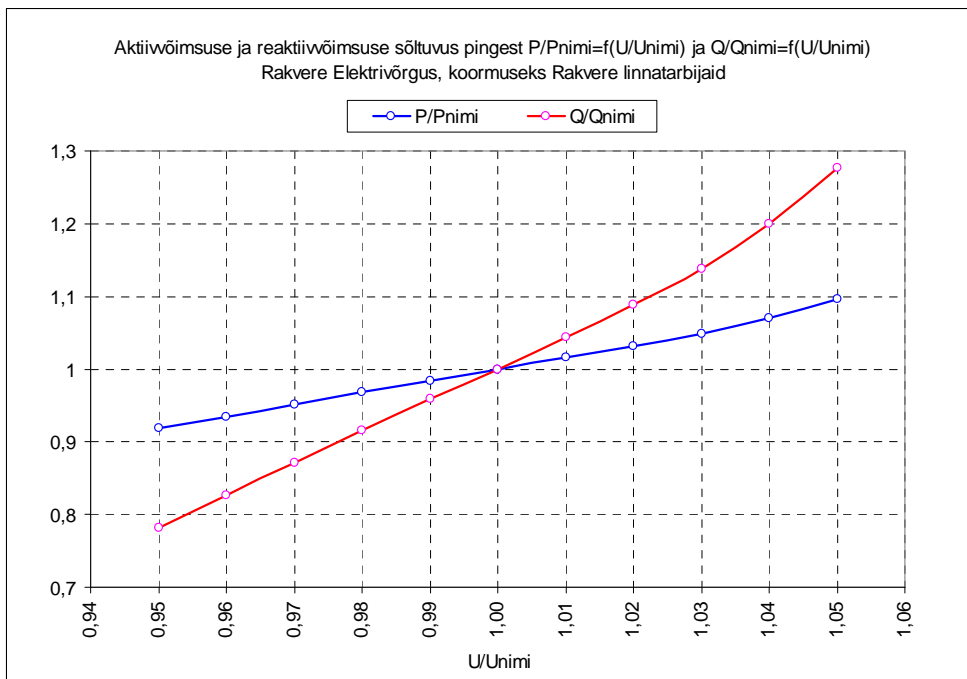
Joonisel 6.1 on toodud aktiiv- ja reaktiivvõimsuse pingesõltuvustegurite määramise katse esialgsed mõõtetulemused *ca* 20 min vältel, kus on sünkroonselt registreeritud 1 s keskmised võimsused ja pinged. Pinges on näha astmelised muutused vastavalt trafo väljavõtete ümberlülitustele, samal ajal muutuvad ka võimsused. Katse tulemusena saab esitada võimsuste suhtelised muutused sõltuvalt pingest, nagu näidatud joonistel 6.2 ja 6.3.

Seega sõltub tarbitav aktiiv- ja reaktiivvõimsus pingest, kusjuures tarbimise tõus on suurem pingetel üle nimipingega. Eriti märgatav on tõus just reaktiivvõimsuse osas, mis tuleneb mootorite ja trafode magneetiskõvera mittelineaarsusest.

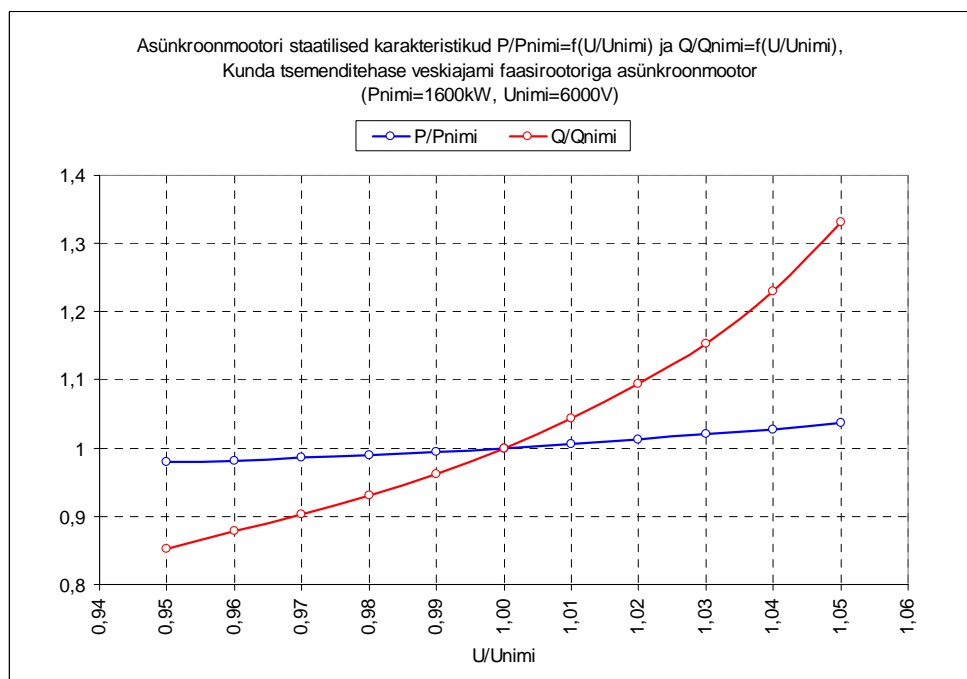
Ülalkirjeldatud katseline meetodika on hõlpsasti läbiviidav, selleks pole isegi ühtegi täiendavat mõõteseadet vaja. Praegu on peaaegu kõigi äritarbijate liitumispunktis olemas elektroonsed arvestid, mis vajaliku tarkvara olemasolul võimaldavad salvestada võimsuste ja pingete ühe sekundi keskmised väärtused. Sel juhul piisab, kui ühendada arvestiga sülearvuti ja paluda võrgu dispetšeril muuta võrgu pinget trafo astmelüliti lülitustega nimipingest kõrgemale ja madalamale. Katset saab korrata mitu korda ja tarbija võimsuste pingesõltuvus ongi olemas.



Joonis 6.1. Aktiiv- ja reaktiivvõimsuse pingesõltuvustegurite määramise katse mõõtetulemused ajas, graafikudel on 1 s keskmised võimsused ja pinged



Joonis 6.2. Segakoormuse suhtelise aktiiv- ja reaktiivvõimsuse pingesõltuvus suhtelise pinge teljel



Joonis 6.3. Asünkroonmootori suhtelise aktiiv- ja reaktiivvõimsuse pingesõltuvus suhtelise pinge teljel

7. Kokkuvõte ja järeldused

7.1 Toitepinge kvaliteedi mõju elektriseadmetele

Elektriseadmete talitluse tõhusus ja tõrketus, nende energiatarbimine ja võimsuskaod ning samuti seadmete tööiga sõltuvad toitepinge kvaliteedist. Seejuures mõjutab toitepinge kvaliteet elektriseadme tööd järgmistes lõikudes:

- elektriseadmete aktiiv- ja reaktiivvõimsuse tarbimine;
- võimsuskadude suurus tarbija seadmetes (tarvitites), trafodes ja toiteliinides;
- tööseadmete tootlikkus;
- seadmete talitluse häiringud ja tõrked ning seadmete tööiga;
- tööseadmetega tehtavate tehnoloogiliste operatsioonide kvaliteet.

Elektrienergia tarbimist ning võimsuskadusid tarbija elektrisüsteemis ning jaotusvõrgus mõjutavad kõige enam järgmised toitepinge parameetrid:

- pingeniivoo ja selle hälbed;
- harmoonilised moonutused toitepinges ja voolus;
- pingelohud ja toitekattestused;
- pingete asümmeetria kolmes faasis.

7.2 Pingeniivoo

Väga oluline on teadvustada seost 0,4 kV elektrisüsteemi pingeniivoo ja energiatarbimise vahel ning määratleda antud elektrisüsteemile ning selle koormusele sobiv pingeniivoo.

Pingeniivoo mõõtetulemuste analüüsil on peale arvuliste parameetrite soovitatav kasutada ülevaatlikumaid graafilisi esitusviise. Nendeks on:

- toitepinge jaotuse integraalse ehk kumulatiivse tõenäosuse kõverad;
- toitepinge tõenäosustiheduse jaotuskõverad ning nende võrdlus soovitatava või standardkohase jaotuskõveraga;

Pingeniivoo mõõtetulemused 0,4 kV elektrisüsteemides on järgmised. Keskmise pinge miinimumväärtus oli 220 V ja maksimumväärtus 248 V. Funktsiooni mood on 235 V ja mediaan 234 V. Pinge kõrgtasemele vastab 60% mõõtetulemustest, 10% mõõtetulemustest on alla 225 V ja 30% üle 235 V. Seega on keskmine pinge veidi kõrgem nimipingest ületades seda ca 5...6 V võrra, mis vastab toitetrafode astmelüliti ühele astmele 2,5%.

Pingeniivoo miinimumväärtus (vähim 10min intervalli keskmine pinge) oli 201 V ja suurim väärtus 238 V. Soovitatavalt peaks miinimumpinge jääma vahemikku 207 V kuni 230 V. Maksimumpingete väärtused jäävad vahemikku 220 V...260 V. Soovitatavalt peaksid pingete maksimumväärtused jääma vahemikku 230 V...240 V. Seega on pingeniivoo miinimum- ja maksimumväärtuste hajumine liiga suur. Põhjusteks on koormuste mittevastavus trafo võimsusele, trafo astme ebasobivus või reaktiivvõimsuse suur osakaal võimsustarbes ning üksikutel juhtudel ka neutraaliahela suur takistus.

Pingeniivoo hajuvus sõltub oluliselt trafo võimsusest. Mida võimsam trafo antud koormuse suhtes, seda väiksem on pingeniivoo hajuvus. Heaks võib pidada hajuvust iseloomustavat keskmist absoluuthälvet kuni 2,5 V, sellele vastab pingeniivoo muutumise vahemik piirulukordades (tühijooks/täiskoormus) ca 15 V. Ebasobiv on olukord, kus keskmine absoluuthälve on 5 V või enam. Sel juhul on pingeniivoo muutumise vahemik ca 30 V.

Toitepinge taseme keskmine väärtus, hajumine ja eriti selle miinimumväärtused suuremate koormuste ajal sõltuvad oluliselt sellest, kas ettevõttes kasutatakse reaktiivvõimsuse kompensatsiooni ja kas see on piisav suuremate koormuste piirkonnas. Kui

kompensatsioon puudub, on pingetaseme jaotuskõver enamasti kahemodaalne ja tunduvalt suurema hajuvusega. Kompensatsiooni kasutamisega väheneb pingeniivo hajumine tavaliselt 2...3 korda ning keskmine pinge tõuseb.

Registreeritud pingeniivod vastavad peaaegu kõigil juhtudel standardile EVS-EN 50160:2007. Seega ei võimalda võrdlemine ainult standardis sätestatud vahemikuga otsustada, kas pingetase on antud elektrisüsteemile sobiv või mitte. Pingetaseme hindamisel standardi EVS-EN: 50160 nõuete järgi on vähe mõtet, kui lähtuda ainult tingimusest $P(0,9U_{nimi} < U_i < 1,1U_{nimi}) \geq 0,95$. Sellist tingimust rahuldavad ilmselt kõik mõõtetulemused. Tarbijate jaoks on mõtet tingimusel $P(0,9U_{nimi} < U_i < 1,1U_{nimi}) = 1$. Lisaks standardis toodud piirväärtuste järgimisele on tarbija jaoks kasulik määratleda oma elektrisüsteemile optimaalne pingetase.

7.3 Lühiajalised pingehälbed (ehk pinge sündmused)

Lühiajalistest pingehälvetest on suures ülekaalus pingelohud. Enamik mõõtmistel registreeritud pingelohke on sügavusega vahemikus 0,85...0,9 nimipinget ja kestusega kuni 500 ms. Niisugused pingelohud ettevõtetele tavaliselt probleeme ei põhjusta.

Pingelohud kestusega 20...100 ms ja sügavusega alla 0,85 nimipinget on esinenud keskmise sagedusega ca 2 sündmust ühe mõõtevahemiku kohta. Ilmselt on nende põhjustajaks lühised ja/või lülitused ülekande- ja jaotusvõrgus. Esineb ka samasuguse sügavusega, kuid 100...500 ms kestusega pingelohkusi. Veel saab eristada pingelohkusi pikema kestusega 1...3 s ja sügavusega 0,7...0,85 nimipinget, mis on ilmselt tingitud lühistest kaugemalasuvates võrguosades. Kõik niisugused pingelohud põhjustavad probleeme tarbija elektrisüsteemis.

Sagedased pingelohud ja faasikatkestused on näiteks mõnel juhul sundinud paigaldama ettevõtte toitesisendisse pingekontrolli kontrolleri koos kontaktoriga, mis lahutab kogu elektrisüsteemi võrgust, kui faasipinged väljuvad etteantud vahemikust. Samuti kasutatakse ulatuslikult UPS-seadmeid juhtarvutite ja kontrolleri toiteahelas.

Võrgusageduslikke liigpingeid (nn pingemuhud), mis on suuremad kui 1,15 nimipinget, esineb pingelohkudega võrreldes suhteliselt väga harva. Pingemuhkudest on esiteks kõige sagedasemad 100...1000 ms kestusega pingemuhud suurusega 1,1...1,3 nimipinget ning teiseks lühikese, kuni 20 ms kestusega pingemuhud ulatusega 1,1...1,7 nimipinget. Probleeme ettevõtetes on tekitanud just teist liiki pingemuhud, mille tõttu on riknenud seadmete toiteahelad.

7.4 Pinge harmoonilised moonutused

Pinge harmooniliste moonutuste THD_u keskmine miinimumtase oli 1,1%, mis iseloomustab pinge moonutusi koormusmiinimumi ajal. Võib eeldada, et ligikaudu selline on THD_u tase keskpinge jaotusvõrgus. Pinge harmooniliste moonutuste tõenäosustiheduse jaotuskõveratelt selgub ka, et THD_u maksimumväärtuste ja ka 95% väärtuste maksimum on ligikaudu 3%. Seega on suurel osal elektrisüsteemidest THD_u tase suhteliselt madal.

Pingemoonutuste soovitatava taseme $THD_u = 5\%$ ületavad maksimumväärtusena 30% mõõtetulemustest ning 95% väärtusena 25% mõõtetulemustest. Siit võib teha järelduse, et 25...30 protsendil elektrisüsteemidest võib harmooniliste tase pinges olla probleemiks.

Standardiga lubatud moonutuste piirtaseme $THD_u = 8\%$ ületavad maksimumväärtusena 15% mõõtetulemustest ning 95% väärtusena 9% mõõtetulemustest. Seega ca 10...15% 0,4 kV elektrisüsteemidest on liiga kõrge harmooniliste tasemega. Sellistes olukordades on vaja analüüsida, mida ette võtta, et harmooniliste moonutuste taset vähendada.

Pinge harmooniliste moonutuste spektrites on tavaliselt domineeriv 5-s pingeharmooniline, mis annab suurima osa kogumoonutustest THD_u . Arvestatavalt esineb veel järgmisi harmoonilisi (ulatuse kahanemise järjekorras): 7-s, 11-s, 3-s, 13-s, 17-s, 19-s ja 23-s. Neist kõrgemat järku pingeharmooniliste osa on tavaliselt alla 0,1%.

7.5 Pinge värelus ja pingete asümmeetria

Väreluse P_t maksimumväärtus on allpool standardiga lubatud väärtust 1,0 42 protsendil mõõtevahemikest ja väreluse 95% väärtused jäävad lubatud piiridesse 69 protsendil mõõtevahemikest. Seega uuritud juhtudest ligikaudu 31 protsendil ületas väreluse tase lubatud piirväärtust. Väreluse 95% väärtuse keskmine tase oli 1,0 ja maksimumväärtuse keskmine tase 1,4. Tõenäosustiheduse jaotuskõverate maksimumväärtus oli vastavalt 0,8 ja 1,1. Seega on tegelik väreluse tase enamasti standardiga lubatud piirväärtuse lähedal. Väreluse kõige suuremad väärtused $P_t = 10$ on registreeritud punktkeevitusseadme töö ajal.

Asümmeetriateguri K_{2U} hindamisel saab lähtuda kahest piirväärtusest – kas standardiga EVS-EN 50160 seatud piirväärtusest 2% või soovitatavast piirväärtusest 1%. Asümmeetriateguri maksimumväärtusena ületab 2% piirväärtuse 7% mõõtetulemustest ja 95% väärtusena ainult üks juhust kõigest mõõtetulemustest. Asümmeetriateguri soovitusliku piirväärtuse 1% ületab maksimumväärtusena 30% mõõtetulemustest ja 95% väärtusena 13% tulemustest. Asümmeetriateguri keskmine maksimumväärtus oli 1,0 maksimumväärtustest ja 0,8 95% väärtustest. Seega on asümmeetriateguri väärtus suures osas mõõtetulemustest standardiga lubatud piirides ja keskmiselt ka soovituslikes piirides kuni 1%.

7.6 Elektrisüsteemi pingesõltuvuse määramine

Elektrisüsteemi talitluse optimeerimisel on oluline teada, kuidas pingeniivo mõjutab tarbitavat aktiiv- ja reaktiivvõimsust ning missugune on optimaalne pingeniivo antud elektrisüsteemis. Aktiivvõimsuse ja reaktiivvõimsuse sõltuvust pingest püsiolukorras kirjeldavad koormuse staatilised mudelid. Mudeli parameetrite määramiseks on vaja teada pingeniivo mõju tarbitavale aktiiv- ja reaktiivvõimsusele. Punktis 6.2 on kirjeldatud aktiivvõimsuse ja reaktiivvõimsuse pingesõltuvuse määramise katseline meetodika. See on hõlpsasti läbiviidav ja annab kasulikku infot pingeniivo optimeerimiseks võrgus.

8. Ettepanekud võrguettevõtetele ja tarbijatele toitepinge kvaliteedi parendamiseks

Ideaalse kvaliteediga toitepinget tegelikkuses ei esine. Toitepinge kvaliteedi hälbeid ideaalsest põhjustavad tarbijad ise oma koormustega, aga samuti avariid ja lülitused ülekande- ja jaotusvõrgus ning loodusnähtused. Reaalne pinge kvaliteet tarbija liitumispunktis on kompromiss tarbija ja võrguettevõtte võimaluste ulatuses.

Käesolevas uuringus on jõutud järgmiste järelduste ja ettepanekuteni.

Nii tarbijal kui ka võrguettevõttel on väga kasulik teada, missugused on toitepinge parameetrid tarbija liitumispunktis, nimelt:

- pingeniivo ja selle hälbed;
- harmoonilised moonutused toitepinges ja toitevoolus;
- pingelohud ja toitekatkestused;
- pingete ja voolude asümmeetria kolmes faasis.

Mõõdetud parameetrite võrdlemine ainult standardis sätestatud normidega ei võimalda otsustada, kas pinge kvaliteet on antud olukorras optimaalne või mitte. Lisaks standardis toodud normidele on kasulik määratleda antud elektrisüsteemile optimaalsed parameetrid.

Pingenivoo optimeerimine (reguleerimine) nii jaotusvõrkudes kui ka tarbijate madalpinge elektrisüsteemides koostöös reaktiivvõimsuse kompensatsiooniga on üks kõige olulisemaid abinõusid elektritarbimise optimeerimisel. Neid kahte abinõud tuleb rakendada üheskoos, sest reaktiivvõimsuse kompensatsioon mõjutab otseselt ka toitepinget.

Elektrisüsteemi talitluse optimeerimisel on oluline teada, kuidas pingenivoo mõjutab tarbitavat aktiiv- ja reaktiivvõimsust. Aktiivvõimsuse ja reaktiivvõimsuse sõltuvust pingest püsiolukorras kirjeldavad koormuse staatilised mudelid. Mudelite parameetrite määramiseks on töös esitatud katseline meetodika, mis on hõlpsasti läbiviidav.

Pingelohud ja lühiajalised katkestused on sageli nii tarbija kui ka jaotusvõrgu jaoks kõige suurem ja häirivam probleem. Samuti on lahendused selle probleemi leevendamiseks vägagi kulukad. Peamiselt jagunevad pingelohud suurte mootorite käivituste tagajärjel tekkinuteks ja jaotusvõrgust või ülekandevõrgust lähtuvateks. Pingelohkude koguarvu, sügavuse ja mõju vähendamiseks on võimalusi nii tarbijal kui ka jaotusvõrgul, sh näiteks jaotusvõrgu konfiguratsiooni optimeerimine ja/või rekonstrueerimine.

Toitepinge ja -voolu harmooniliste moonutuste tõttu tekivad täiendavad lisakaod elektrimootorites, trafodes, kaablites ja kondensaatorites ja ka häiringud kaitse- ja juhtsüsteemide töös. Harmooniliste moonutuste vähendamiseks on erinevaid võimalusi, eeskätt toiteahela lühisvõimsuse (trafo võimsuse ja liinide ristlõike) suurendamine.

Järgnevalt on esitatud väga lühidalt ettepanekud pingekvaliteedi parendamiseks, mida saavad realiseerida tarbijad ja võrguettevõtted. Lisaks on ettepanekuid toodud ka aruande peatükkides 4 ja 5.

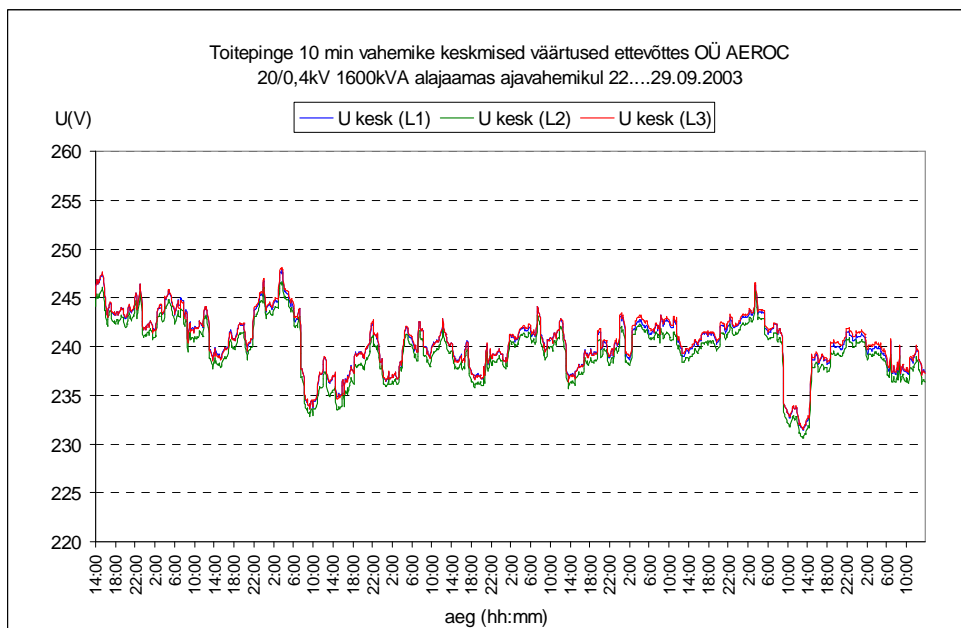
Ettepanekud tarbijale.

- Soovitav on kontrollida aeg-ajalt pinge parameetreid. Kui on kahtlusi pingekvaliteedis (näiteks on pinge töö ajal koormusega olukorras 235V või enam, või esinevad sagedased tõrked seadmete töös, või kondensaatorid ja latid pinisevad iseloomulikult harmoonilistele jms.), kontrollida pingeparameetreid ühe nädala vältel.
- Valida sobiva võimsusega trafo, trafo pingeaste ja kaablite piisava varuga ristlõige lähtudes pingekaost.
- Valida võrgusõbralikud väikese voolumoonutusteguriga muundurid või lisada filtrid olemasolevate puuduliku toiteahelaga muunduritele.
- Võimsate mootorite käivitamisel kasutada kas täht/kolmnurkkäivitust või sujuvkäivitust.
- Vajadusel rakendada reaktiivvõimsuse kompensatsiooni, kas filterreaktoritega või ilma olenevalt harmooniliste moonutuste tasemest võrgus.
- Oluliste juhtseadmete toites kasutada UPS-toiteseadmeid või toitepinge stabiliseerimise muid vahendeid.
- Jälgida, et voolukoormus kolmes faasis oleks piisavalt sümmeetriline.
- Asümmeetriliste pingete puhul kontrollida, kas neutraalijuht on piisava ristlõikega (soovitavalt faasijuhi ristlõikega) ja neutraaliahel on korras.

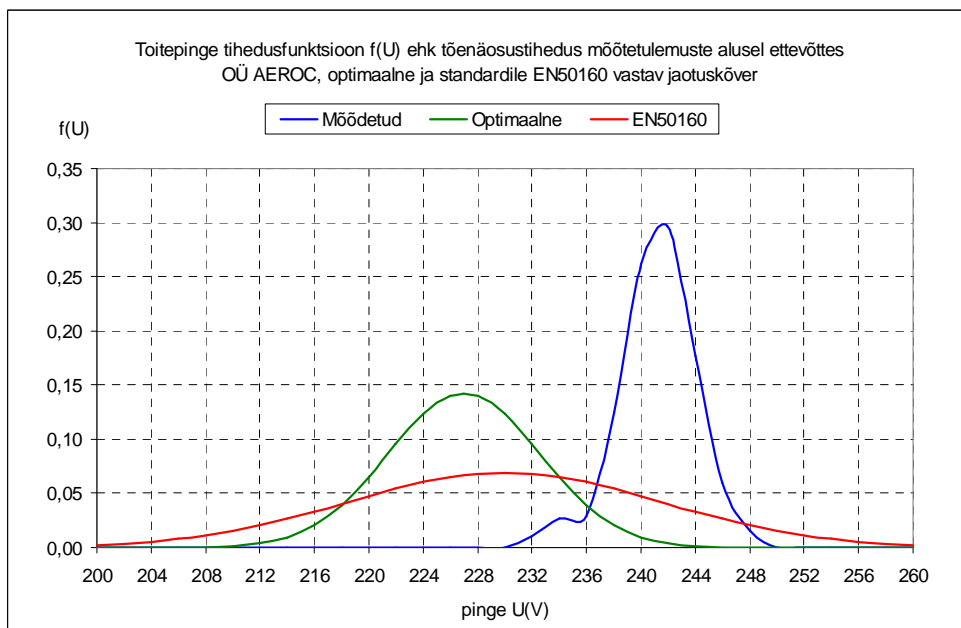
Ettepanekud jaotusvõrgu ettevõtetele.

- Pinge kvaliteedi parameetrite registreerimine võrgu sõlmpunktides ja/või väljavahitud kriitilistes punktides. Väga kasulik on pinge parameetrite pidev registreerimine kas võrguanalüsaatoritega või polüfunktsionaalsete arvestitega olulistest sõlmedes. Soovitav on andmebaasi koostamine pinge kvaliteedi parameetritest ja selle pidev täiendamine.
- Võrgu või selle osade konfiguratsiooni kontrollimine ja optimeerimine ning seadistamine (häälestamine) sobivaks lähtudes nii sobivast pingeniivoost kui ka võimalikult väikesest pingelohkude arvust ja sügavusest kogu võrgupiirkonnas. Soovitav on ka analüüsida, millal eelistada katkestust sügavale lühiajalisele pingelohule.
- Võrgu ja selle seadmete rekonstrueerimine, õhuliinide asendamine kaabelliinidega, jaotusseadmete uuendamine ning nende töö automatiseerimine.
- Võrgu lühisvõimsuse suurendamine, liinide ristlõigete, liinipingete ja trafode võimsuste sobiv valik.
- Trafode astmelülitite asendite täpsustamine pingeniivoo mõõteandmete alusel ühe nädalase perioodi alusel (vähemalt üks ööpäev).
- Keskpinge pingeniivoo optimeerimine 110 kV või 35 kV trafode automaatsete astmelülitite seadistamine ja reguleerimisalgoritmi täpsustamine.
- Keskpingevõrgu releekaitsesätete korrigeerimine kui vaja.
- Harmooniliste moontuste taseme mõõtmine keskpingel ja olulistest punktides madalpingel, harmooniliste lisakadude arvutamine trafodes ja hindamine kogu võrgus, trafode mähiste lülitusgruppide kontrollimine kolmega kordsete harmooniliste elimineerimiseks keskpingevõrgus.

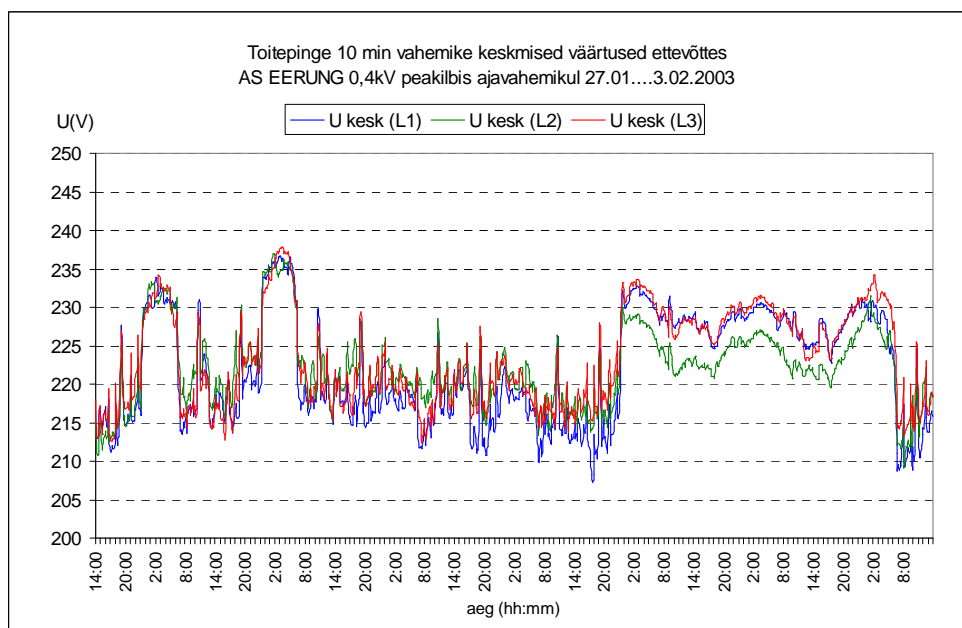
Lisa 1. Näiteid toitepinge parameetrite mõõtetulemustest



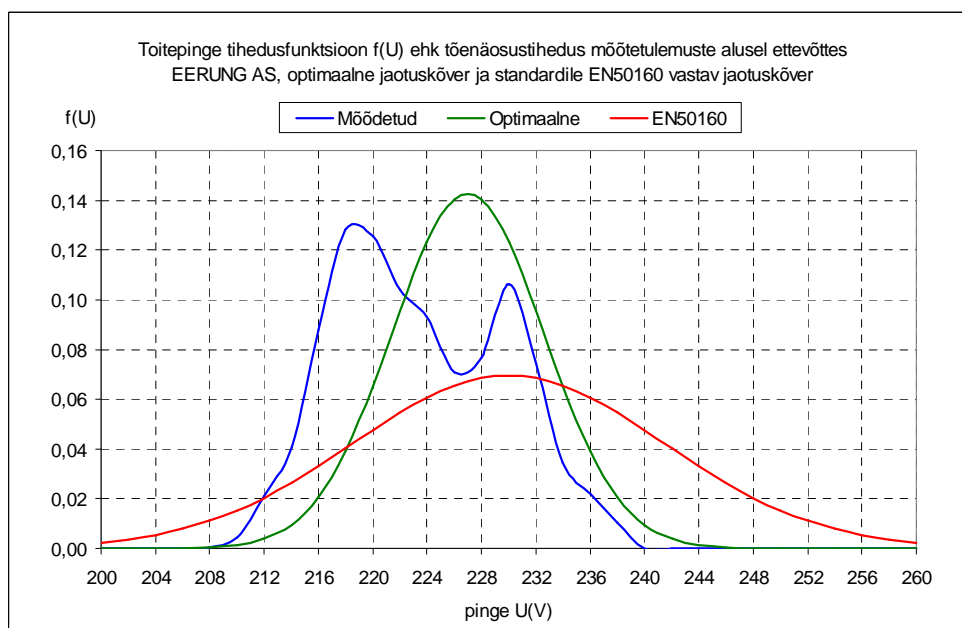
Joonis 1. Toitepingete keskmised väärtused kolmes faasis igas 10 min intervallis ühe nädala vältel



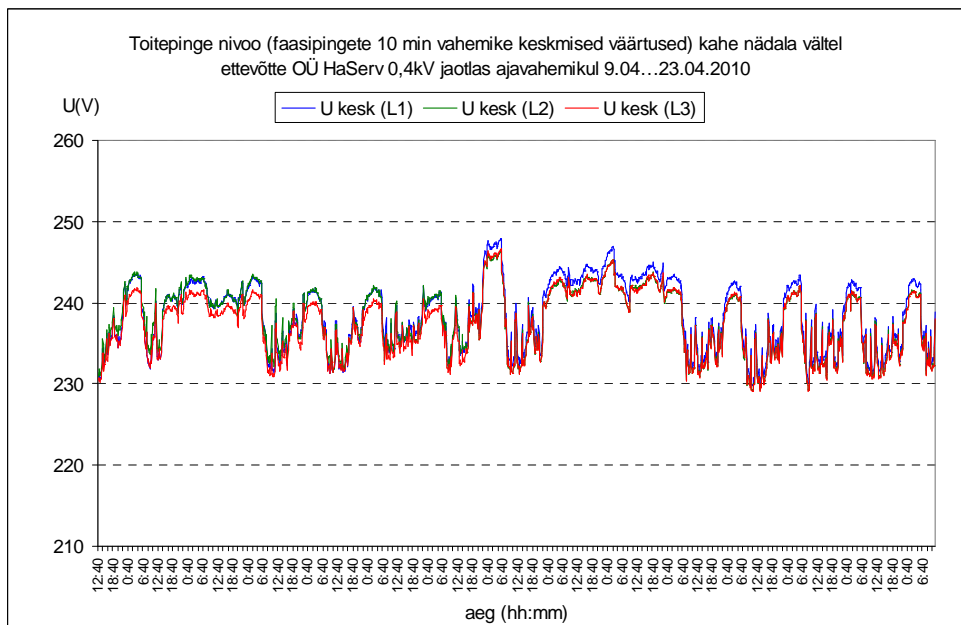
Joonis 2. Toitepinge tõenäosustiheduse jaotuskõver mõõtetulemuste alusel, standardile vastav ja optimaalne jaotuskõver, tegelik pingeniivo on liiga kõrge, trafoaste ebasobiv



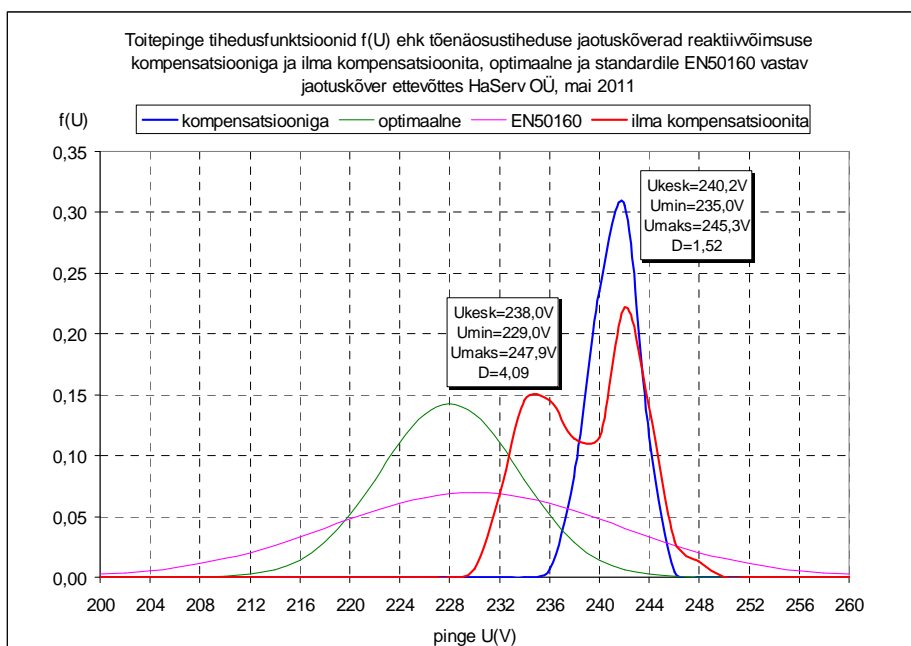
Joonis 3. Toitepinged kolmes faasis ühe nädala vältel ettevõttes AS EERUNG, reaktiivvõimsuse kompensatsioon puudub, pingeniivo on madal



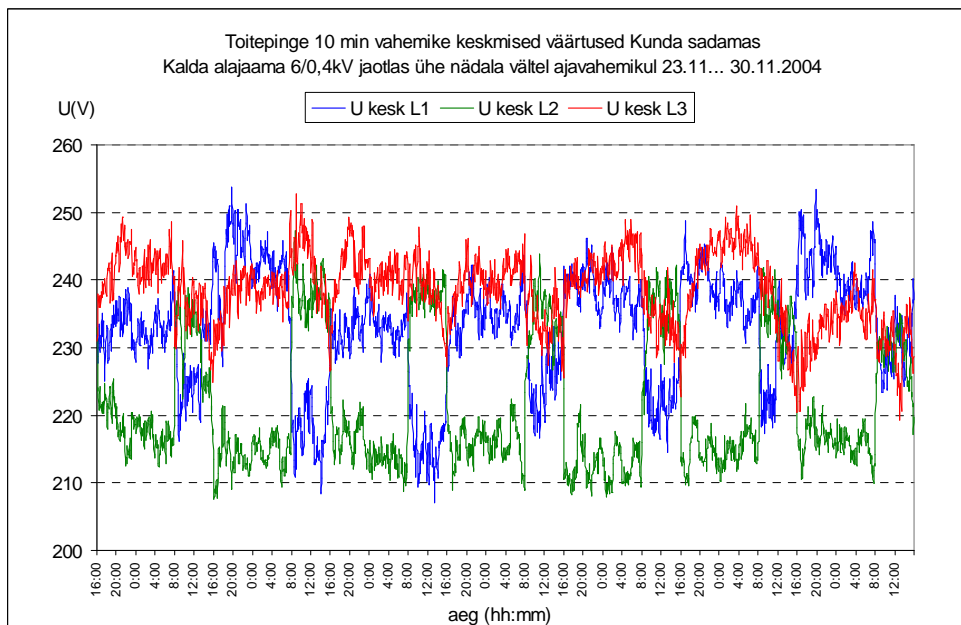
Joonis 4. Toitepinge tõenäosustihedus ettevõttes AS EERUNG, standardile vastav jaotuskõver ja optimaalne jaotuskõver, reaktiivvõimsuse kompensatsiooni puudumise tõttu on pingeniivo hajuvus suur ja pinged madal



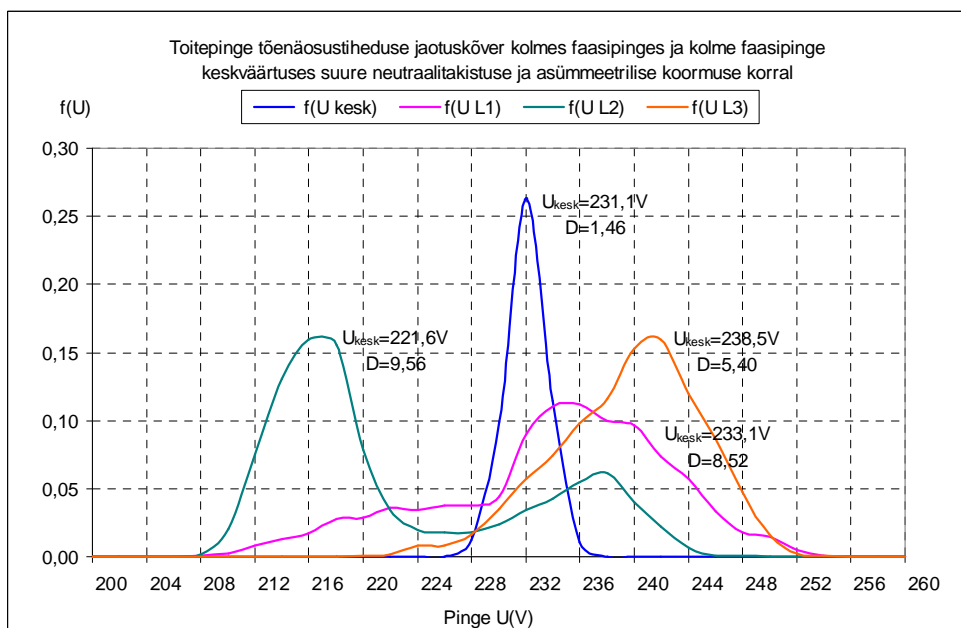
Joonis 5. Toitepinged kolmes faasis kahe nädala vältel puidutööstuse ettevõttes OÜ HaServ, reaktiivvoimsuse kompensatsioon puudub, trafoaste liiga kõrge



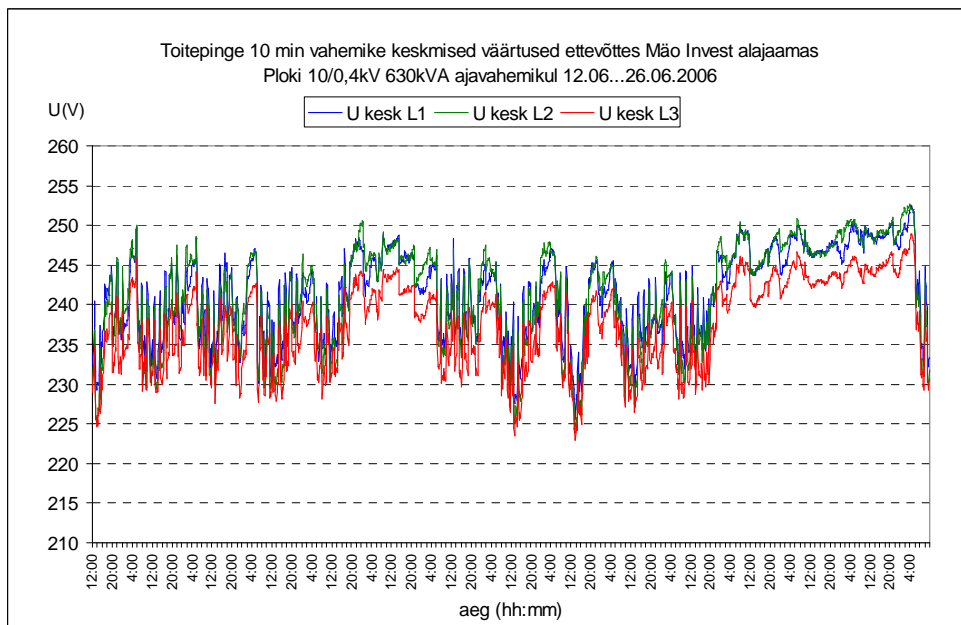
Joonis 6. Toitepinge tõenäosustiheduse jaotuskõvera muutused automaatse kondensatorseadme kasutamisel, pingeniivo tõuseb oluliselt, hajuvus väheneb



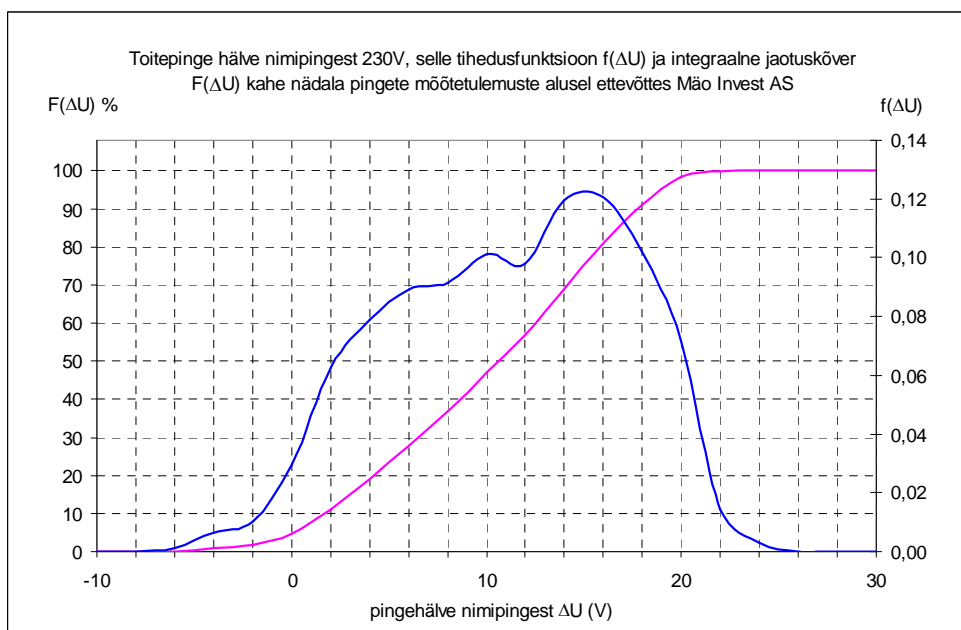
Joonis 7. Toitepinge 5 min keskvaartused Kunda sadama välisvalgustus Kalda alajaama 6/0,4 kV jaotlas ühe nädala vältel, pinged asümmeetrilised, neutraaliahela takistus on suur



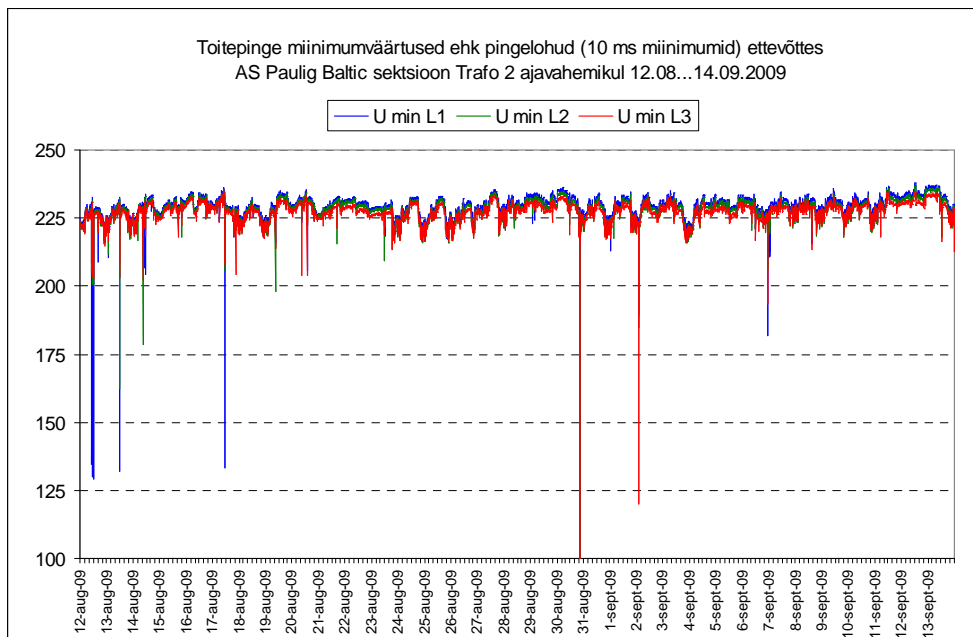
Joonis 8. Toitepinge tõenäosustihedused (kolm faasipinget ja kolme faasipinge keskmine väärtus) suure neutraalitakistuse ja asümmeetrilise koormuse korral, keskmise pinge jaotuskõver on ideaalne, kuid ei iseloomusta olukorda õigesti



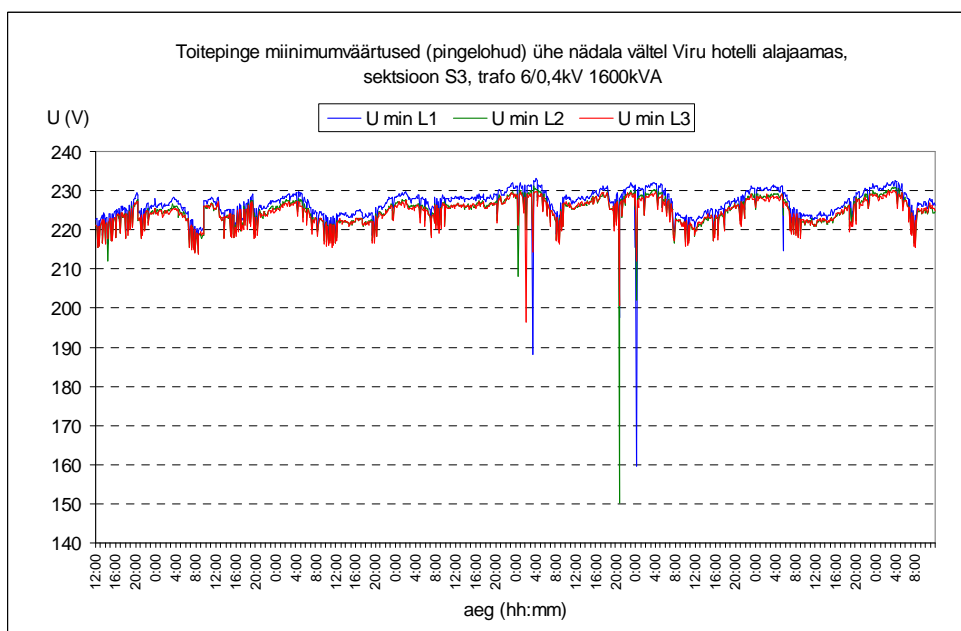
Joonis 9. Toitepinged kolmes faasis kahe nädala vältel ettevõttes AS Mäo Invest, alajaam Ploki 10/0,4 kV 630 kVA, reaktiivvõimsuse kompensatsioon puudub, trafoaste valitud liiga kõrge, kuna on tahetud vähendada pingelohkude mõju



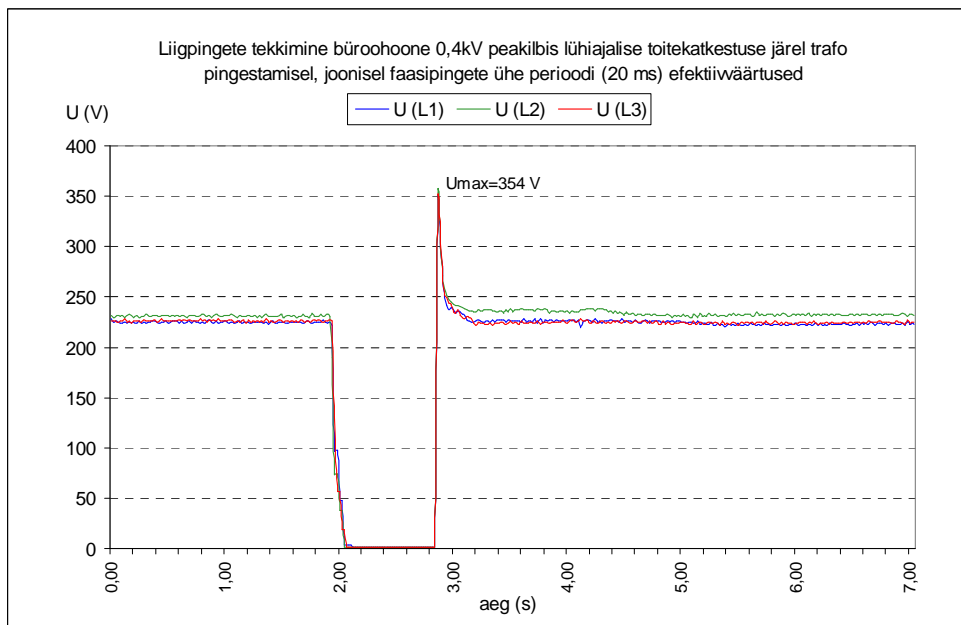
Joonis 10. Toitepinge hälve nimipingest, selle tihedusfunktsioon $f(\Delta U)$ ja integraalne jaotuskõver $F(\Delta U)$ iseloomustavad pingehälvet nimipinges suhtes, antud juhul on jooniselt näha, et keskmiselt on pinge ca 10 V nimipingest kõrgem ja osa ajast ka 15...20 V kõrgem



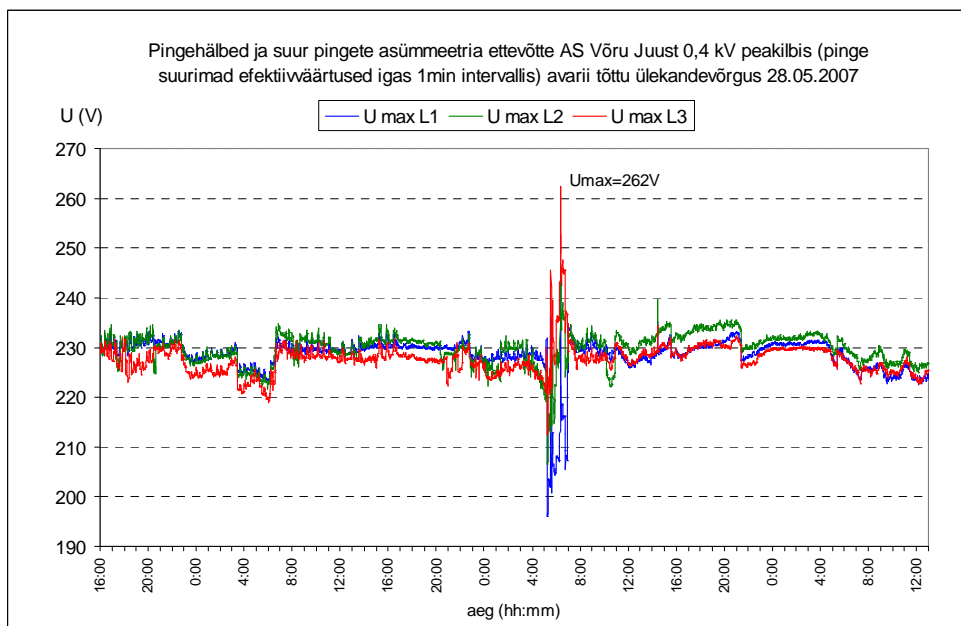
Joonis 11. Toitepinge miinimumväärtused (pingelohud) ühe kuu vältel ettevõttes AS Paulig Baltic, ettevõtte ise pingelohke ei põhjusta, kõik pingelohud on tingitud ülekande ja jaotusvõrgust



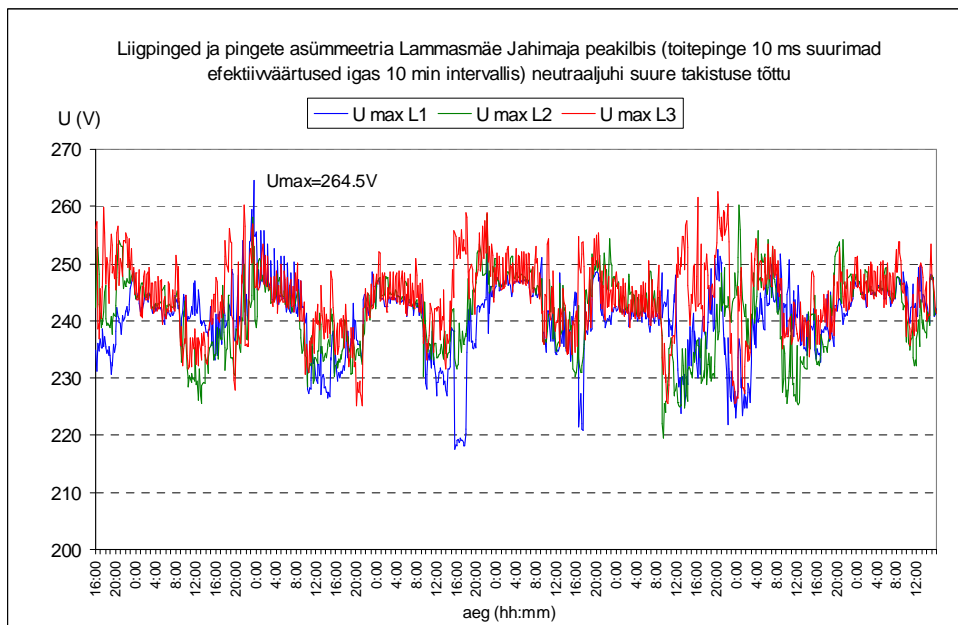
Joonis 12. Toitepinge miinimumväärtused ühe nädala vältel Viru hotelli alajaamas, trafo 6/0,4 kV 1600 kVA, pingelohud põhjustatud lühistest jaotusvõrgus



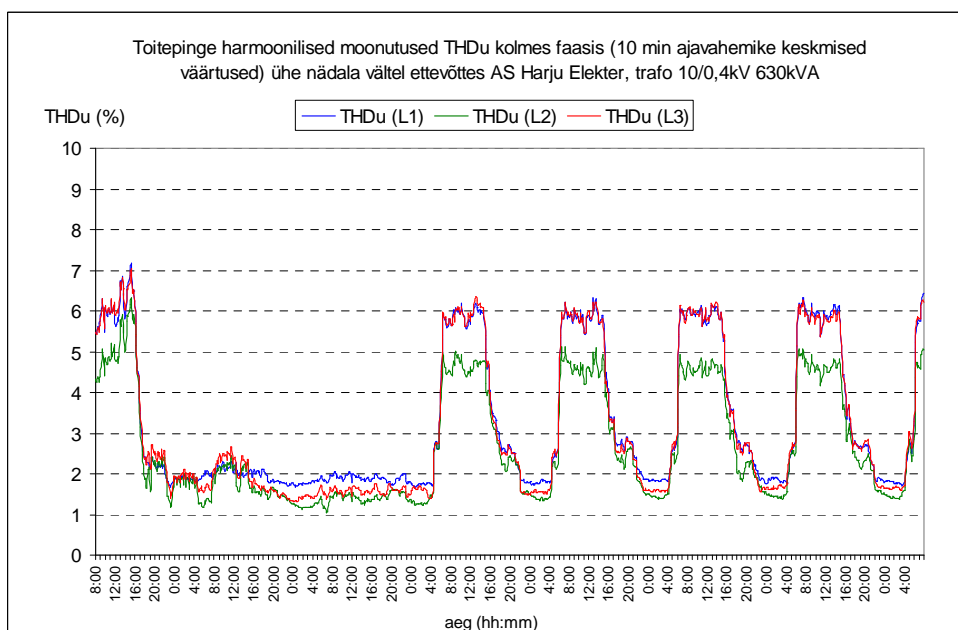
Joonis 13. Liigpinged büroohoone 0,4 kV peakilbis lühiajalise toitekatkestuse järel trafo taaspingestamisel, joonisel faasipingete ühe perioodi efektiivväärtused



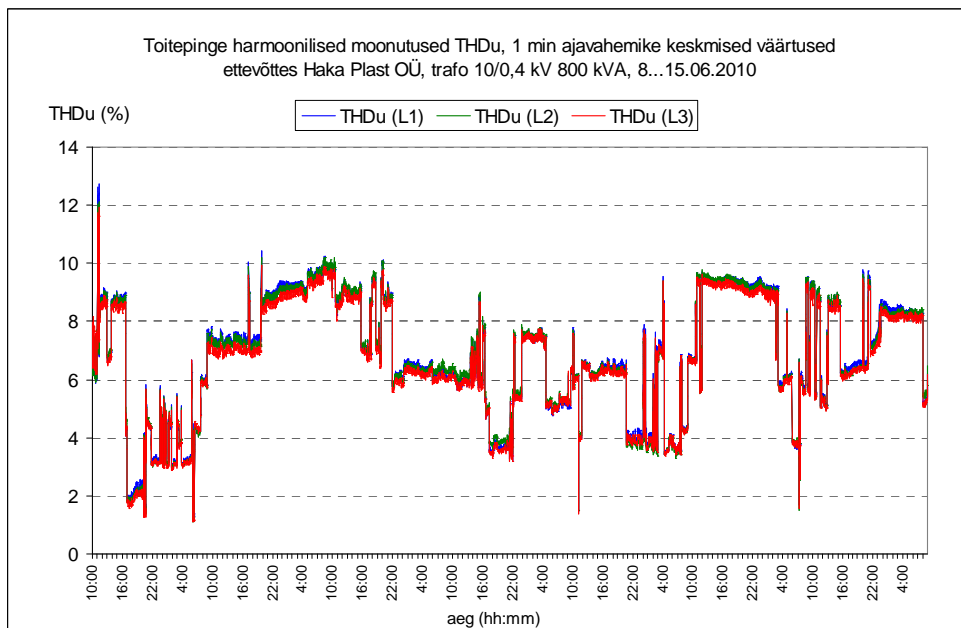
Joonis 14. Suured pingehälbed (pingelohud ja liigpinged) ning suur pingete asümmeetria tööstusettevõtte 0,4 kV peakilbis avarii tõttu ülekandevõrgus ca 2 tunni vältel



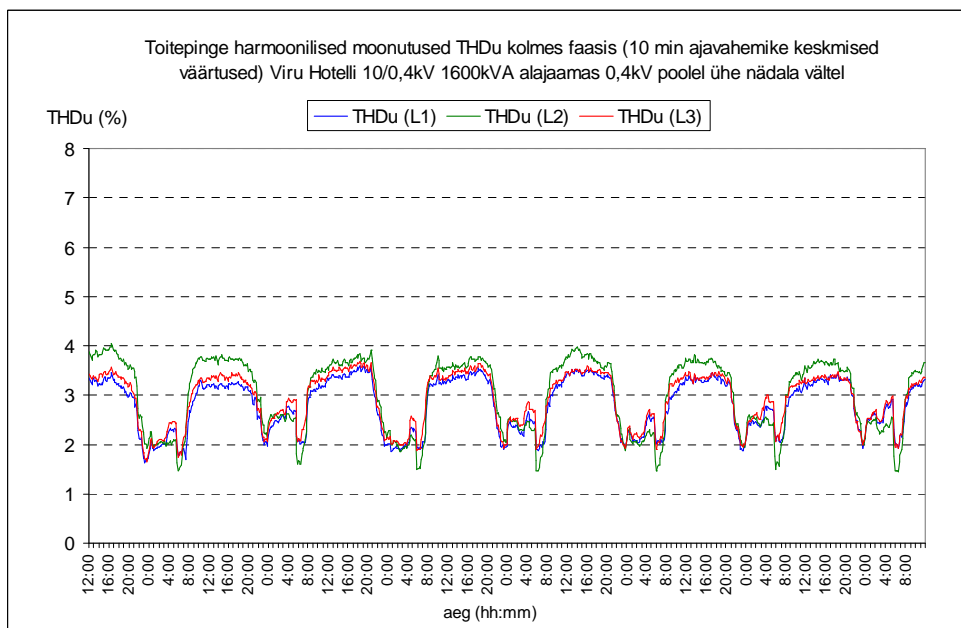
Joonis 15. Liigpinged ja pingete asümmeetria tarbija peakilbis neutraaljuhi liiga suure takistuse ja asümmeetrilise koormuse tõttu



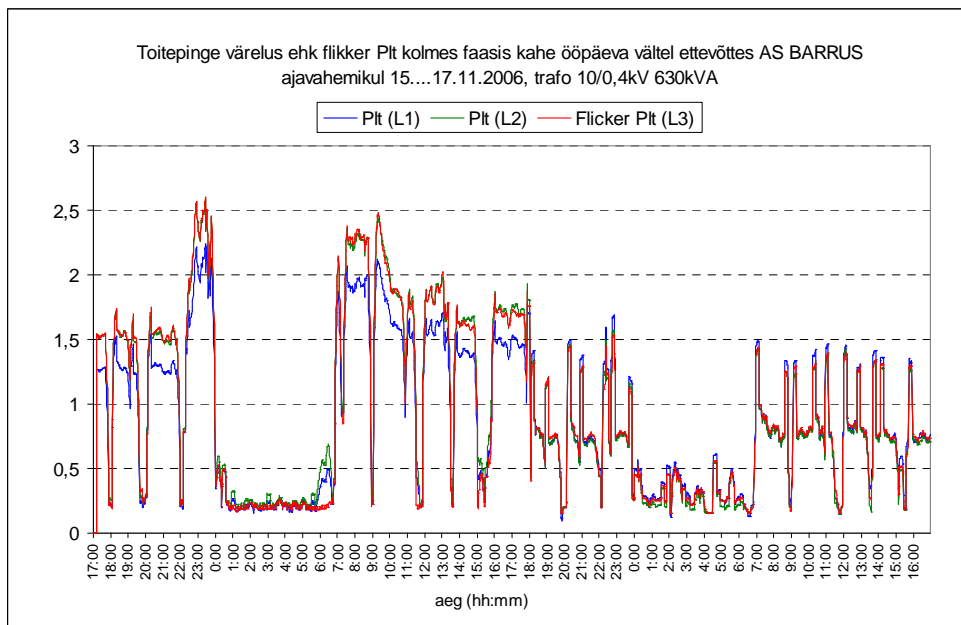
Joonis 16. Toitepinge harmoonilised moonutused THD_u (%) tööstusettevõttes, trafo 10/0,4 kV võimsusega 630 kVA



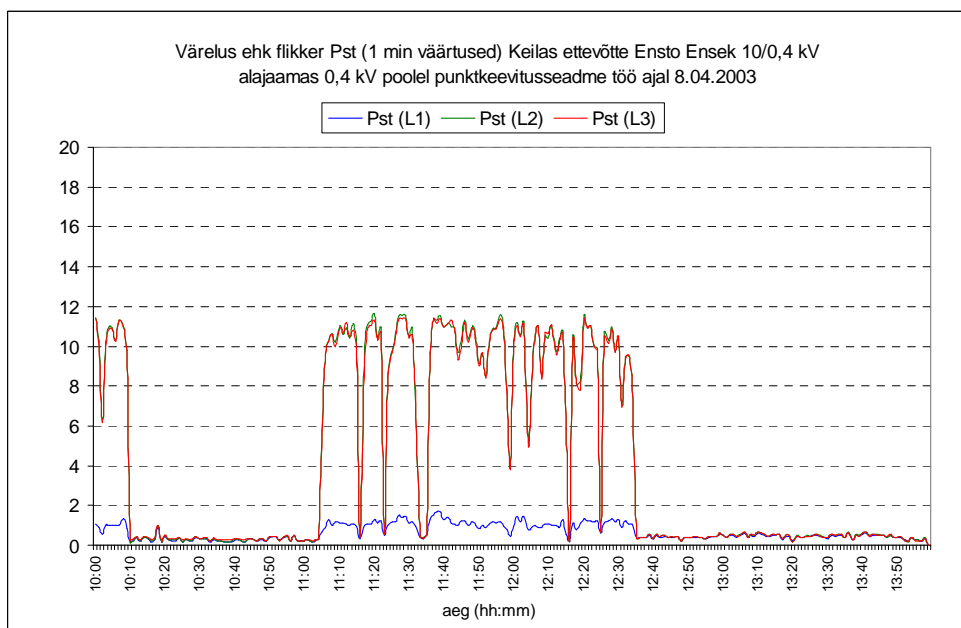
Joonis 17. Toitepinge harmoonilised moonutused THD_u ühe nädala vältel ettevõttes Haka Plast OÜ, moonutusi põhjustavad plasttoruliinide alalisvooluajamid



Joonis 18. Toitepinge harmoonilised moonutused THD_u (%) kolmes faasis Viru Hotelli 10/0,4 kV alajaamas sektsioonis 1 ühe nädala vältel



Joonis 19. Toitepinge värelus ehk flikker kolmes faasis kahe ööpäeva vältel saetööstuses, saagimisliini töö ajal ületab värelus tunduvalt standardiga lubatud piirväärtuse 1,0



Joonis 20. Värelus ehk flikker P_{st} 0,4 kV elektrisüsteemis punktkeevitusseadme töö ajal, iseloomulik keevitusseadmele on, et kõrge väreluse tase esineb kahes faasispinges